

**В.В. Курак, О.В. Андропова, Н.Л. Дон**

# **ОСНОВИ сонячної електроенергетики**

**Навчальний посібник**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

В.В. Курак, О.В. Андронова, Н.Л. Дон

# **Основи сонячної електроенергетики**

**Навчальний посібник**

для студентів спеціальності

141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Хмельницький 2024

УДК 621.383.51

К 93

**Курак В.В., Андропова О.В., Дон Н.Л.**

**К 93** Основи сонячної електроенергетики. Навчальний посібник для студентів спеціальності 141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка: навч. посіб. / В. В. Курак, О. В. Андропова, Н. Л. Дон. – Херсон: Книжкове вид-во ФОП Вишемирський В.С., 2024. – 348 с.

**ISBN 978-617-8187-07-1 (електронне видання)**

**Рецензенти:**

**Шутов Станіслав Вікторович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу оптоелектроніки Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України.

**Селіверстова Світлана Ростиславівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії.

*Рекомендовано до друку Вченою радою Херсонського національного технічного університету як навчальний посібник з дисципліни „Основи сонячної електроенергетики” для студентів спеціальності 141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.  
Протокол № 9 від 27.02.2024 р.*

У навчальному посібнику розглянуто основні способи перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію. Головну увагу приділено фотоелектричному способу як найбільш поширеному на сьогоднішній день. Розглянуто принцип дії, конструкції, параметри, характеристики та особливості практичного застосування сонячних елементів та фотоелектричних панелей. Окрім теоретичного матеріалу до посібника включено низку практичних завдань для самостійного розв’язання, комплекс лабораторних робіт з дослідження сонячних елементів та модулів, а також питання для самоперевірки.

Для студентів вищих навчальних закладів, що навчаються за спеціальністю 141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

**УДК 621.383.51**

ISBN 978-617-8187-07-1 (електронне видання)

© Курак В.В., Андропова О.В., Дон Н.Л., 2024  
© ХНТУ, 2024

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕДМОВА</b>	10
<b>1. Сонячне випромінювання як джерело енергії</b>	12
1.1. Характеристики сонячного випромінювання	12
1.1.1. Позаатмосферне сонячне випромінювання	12
1.1.2. Взаємодія космічного сонячного випромінювання із Землею	14
1.1.3. Розсіювання сонячного випромінювання атмосферою	16
1.1.4. Поглинання сонячного випромінювання атмосферою	17
1.1.5. Поняття атмосферної маси	19
1.2. Надходження сонячного випромінювання до поверхні приймача	21
1.3. Сонячний енергетичний потенціал України	28
1.4. Питання для самоперевірки	30
<b>2. Способи перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію</b>	32
2.1. Термодинамічний спосіб перетворення сонячної енергії	32
2.1.1. Сонячні електростанції на основі двигуна Стірлінга	33
2.1.2. Модульні сонячні електростанції з трубчастим абсорбером	33
2.1.3. Баштові сонячні електростанції	35
2.2. Термоелектричні сонячні установки	39
2.3. Фотоелектричні сонячні установки	43
2.4. Питання для самоперевірки	46
<b>3. Фізичні принципи перетворення енергії сонячного випромінювання напівпровідниковими бар'єрними структурами</b>	48
3.1. Механізми поглинання сонячного випромінювання в напівпровідниках	48
3.2. Типи напівпровідникових бар'єрних структур	54
3.2.1. Донорні та акцепторні домішки	54
3.2.2. Утворення та властивості p-n- переходу	56



3.2.3. Інші типи бар'єрних структур для фотоелектричних перетворювачів	59
3.3. Фотовольтаїчний ефект в р-п- переході	61
3.4. Вольт-амперна характеристика сонячного елемента	66
3.5. Еквівалентні схеми сонячного елемента	68
3.5.1. Ідеальний сонячний елемент	68
3.5.2. Однодіодна еквівалентна схема реального сонячного елемента	69
3.5.3. Дводіодна еквівалентна схема реального сонячного елемента	70
3.5.4. Вплив внутрішнього послідовного та шунтуючого опорів на вольт-амперну характеристику сонячних елементів	72
3.6. Основні параметри сонячних елементів та їх залежність від зовнішніх факторів	73
3.6.1. Струм короткого замикання	73
3.6.2. Напруга холостого ходу	75
3.6.3. Максимальна потужність	75
3.6.4. Струм та напруга в точці максимальної потужності	76
3.6.5. Фактор заповнення вольт-амперної характеристики	77
3.6.6. Ефективність сонячного елемента	78
3.7. Спектр fotocутливості сонячних елементів	79
3.8. Втрати в сонячних елементах	82
3.8.1. Оптичні втрати	82
3.8.2. Рекомбінаційні втрати	86
3.8.3. Омічні втрати	90
3.9. Матеріали для виготовлення сонячних елементів	93
3.10. Питання для самоперевірки	96
<b>4. Аспекти метрології сонячних елементів</b>	<b>98</b>
4.1. Вимірювання світлових вольт-амперних характеристик	98
4.1.1. Стандартизація умов вимірювання світлових вольт-амперних характеристик	99
4.1.2. Імітатори сонячного випромінювання	101

4.2. Вимірювання потужності світлового потоку	107
4.3. Вимірювання спектру fotocутливості	112
4.4. Визначення внутрішнього послідовного і шунтуючого опорів	114
4.4.1. Визначення послідовного та шунтуючого опорів зі світлової вольт-амперної характеристики сонячного елемента	114
4.4.2. Визначення послідовного та шунтуючого опорів за темною вольт-амперною характеристикою сонячного елемента	116
4.5. Визначення струму насичення та параметра ідеальності	117
4.5.1. Визначення струму насичення та параметра ідеальності з прямої гілки темної вольт-амперної характеристики	117
4.5.2. Визначення струму насичення та параметра ідеальності зі світлової вольт-амперної характеристики	119
4.5.3. Визначення струму насичення та параметра ідеальності з вимірювань струму короткого замикання та напруги холостого ходу	121
4.6. Визначення компонент внутрішнього послідовного опору сонячного елемента чотирьохконтактним методом	122
4.7. Питання для самоперевірки	124
<b>5. Сонячні елементи на основі кристалічного кремнію</b>	126
5.1. Класифікація сонячних елементів на основі кристалічного кремнію	126
5.2. Виготовлення пластин кристалічного кремнію для сонячних елментів	128
5.3. Конструкції сонячних елементів на основі кристалічного кремнію	134
5.3.1. Класичний сонячний елемент	134
5.3.2. Сонячний елемент PERC	135
5.3.3. Сонячний елемент PERT	136
5.3.4. Сонячний елемент TOPCON	138
5.3.5. Сонячний елемент HJT	139
5.3.6. Сонячний елемент IBC	141

5.4. Типова технологія виготовлення сонячних елементів на основі кристалічного кремнію	143
5.4.1. Хімічна обробка пластин	144
5.4.2. Формування дифузійного p-n- переходу	144
5.4.3. Плазмохімічне травлення	146
5.4.4. Формування антивідбиваючого шару	148
5.4.5. Формування контактної металізації	150
5.4.6. Тестування та сортування готової продукції	154
5.5. Типові параметри сонячних елементів на основі кристалічного кремнію	156
5.6. Питання для самоперевірки	157
<b>6. Сонячні елементи на основі напівпровідникових сполук</b>	<b>159</b>
6.1. Сонячні елементи на основі сполук $A^{III}B^V$	159
6.1.1 Сонячні елементи на основі гетероструктур $Al_xGa_{1-x}As - GaAs$	160
6.1.2. Каскадні сонячні елементи	163
6.1.3. Особливості перетворення концентрованого випромінювання сонячними елементами на основі сполук $A^{III}B^V$	166
6.2 Сонячні елементи на основі телуриду кадмію	169
6.3 Сонячні елементи на основі плівок $CuInSe_2$ та $CuIn_xGa_{1-x}Se_2$	173
6.4. Питання для самоперевірки	175
<b>7. Сонячні елементи на основі аморфних напівпровідникових плівок</b>	<b>178</b>
7.1. Особливості аморфних напівпровідників	178
7.2. Властивості аморфного гідрогенізованого кремнію та методи його отримання	180
7.3. Конструкції сонячних елементів на основі плівок аморфного гідрогенізованого кремнію	182
7.4. Переваги та недоліки сонячних елементів на основі аморфних плівок	185
7.5. Питання для самоперевірки	187

<b>8. Перспективні матеріали для сонячних елементів</b>	189
8.1. Сонячні елементи на основі органічних матеріалів	189
8.2. Сонячні елементи на барвниках	191
8.3. Фотоелектричні перетворювачі на основі перовскітів	193
8.4. Сонячні елементи з квантовими точками	195
8.5. Питання для самоперевірки	197
<b>9. Фотоелектричні модулі</b>	200
9.1. Класифікація фотоелектричних модулів	200
9.2. Конструкції фотоелектричних модулів	202
9.3. Параметри фотоелектричних панелей	206
9.4. Особливості роботи сонячних панелей в умовах часткового затінення приймальної поверхні	209
9.5. Типова технологія виготовлення модулів на основі кристалічних сонячних елементів	213
9.6. Питання для самоперевірки	216
<b>10. Сонячні фотоелектричні системи</b>	218
10.1. Типи фотоелектричних систем та їх особливості	218
10.2. Мережеві фотоелектричні станції	220
10.3. Автономні фотоелектричні станції	224
10.4. Гібридні фотоелектричні станції	233
10.5. Питання для самоперевірки	236
<b>11. Практичні завдання</b>	239
11.1. Методика проведення практичних занять	239
11.2. Завдання №1. Розрахунок коефіцієнтів поглинання сонячного випромінювання в атмосфері	240
11.3. Завдання №2. Розрахунок концентратора сонячного випромінювання	246
11.4. Завдання №3. Побудова світлової ВАХ ідеального сонячного елемента	250



11.5. Завдання №4. Побудова світлової ВАХ сонячного елемента з електричними втратами	253
11.6. Завдання №5. Розрахунок оптимальних параметрів гребінчастої контактної сітки	256
11.7. Завдання №6. Розрахунок ефективності перетворення сонячної енергії кремнієвими фотоелектричними перетворювачами	261
11.8. Завдання №7. Побудова температурних залежностей основних параметрів кремнієвого сонячного елемента	266
11.9. Завдання №8. Розрахунок фотоелектричного модуля	270
11.10. Завдання №9. Розрахунок ємності акумуляторної батареї для автономної фотоелектричної системи	275
11.11. Завдання №10. Розрахунок площі геліополя фотоелектричної станції	282
<b>12. Лабораторний практикум</b>	<b>286</b>
12.1. Методика проведення лабораторних робіт	286
12.2. Лабораторна робота №1. Дослідження світлових вольт-амперних характеристик сонячного елемента на основі кремнію	287
12.3. Лабораторна робота №2. Визначення потужності світлового потоку за тестовим сонячним елементом	293
12.4. Лабораторна робота №3. Визначення контактного опору сонячного елемента	297
12.5. Лабораторна робота №4. Оволодіння методикою оцінки послідовного та шунтуючого опорів сонячного елемента за прямою та зворотною гілками темної вольтамперної характеристики	301
12.6. Лабораторна робота №5. Дослідження температурної залежності світлових вольт-амперних характеристик ФЕП	305
12.7. Лабораторна робота №6. Дослідження світлових вольт-амперних характеристик сонячної панелі	311

12.8. Лабораторна робота №7. Визначення послідовного та шунтуючого опорів модуля сонячних елементів за прямою та зворотною гілками темної вольтамперної характеристики	317
12.9. Лабораторна робота №8. Визначення основних параметрів модуля сонячних елементів за світловою вольтамперною характеристикою	322
12.10. Лабораторна робота №9. Дослідження залежності параметрів фотоелектричних перетворювачів від інтенсивності світлового потоку	327
<b>СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ</b>	338
<b>ДОДАТОК. Правила техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт</b>	344

## ПЕРЕДМОВА

Останнім часом поряд з традиційними способами отримання електричної енергії, які базуються на використанні викопного палива та гідроенергетичного ресурсу, все більшого поширення набувають нетрадиційні способи виробництва енергії, що обумовлено не лише економічними факторами, а й недостатньою кількістю власних невідновлюваних енергетичних ресурсів в Україні. У зв'язку з цим особливу увагу прикуто до вивчення питань ефективного використання нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії, таких як енергія вітру, Сонця, припливів тощо.

В Україні сонячна енергія вважається одним з найбільш перспективних екологічно чистих енергетичних ресурсів, що здатен за умов паралельного розвитку мережі акумулюючих систем не лише зробити суттєвий внесок у забезпечення власних потреб держави у електричній енергії, але й створити передумови для підвищення експортного енергетичного потенціалу нашої країни. Тому підготовка сучасного висококваліфікованого фахівця в галузі електроенергетики, націленого на відновлення та подальший розвиток енергетичної галузі України, неможлива без вивчення головних принципів та основних технічних засобів перетворення сонячної енергії в електрику.

Метою дисципліни „Основи сонячної електроенергетики” є набуття теоретичних та практичних знань щодо способів та засобів перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію.

Вивчення дисципліни „Основи сонячної електроенергетики” передбачає формування та розвиток у студентів наступних компетентностей:

1. здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях;
2. здатність виконувати професійні обов'язки із дотриманням вимог правил техніки безпеки, охорони праці, виробничої санітарії та охорони навколишнього середовища;
3. усвідомлення необхідності підвищення ефективності електроенергетичного, електротехнічного та електромеханічного

устаткування;

4. усвідомлення необхідності постійно розширювати власні знання про нові технології в електроенергетиці, електротехніці та електромеханіці;
5. здатність використовувати знання й практичні навички щодо техніко-економічного обґрунтування вибору енергоресурсів для енергозабезпечення об'єкта та оптимізації його енергоспоживання;
6. здатність використовувати знання щодо експлуатації, обслуговування і контролю працездатності систем перетворення нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії.

Даний навчальний посібник містить систематизований матеріал, що відображає сучасний стан теорії і практики щодо перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію. Особливу увагу приділено фотоелектричному способу отримання електричної енергії, який на сьогоднішній день вважається одним з найперспективніших. Для забезпечення можливості самостійного та поглибленого вивчення студентом тієї чи іншої теми наводиться список рекомендованої літератури, що складається з першоджерел, використаних авторами при складанні посібника.

Запропоновані у навчальному посібнику практичні завдання дозволять студенту здобути комплексних навичок з розрахунку сонячних електроенергетичних систем, починаючи від надходження сонячного випромінювання й закінчуючи параметрами компонентів фотоелектричних установок. Лабораторні роботи допоможуть оволодіти сучасними методами експериментального дослідження основних параметрів сонячних елементів та фотоелектричних модулів, а питання для самоперевірки дозволять перевірити рівень засвоєння теоретичного матеріалу.



# 1 СОНЯЧНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЯК ДЖЕРЕЛО ЕНЕРГІЇ

## 1.1 Характеристики сонячного випромінювання

### 1.1.1 Позаатмосферне сонячне випромінювання

Сонячне випромінювання є екологічно чистим поновлюваним джерелом енергії. Оцінки показують, що річне надходження сонячної енергії до Землі становить близько  $1,05 \cdot 10^{18}$  кВт·год, з них  $2 \cdot 10^{17}$  кВт·год припадає на поверхню суші. Приблизно 1,5 % від всієї сонячної енергії, що падає на Землю, а це  $1,62 \cdot 10^{16}$  кВт·год на рік, може бути використано без шкоди для навколишнього середовища. Остання цифра еквівалентна спалюванню  $2 \cdot 10^{12}$  т умовного палива на рік, що приблизно в 60 разів перевищує сучасне світове виробництво всіх видів енергоресурсів.

Джерелом цієї енергії є процеси ядерного синтезу, що відбуваються на Сонці при температурі  $15 \cdot 10^6$  К та густині речовини в сонячному ядрі  $150 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. В цих умовах реалізуються *протон-протонні термоядерні реакції*, в ході яких з чотирьох протонів утворюється гелій, причому при протіканні кожної такої реакції виділяється близько 27 МеВ енергії, а кожну секунду відбуваються перетворення  $3,6 \cdot 10^{38}$  протонів. Результуюча потужність, що при цьому виділяється, становить  $3.845 \cdot 10^{26}$  Вт.

На відстані однієї астрономічної одиниці, тобто середній відстані між Землею і Сонцем, сумарний потік сонячного випромінювання, що проходить за одиницю часу через одиничну площу, перпендикулярну до потоку, поза земною атмосферою, становить  $1367 \text{ Вт/м}^2 \pm 0.1\%$ . Цю величину називають *сонячною сталою* і позначають  $I_0$ .

Внаслідок еліптичності орбіти відстань між Землею та Сонцем має сезонні зміни, а отже, інтенсивність сонячної радіації, що надходить на одиничну площадку поза атмосферою Землі, також не залишається постійної.

Ефективне значення сонячної сталої  $I_{0ef}$ , яке враховує ці сезонні коливання, може бути розраховане за формулою:

$$I_{0ef} = \left[ 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360^\circ \times n}{365}\right) \right] I_0, \quad (1.1)$$

де  $n$  - порядковий номер дня, починаючи з 1 січня.

Крім того, має місце й періодична зміна сонячної активності. Період цих змін становить 11 років (рис. 1.1).

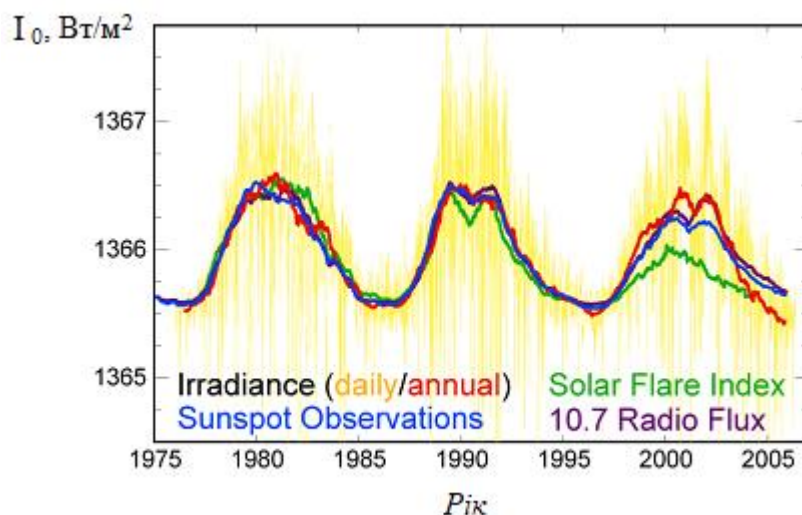


Рисунок 1.1 – Періодичність змін у сонячній активності

Спектральний розподіл потоку випромінювання з ядра Сонця є нерівномірним, але це випромінювання поглинається зовнішніми неактивними шарами, нагрітими до температури близько 5800 К, у результаті чого спектральний розподіл сонячного випромінювання стає відносно безперервним з максимумом, що припадає на довжину хвилі близько 0,5 мкм (рис. 1.2). Площа під цим розподілом дорівнює сонячній сталій.

Позаатмосферний сонячний спектр за формою, довжиною хвилі в максимумі та повною енергією випромінювання подібний до розподілу інтенсивності випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі 5800 К.

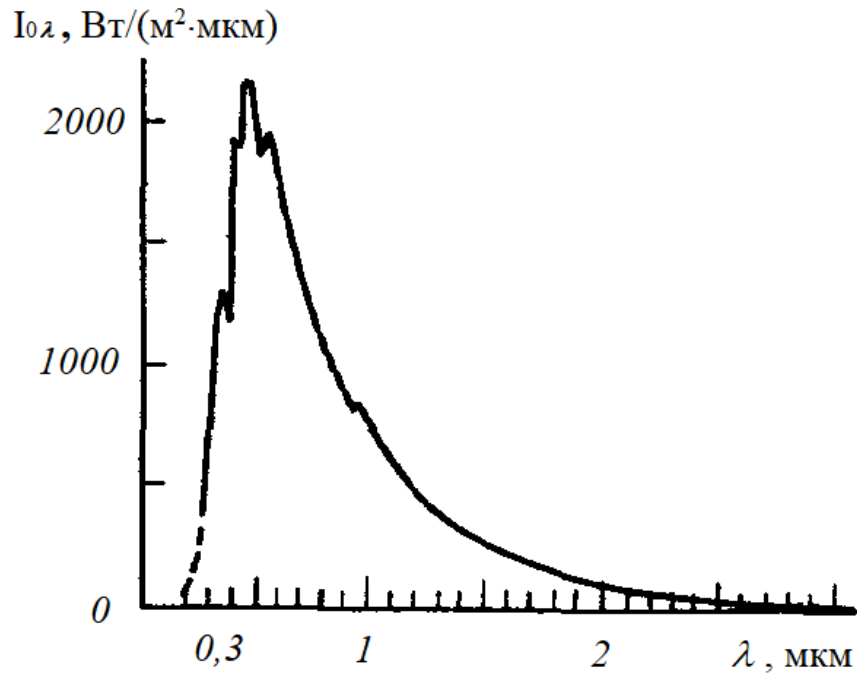


Рисунок 1.2 – Спектральний розподіл позаатмосферного сонячного випромінювання

За діапазоном довжин хвилі  $\lambda$  сонячний спектр прийнято поділяти на три основні області:

- 1) ультрафіолетове випромінювання ( $\lambda < 0,4$  мкм) — 9% інтенсивності;
- 2) видиме випромінювання ( $0,4 \text{ мкм} < \lambda < 0,7$  мкм) — 45% інтенсивності;
- 3) інфрачервоне випромінювання ( $\lambda > 0,7$  мкм) — 46% інтенсивності.

Втім, внесок у потік сонячної радіації випромінюванням з довжиною хвилі понад 2,5 мкм дуже малий, і доволі часто ним нехтують, відносячи спектральну область з  $\lambda < 2,5$  мкм до *короткохвильового* випромінювання.

### 1.1.2 Взаємодія космічного сонячного випромінювання із Землею

Сонячне випромінювання досягає атмосфери Землі у вигляді спрямованого потоку. Втім, понад 30% його відбивається назад у космічний простір (рис. 1.3). Більшу частину випромінювання відбивають хмари, меншу – сніг і лід на поверхні Землі. В результаті густина потоку короткохвильового

сонячного випромінювання, що проходить крізь атмосферу, становить приблизно  $1 \text{ кВт/м}^2$ . Відбивальну здатність Землі щодо космічного сонячного випромінювання називають *альbedo*.

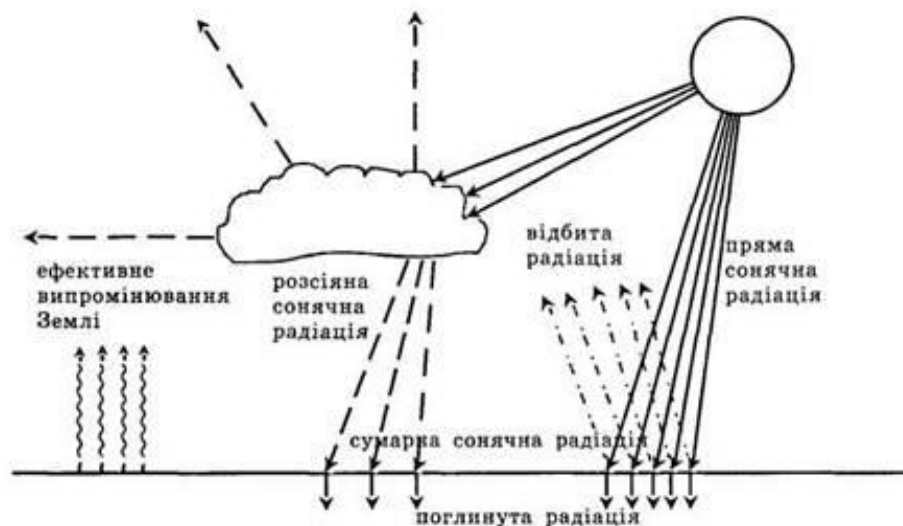


Рисунок 1.3 – Процеси взаємодії сонячного випромінювання з Землею

Сонячна радіація, що досягла земної поверхні, частково відбивається від неї, а частково поглинається. Внаслідок свого нагрівання Земля випромінює в оточуючу атмосферу *довгохвильову радіацію* з максимумом, що припадає на довжину хвилі 10 мкм. Атмосфера, поглинаючи деяку частину сонячної радіації і більшу частину випромінювання земної поверхні, сама також випромінює довгохвильову радіацію. Більша частина цього випромінювання направлена до земної поверхні і називається *зустрічним випромінюванням атмосфери*. Встановлюється певний енергетичний баланс, який називають *радіаційним балансом*.

При проходженні космічного сонячного випромінювання крізь земну атмосферу з ним, окрім відбиття хмарами, відбувається ще низка ефектів, найсуттєвішими з яких є атмосферне *розсіювання* та *поглинання*. Ці ефекти суттєво впливають як на інтенсивність світлового потоку, що досягає поверхні Землі, так і на його спектральний склад.



### 1.1.3 Розсіювання сонячного випромінювання атмосферою

Ефект розсіювання випромінювання полягає у просторовому перерозподілі напрямків його розповсюдження. Розсіювання сонячного світла в атмосфері є пружним, тобто таким, при якому не відбувається поглинання енергії.

Розсіювання променів молекулами повітря, водяною парою та часточками пилу призводить до ослаблення спрямованого потоку сонячного випромінювання та появи дифузної (розсіяної) складової. В результаті до земної поверхні сонячне випромінювання надходить у вигляді *сумарної* радіації, що містить дві складові: *пряму* та *дифузну*.

Механізм розсіювання залежить від відношення діаметра частинки, що розсіює, до довжини хвилі світла. У зв'язку з цим розрізняють розсіювання Релея та Мі.

У випадку, коли відношення діаметра частинки до довжини хвилі світла є меншим за  $1/10$ , виникає розсіювання Релея, при якому коефіцієнт розсіювання обернено пропорційний четвертому степені довжини хвилі. Оскільки молекули газів, що входять до складу повітря, дуже малі в порівнянні з довжинами хвиль випромінювання, які переважають у сонячному спектрі, то розсіювання на них відбувається саме за механізмом Релея (рис. 1.4, а).



Рисунок 1.4 – Просторовий перерозподіл напрямків розповсюдження світла в результаті розсіювання: а – розсіювання Релея; б, в – розсіювання Мі

Для частинок з розмірами, більшими за довжину хвилі, має місце переважно розсіювання Мі (рис. 1.4, б,в), яке порівняно слабо залежить від довжини хвилі.

У випадку великих частинок, коли відношення їх діаметра до довжини хвилі перевищує 10, розсіювання відбувається за законами геометричної оптики. Таке аерозольне розсіювання залежить від кількості й розміру часточок пилу, зважених в атмосфері.

Зважаючи на вказані особливості, у видимій частині спектра найбільше розсіюються проміні з найкоротшою довжиною хвилі – сині та фіолетові, а проміні з більшою довжиною хвилі, як-то червоні та помаранчеві, є менш схильними до розсіювання. Частинки ж, діаметр яких становить понад  $10^{-3}$  мм (краплини туману та хмар), однаково розсіюють хвилі з будь-якою довжиною видимої частини сонячного спектра.

Доля дифузної складової в сумарній сонячній радіації залежить від висоти Сонця, хмарності та прозорості атмосфери. Із збільшенням висоти Сонця частина розсіяної радіації при безхмарному небі зменшується. Чим прозорішою є атмосфера, тим меншою стає доля розсіяної радіації. У випадку суцільної щільної хмарності сумарна радіація повністю складається із розсіяної. Взимку, коли сонячна радіація відбивається від снігового покриву та має місце її вторинне розсіювання, доля дифузної складової в сумарній радіації значно збільшується.

#### **1.1.4 Поглинання сонячного випромінювання атмосферою**

Як вже зазначалось, склад земної атмосфери істотно впливає на параметри наземного сонячного випромінювання. Окрім розсіювання, при проходженні космічного сонячного випромінювання крізь атмосферу відбувається його часткове поглинання, яке зумовлене такими складовими атмосфери, як водяна пара, озон, кисень, вуглекислий газ та інші. Поглинання

сонячного випромінювання має резонансний характер і обумовлене спектральними лініями поглинання окремих атмосферних газів.

Так, короткохвильова ультрафіолетова область спектру з довжинами хвиль  $\lambda < 0,3$  мкм практично повністю відсутня в сонячному випромінюванні на рівні моря внаслідок поглинання такими атмосферними газами як  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $O$ ,  $N_2$  і їх іонами. В той же час проходить дуже мала частка випромінювання з близького ультрафіолетового діапазону ( $0,3 \text{ мкм} < \lambda < 0,4 \text{ мкм}$ ), якої цілком достатньо для засмаги.

Чиста атмосфера практично повністю пропускає видиме випромінювання в діапазоні довжин хвиль  $0,4 \text{ мкм} < \lambda < 0,7 \text{ мкм}$  і є спектральним «вікном» для надходження до Землі сонячної енергії. На цей спектральний діапазон припадає майже половина потоку сонячного випромінювання. Втім, наявність аерозолів і забруднення атмосфери можуть бути причинами суттєвого зменшення інтенсивності випромінювання в цьому спектральному діапазоні.

На ближній інфрачервоний діапазон спектра ( $0,7 \text{ мкм} < \lambda < 2,5 \text{ мкм}$ ) припадає майже половина інтенсивності космічного сонячного випромінювання. Втім, понад 20% сонячної енергії з цього спектрального діапазону поглинається в атмосфері, в основному парами води й діоксидом вуглецю. Концентрація  $CO_2$  в атмосфері відносно постійна й становить близько 0,03%, а концентрація парів води змінюється доволі сильно — майже до 4%, і ця флуктуація може мати суттєве значення для практичного застосування сонячної енергетики.

Що стосується довгохвильового випромінювання далекого інфрачервоного діапазону, то для довжин хвиль  $\lambda > 12$  мкм атмосфера практично є непрозорою.

По мірі проходження крізь земну атмосферу спектральний розподіл густини потоку сонячного випромінювання видозмінюється (рис. 1.5). Причому відмінність між земним сонячним спектром і космічним стає тим сильнішою, чим довший шлях долає випромінювання в атмосфері.

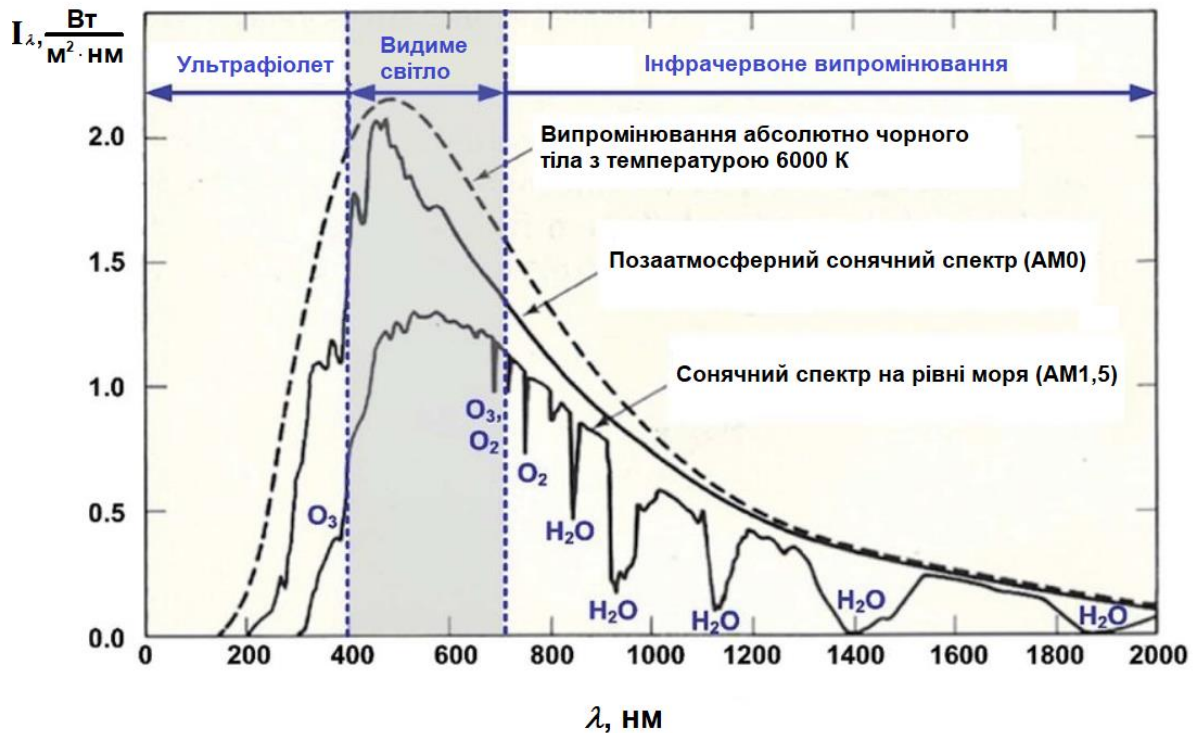


Рисунок 1.5 – Космічний та наземний сонячні спектри на фоні випромінювання абсолютно чорного тіла з температурою 6000 К

### 1.1.5 Поняття атмосферної маси

Розсіювання та поглинання сонячного випромінювання атмосферою значною мірою визначається довжиною шляху, що його проходить світло в атмосфері: чим більшу відстань проходить випромінювання, тим суттєвіше відрізняються характеристики наземного та космічного сонячних спектрів. Відстань, пройдену сонячним випромінюванням в атмосфері прийнято характеризувати *атмосферною (оптичною) масою  $m$*  (рис. 1.6) – це відношення реальної довжини шляху 1, яку проходить сонячне світло крізь атмосферу, до найкоротшого можливого шляху 2, коли Сонце знаходиться в зеніті.

Відстань, яку проходять прямі сонячні промені в атмосфері, залежить від кута падіння (зенітного кута Сонця  $z$ ) і висоти розташування приймача над рівнем моря.

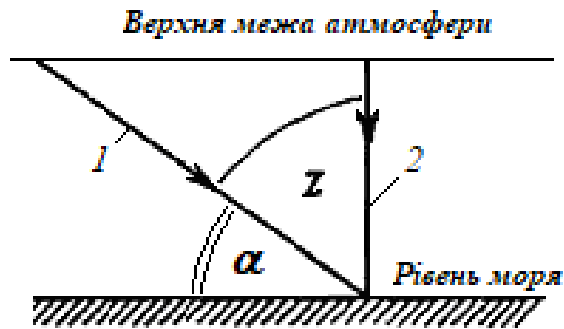


Рисунок 1.6 – Оптична маса атмосфери

Повітряна маса в будь-якій точці земної поверхні може бути визначена за рівнянням:

$$m = p / (p_0 \sin \alpha) = p \operatorname{cosec} \alpha / p_0, \quad (1.2)$$

де  $p$  – тиск повітря в даній точці поверхні Землі;  $p_0$  – нормальний атмосферний тиск, що приймається рівним  $1,013 \cdot 10^5$  Па;  $\alpha$  – кут, що визначає висоту Сонця над лінією горизонту.

Атмосферна маса приймається такою, що дорівнює одиниці, на рівні моря при ясному безхмарному небі, коли Сонце перебуває в зеніті і його промені надходять перпендикулярно на поверхню приймача. На верхній границі атмосфери оптична маса дорівнює нулю, що позначається як AM0 і вказує на позаатмосферний сонячний спектр. Наземним вимірам відповідають умови AM1, AM1,5 і т.д.

На рівні моря атмосферним масам AM1; AM1,5; AM2; AM3 та AM5 відповідають наступні значення кута висоти Сонця  $\alpha$ :  $90^\circ$ ,  $41^\circ 49'$ ,  $30^\circ$ ,  $19^\circ 27'$  та  $11^\circ 32'$ . Отже, чим меншим є кут висоти Сонця, тим більшою стає атмосферна маса і тим більшими стають відмінності в характеристиках наземного та космічного сонячного випромінювання внаслідок атмосферного розсіювання та поглинання.

## 1.2 Надходження сонячного випромінювання до поверхні приймача

Сонячне випромінювання надходить до поверхні приймача у вигляді двох складових – прямої сонячної радіації та розсіяної. Дані щодо надходження сонячної радіації на горизонтальну поверхню в розрізі року для певної місцевості можна знайти в кліматичних довідниках, або скориставшись спеціалізованими електронними ресурсами, наприклад, сайтом NASA [27].

Зазначені джерела містять, зокрема, інформацію щодо середньомісячного денного надходження як сумарної  $\bar{H}$ , так і розсіяної  $\bar{H}_d$  сонячної радіації на горизонтальну поверхню, альbedo підстилаючої поверхні  $\rho$ . Ці дані отримують на основі систематизації результатів багаторічних спостережень за сонячною інсоляцією в даній місцевості. Значення ж прямої радіації  $\bar{H}_b$ , що надходить на горизонтальну поверхню, визначають як різницю між сумарною і розсіяною радіацією:

$$\bar{H}_b = \bar{H} - \bar{H}_d. \quad (1.3)$$

Втім, в реалізованих на практиці сонячних енергетичних установках горизонтальне розташування приймачів зустрічається вкрай рідко. Тому в переважній більшості випадків виникає необхідність здійснити перерахунок надходження сонячної радіації з горизонтальної на довільно орієнтовану у просторі поверхню приймача.

Кількість сонячної радіації, що надходить на поверхню приймача, визначають, виходячи з геометрії падіння сонячних променів на довільно орієнтовану площину, використовуючи низку кутів. Так, основними кутами, що характеризують положення довільної точки на земній поверхні, є *годинний кут  $\omega$* , *схилення Сонця  $\delta$*  та *широта* місця розташування точки  $\varphi$  (рис. 1.7).

Годинний кут  $\omega$  – це кут, який визначається в екваторіальній площині між проєкціями на цю площину лінії ОА, що з'єднує центр Землі з заданою

точкою на її поверхні, й лінії  $OB$ , що з'єднує центри Землі й Сонця ( $\angle A'OB'$ ).  
 Годинний кут  $\omega$  дорівнює 0 у сонячний полудень, а проміжок часу в 1 годину  
 відповідає зміні цього кута на  $15^\circ$ :

$$\omega = 15^\circ(t - 12), \quad (1.4)$$

де  $t$  – локальний сонячний час, виражений у годинах.

Широта  $\varphi$  — це кут між лінією, що з'єднує точку  $A$  з центром Землі, і її  
 проекцією на площину екватора ( $\angle AOA'$ ). Широта  $\varphi$  вважається позитивною  
 для північної півкулі і негативною – для південної.

Схилення Сонця  $\delta$  — це кут між лінією, що з'єднує центри Землі й  
 Сонця, і її проекцією на площину екватора ( $\angle BOB'$ ). Величина  $\delta$  протягом  
 року змінюється від  $-23^\circ 27'$  у день зимового сонцестояння 22 грудня до  $23^\circ 27'$  у  
 день літнього сонцестояння 22 червня та дорівнює нулю двічі на рік – у дні  
 весняного й осіннього рівнодення (21 березня й 23 вересня).

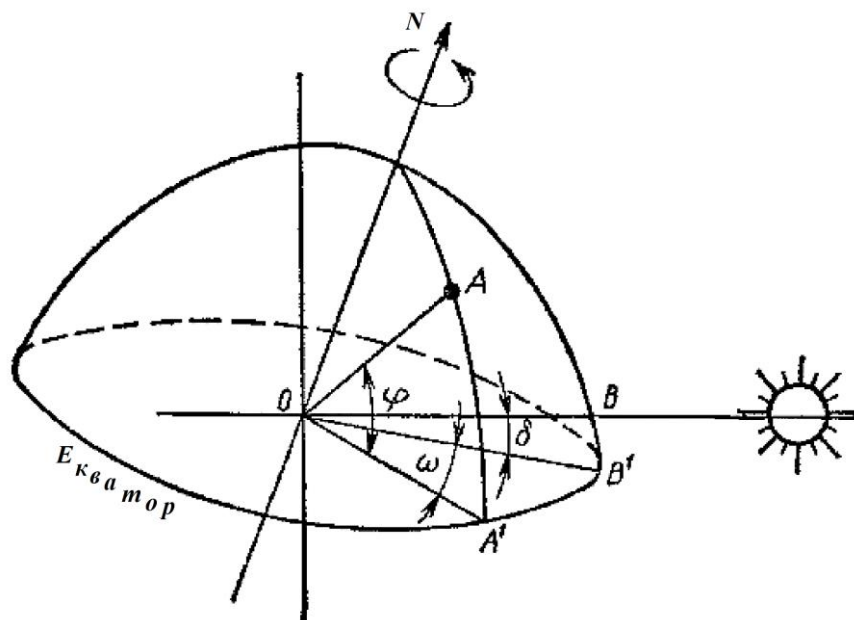


Рисунок 1.7 – Кути, що визначають положення точки на земній поверхні  
 відносно сонячних променів

Схилення Сонця у будь-який день з номером  $n$  від початку року може

бути визначене за наступною формулою:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left(360^\circ \cdot \frac{284 + n}{365}\right). \quad (1.5)$$

В табл. 1.1 представлено розрахункові значення схилення Сонця, які відповідають *середнім розрахунковим дням* кожного місяця. Середній розрахунковий день місяця є таким днем, для якого сонячна інсоляція відповідає середньомісячному денному її надходженню.

Таблиця 1.1 – Схилення Сонця для середнього розрахункового дня кожного місяця

Місяць	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
<i>n</i>	17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344
$\delta$ , град	-20,9	-13	-2,4	9,4	18,8	23,1	21,2	13,5	2,2	-9,6	-18,9	-23

До кутів, які характеризують надходження сонячних променів до горизонтальної ділянки земної поверхні, відносять *зенітний кут  $z$* , *кут висоти Сонця  $\alpha$*  та *азимут Сонця  $\theta$*  (рис. 1.8).

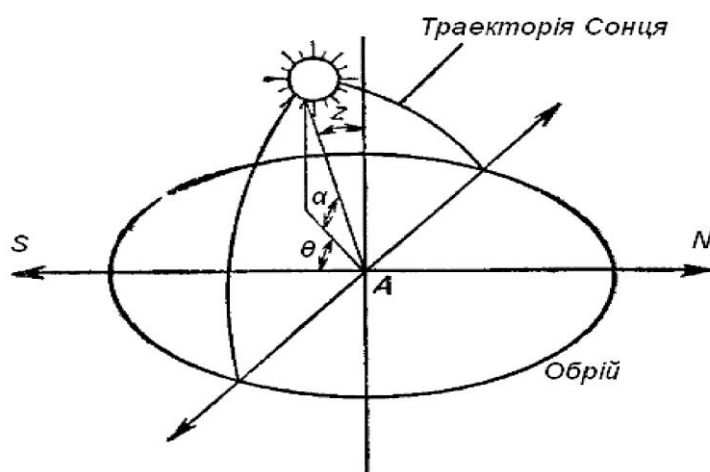


Рисунок 1.8 – Кути, які характеризують надходження сонячних променів до горизонтальної ділянки земної поверхні



Зенітний кут Сонця  $z$  – це кут між сонячним променем і нормаллю до горизонтальної площини у точці А.

Кут висоти Сонця  $\alpha$  – це кут у вертикальній площині між сонячним променем і його проекцією на горизонтальну площину. Сума кута висоти Сонця та зенітного кута становить  $90^\circ$ .

Азимут Сонця  $\theta$  – це кут у горизонтальній площині між проекцією сонячного променя на цю площину й напрямком на південь. Азимут Сонця дорівнює 0 у сонячний полудень і  $180^\circ$  опівночі.

Між вказаними вище кутами існує тісний зв'язок, який встановлюється наступними рівняннями:

$$\cos z = \cos \omega \cos \varphi \cos \delta + \sin \varphi \sin \delta; \quad (1.6)$$

$$\alpha = 90^\circ - z, \quad \sin \alpha = \cos z; \quad (1.7)$$

$$\sin \theta = \sec \alpha \cos \delta \sin \omega. \quad (1.8)$$

Втім, для розрахунку надходження сонячної радіації на довільно орієнтовану площину необхідно додатково задати ще й кути, що характеризують просторову орієнтацію власне приймальної поверхні, а саме: *азимут поверхні*  $\theta_n$  та *кут її нахилу*  $\beta$  (рис. 1.9).

Азимут поверхні  $\theta_n$  – це кут між напрямком на південь та проекцією нормалі до поверхні на горизонтальну площину. Азимут поверхні  $\theta_n$  дорівнює 0 у випадку, якщо приймач орієнтовано на південь. При західній орієнтації приймальної поверхні  $\theta_n = 90^\circ$ , східному напрямку відповідає значення  $-90^\circ$ , а у випадку північної орієнтації  $\theta_n = 180^\circ$ .

Кут нахилу поверхні  $\beta$  – це кут між горизонтальною площиною та площиною приймальної поверхні. Діапазон його значень становить від 0 до  $180^\circ$ , причому для для поверхонь, повернених до екватора,  $0 < \beta < 90^\circ$ , а для таких, що відвернуті від екватора  $90^\circ < \beta < 180^\circ$ .

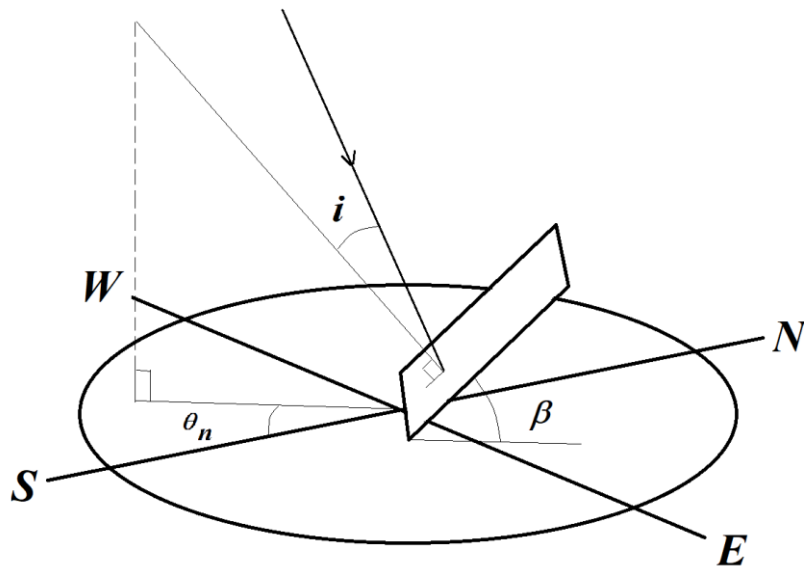


Рисунок 1.9 – Кути, що характеризують просторову орієнтацію приймача

Кут падіння сонячних променів  $i$  на поверхню приймача відраховують від нормалі до цієї поверхні (рис. 1.9). При довільній просторовій орієнтації поверхні, що має азимут  $\theta_n$  і кут нахилу  $\beta$ , кут падіння прямих сонячних променів  $i$  можна визначити за виразом:

$$\begin{aligned} \cos i = & \sin \beta \cdot \cos \delta \cdot (\sin \varphi \cdot \cos \theta_n \cdot \cos \omega + \sin \theta_n \cdot \sin \omega) - \\ & - \sin \beta \cdot \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \theta_n + \cos \beta \cdot [\cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \varphi]. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Якщо густина потоку променистої енергії в напрямку цього потоку становить  $I_{max}$ , то, розрахувавши за формулою (1.9) кут падіння сонячних променів  $i$ , можна знайти густину потоку прямої сонячної радіації на довільно орієнтовану поверхню:

$$I = I_{max} \cos i. \quad (1.10)$$

Втім, величина  $I_{max}$  не є зарані відомою, і з практичної точки зору більш зручним виглядає розрахунок на основі даних щодо надходження сонячної радіації на горизонтальну поверхню, що наводяться в кліматичних довідниках. При застосуванні цього підходу миттєве значення потоку сумарної радіації на довільно орієнтовану поверхню визначається за формулою:

$$H_T = H_b \cdot R_b + H_d \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + (H_b + H_d) \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (1.11)$$

де  $H_d$  і  $H_b$  – потоки розсіяної і прямої сонячної радіації на горизонтальній поверхні;  $\rho$  – альbedo підстилаючої поверхні;  $R_b$  – поправочний коефіцієнт для прямої сонячної радіації.

Поправочний коефіцієнт  $R_b$  у формулі (1.11) являє собою відношення потоку прямої сонячної радіації  $H_{bT}$ , що надходить на нахилену поверхню, до потоку прямої радіації, яка надходить на горизонтальну поверхню  $H_b$ . Це відношення з урахуванням виразу (1.10) може бути записане через відповідні кути падіння  $i$  та  $z$ :

$$R_b = \frac{H_{bT}}{H_b} = \frac{H_{b \max} \cos i}{H_{b \max} \cos z} = \frac{\cos i}{\cos z}. \quad (1.12)$$

Розписуючи в (1.12) косинуси кутів падіння у відповідності до виразу (1.10), отримуємо наступне рівняння для поправочного коефіцієнту  $R_b$ , яке повністю визначається описаними вище кутами:

$$R_b = \left\{ \cos \delta \cdot (\sin \beta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta_n \cdot \cos \omega + \sin \beta \cdot \sin \theta_n \cdot \sin \omega) - \right. \\ \left. - \sin \beta \cdot \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \theta_n + \cos \beta \cdot \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + \right. \\ \left. + \cos \beta \cdot \sin \delta \cdot \sin \varphi \right\} / \left\{ \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta \right\}. \quad (1.13)$$

На практиці доволі поширеним є випадок південної орієнтації приймачів

сонячної енергії, для яких  $\theta_n = 0$ , а дані з погодинного надходження сонячної радіації на горизонтальну поверхню, які необхідні для розрахунку розподілу  $H_T$  протягом дня за формулою (1.11), виявляються відсутніми. В цьому випадку розрахунок середньомісячного денного надходження сумарної радіації на нахилену поверхню приймача  $\bar{H}_T$  можна здійснити за наступним виразом:

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b \cdot \bar{R}_b + \bar{H}_d \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2} + (\bar{H}_b + \bar{H}_d) \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos\beta}{2}, \quad (1.14)$$

де  $\bar{H}_b$  та  $\bar{H}_d$  – середньомісячне денне надходження відповідно прямої та розсіяної сонячної радіації на горизонтальну поверхню;  $\bar{R}_b$  – середньомісячний поправочний коефіцієнт для прямої радіації.

Для поверхні з південною орієнтацією середньомісячний поправочний коефіцієнт  $\bar{R}_b$  може бути розрахований за формулою:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + (\pi/180) \cdot \omega'_s \cdot \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin\delta}{\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + (\pi/180) \cdot \omega_s \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta}, \quad (1.15)$$

де  $\omega_s$  – значення годинного кута заходу Сонця для горизонтальної поверхні;  $\omega'_s$  – значення годинного кута заходу Сонця для нахиленої поверхні з південною орієнтацією для середнього розрахункового дня місяця.

При цьому, годинний кут заходу Сонця для горизонтальної поверхні визначають за виразом:

$$\omega_s = \arccos(-\operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{tg}\delta), \quad (1.16)$$

а годинний кут заходу Сонця  $\omega'_s$  обирають як менше з двох значень:

$$\omega'_s = \min \left[ \begin{array}{l} \arccos[-\operatorname{tg}(\varphi) \cdot \operatorname{tg} \delta] \\ \arccos[-\operatorname{tg}(\varphi - \beta) \cdot \operatorname{tg} \delta] \end{array} \right]. \quad (1.17)$$

Таким чином, для визначення сумарної сонячної енергії, яка надходить протягом середнього розрахункового дня певного місяця на нахилену під кутом  $\beta$  поверхню з південною орієнтацією, виконують розрахунок за формулою (1.14), маючи дані щодо середньомісячного денного надходження на горизонтальну поверхню прямої  $\bar{H}_b$  (або сумарної  $\bar{H}$ ) та розсіяної  $\bar{H}_d$  сонячної радіації, а також інформацію щодо альbedo підстилаючої поверхні  $\rho$ . Попередньо за виразом (1.15) необхідно виконати розрахунок поправочного коефіцієнта  $\bar{R}_b$  для відповідного середнього розрахункового дня місяця (див. табл. 1.1).

### 1.3 Сонячний енергетичний потенціал України

Географічне розташування України створює доволі сприятливі умови для розвитку сонячної енергетики. Середньорічна кількість сумарної сонячної радіації (рис. 1.10), що потрапляє на 1 м<sup>2</sup> поверхні, на території України знаходиться в межах від 1070 кВт·год/м<sup>2</sup> на півночі і заході, до 1400 кВт·год/м<sup>2</sup> і вище в південних регіонах України.

Радіаційний режим території України характеризується зміною тривалості сонячного сяйва в середньому за рік від 1690 – 1850 годин у західних районах Полісся та Лісостепу до 2150 – 2450 годин у Криму та на узбережжях Чорного й Азовського морів. В таких кліматичних умовах сонячні електростанції можуть ефективно працювати протягом всього року, хоча, найбільш ефективна їх експлуатація має місце з квітня по жовтень на півдні нашої країни та з травня по вересень – у північних областях.

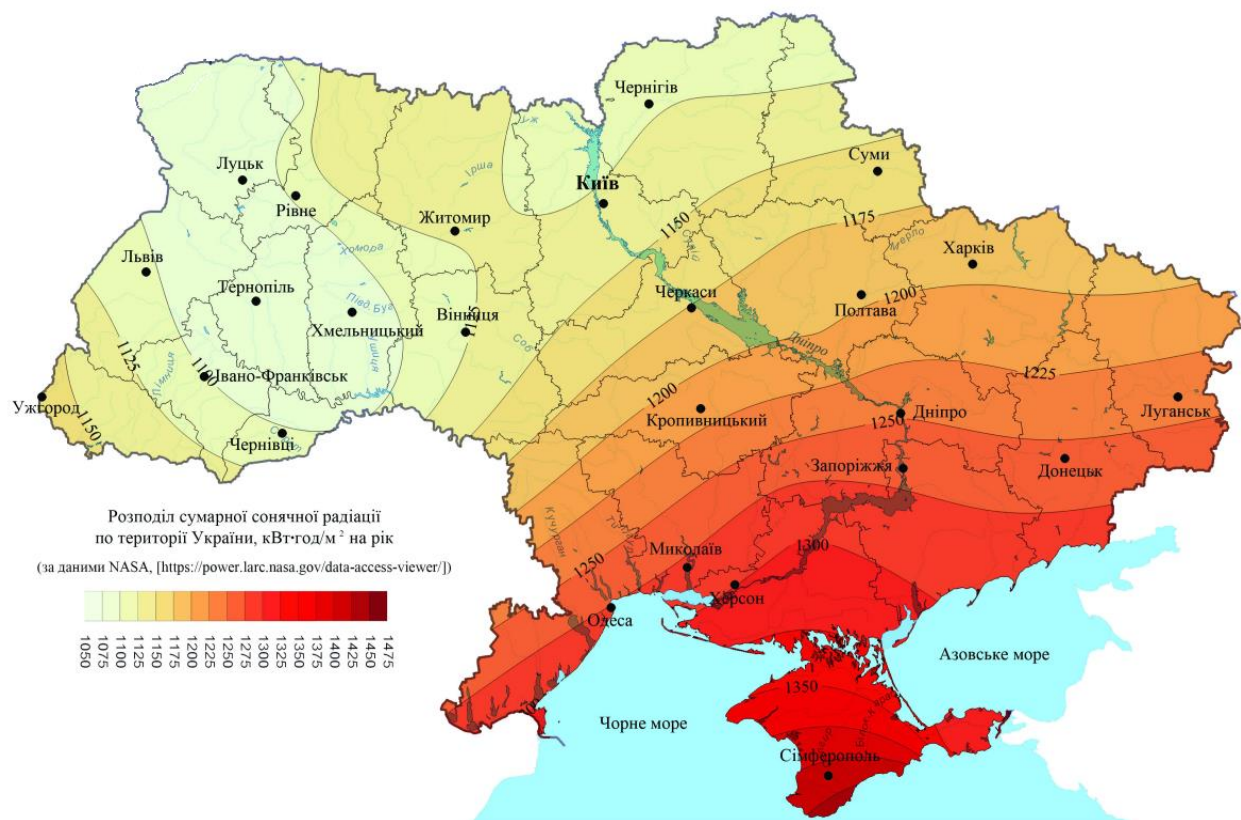


Рисунок 1.10 – Розподіл річного надходження сумарної сонячної радіації по території України

Теоретична встановлена потужність сонячних електростанцій, яка враховує не лише значення наявної сонячної інсоляції, але й доступну площу для будівництва станцій та їх коефіцієнт потужності, який, в свою чергу, залежить від типу та розташування фотоелектричних панелей, відстані між рядами панелей, тощо, складає 82768 МВт, а річний потенціал вироблення електричної енергії такими станціями в Україні згідно розрахунків становить близько 100 млрд. кВт·год/рік (рис. 1.11).

Достатній рівень сонячної інсоляції, наявність вільних площ під будівництво фотоелектричних станцій, а також державна підтримка, зокрема, дія «зеленого» тарифу, стимулювали останніми роками активний розвиток сонячної енергетики в Україні. Так на 1 квітня 2019 року в Україні було встановлено 2,2 ГВт потужності об'єктів сонячної енергетики, що дозволило піднятися нашій державі з 34-го на 23-є місце в світовому рейтингу, причому у відповідності до енергетичної стратегії до 2035 року планується досягти 25%

загального виробництва енергії саме від екологічно чистих джерел.

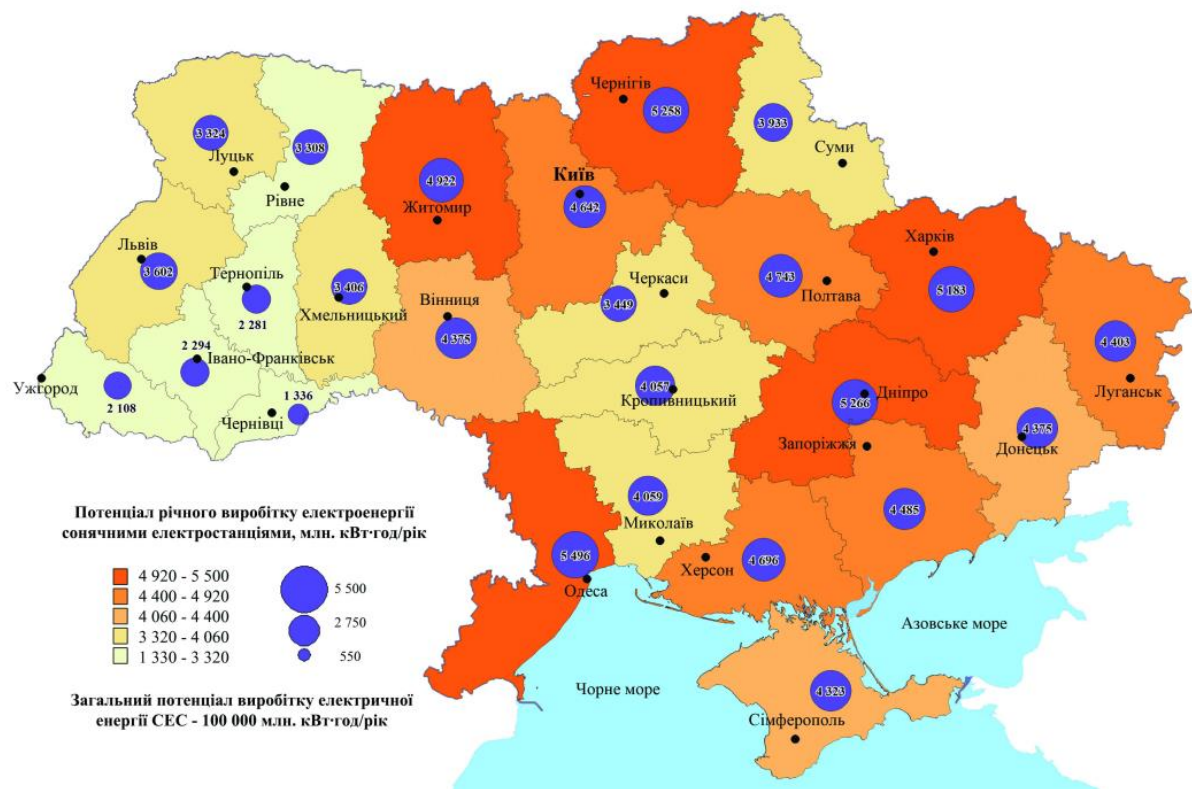


Рисунок 1.11 – Розподіл потенціалу вироблення електроенергії сонячними станціями по території України

#### 1.4 Питання для самоперевірки

1. Опишіть основні характеристики позаатмосферного сонячного випромінювання. Дайте визначення сонячної сталої.
2. Назвіть основні спектральні області сонячного випромінювання та вкажіть довжини хвиль, що відповідають межам цих областей.
3. Опишіть процеси, що мають місце при взаємодії космічного сонячного випромінювання із Землею.
4. Дайте визначення поняттям «альbedo Землі» та «альbedo підстилаючої поверхні».
5. Опишіть механізми розсіювання сонячного випромінювання в атмосфері Землі.

6. Назвіть основні атмосферні гази, що поглинають сонячне випромінювання під час його проходження крізь атмосферу, та вкажіть відповідні спектральні діапазони цього поглинання.
7. Дайте визначення атмосферної маси та запишіть вираз для її розрахунку.
8. Назвіть основні кути, що характеризують положення точки на поверхні Землі відносно сонячних променів.
9. Дайте визначення зенітного кута та кута висоти Сонця.
10. Поясніть різницю між поняттями «азимут Сонця» та «азимут поверхні».
11. Опишіть алгоритм розрахунку надходження сонячної радіації на нахилену поверхню приймача за кліматичними даними щодо середньомісячного денного надходження сумарної та дифузної радіації на горизонтальну поверхню.
12. Доведіть перспективність розвитку сонячної електроенергетики в кліматичних умовах України.

**Рекомендована література: [1-3, 5, 6, 8-14, 27]**



## **2 СПОСОБИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНУ ЕНЕРГІЮ**

Перетворення сонячної енергії в електричну реалізується в сонячних електроенергетичних установках, які за своїм принципом можна поділити на наступні класи:

- 1) сонячні енергетичні установки, що використовують термодинамічний спосіб отримання електричної енергії;
- 2) термоелектричні сонячні установки;
- 3) фотоелектричні сонячні установки.

Завдяки вдалому поєднанню технічних та економічних показників найбільш поширеним на сьогоднішній день є саме фотоелектричний спосіб отримання електричної енергії, хоча є приклади успішної реалізації проектів з будівництва централізованих сонячних електростанцій, що працюють за термодинамічним принципом.

### **2.1 Термодинамічний спосіб перетворення сонячної енергії**

В енергетичних установках, що працюють за термодинамічним способом, концентрована за допомогою оптичних елементів сонячна енергія спочатку перетворюється в теплоту деякого теплоносія, після чого цей розігрітий до високої температури теплоносій використовується в якості робочого тіла певної теплової машини або турбіни, яка й призводить до обертання вал електрогенератора. Таким чином, процес отримання електричної енергії в таких установках включає декілька проміжних стадій перетворення сонячної енергії, причому одним з ключових етапів в цьому ланцюгу перетворень є отримання теплоти.

### 2.1.1 Сонячні електростанції на основі двигуна Стірлінга

Така сонячна електростанція являє собою установку з параболічними концентраторами випромінювання, в фокусі яких встановлено двигун Стірлінга (рис. 2.1). Двигун Стірлінга перетворює підведену теплоту на механічну енергію при температурі в фокусній плямі до 800 °С.



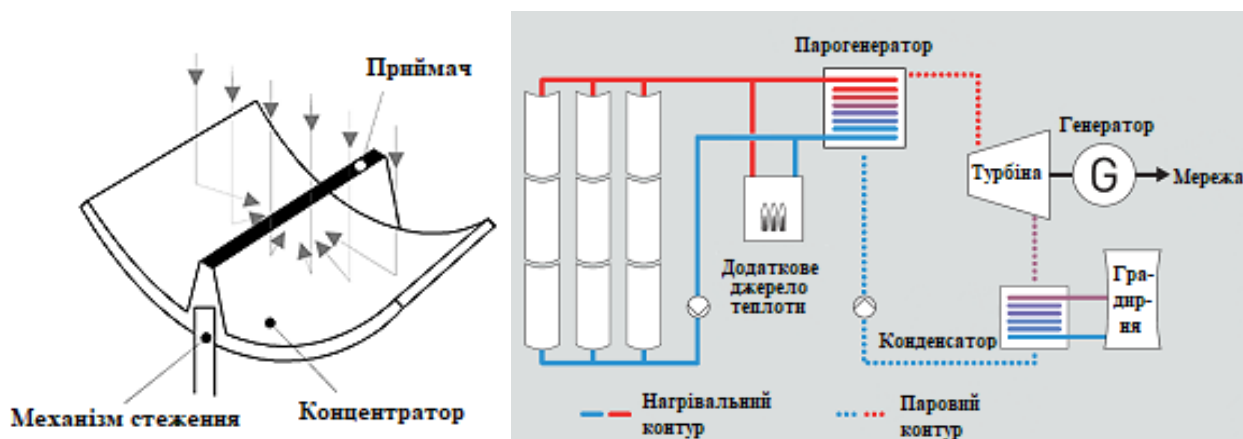
Рисунок 2.1 – Сонячна електростанція з двигунами Стірлінга

Існують такі системи на основі двигунів Стірлінга, які дозволяють безпосередньо перетворювати енергію коливань поршня в електричну енергію без використання кривошипно-шатунного механізму, що надає можливість дещо збільшити ефективність процесу перетворення. В якості робочого тіла двигуна використовують, зазвичай, водень або гелій. Ефективність таких електростанцій сягає понад 31%.

### 2.1.2 Модульні сонячні електростанції з трубчастим абсорбером

В електростанціях цього типу в фокусі параболічного концентратора розташовується вакуумована трубка, в середині якої знаходиться абсорбер з селективним покриттям. До абсорбера спрямовується світловий потік з коефіцієнтом концентрації випромінювання, що сягає 80 (рис. 2.2, а). По каналу трубки протікає олійний теплоносій, що нагрівається концентрованим

сонячним випромінюванням до температури близько 800 °С. В теплообміннику теплова енергія від олії передається воді, що циркулює у вторинному (паровому) контурі установки, генеруючи пару, яка й подається до турбіни, що обертає вал електричного генератора (рис. 2.2, б).



а)

б)

Рисунок 2.2 – Схема модульної сонячної електростанції з трубчастим абсорбером

Будівництво сонячних електростанцій цього типу розпочалося ще в 1980-х роках. Так, у 1984 році компанія "Luz International" побудувала в Південній Каліфорнії сонячну систему "Solar Electric Generating System I" (SEGS I) потужністю 13,8 МВт. У приймальних трубках олія нагрівалася до температури 343 °С і генерувалася пара, що й використовувалася для виробництва електричної енергії.

В конструкції "SEGS I" передбачено можливість акумулювання теплової енергії, достатньої для роботи системи протягом 6 годин. У випадку тривалої відсутності сонячної інсоляції для генерування пари застосовуються котли, що працюють на природному газі.

Компанією "Luz International" побудовано аналогічні електростанції "SEGS II" - "SEGS VII" потужністю по 30 МВт кожна. Окрім того, у 1990 р. в Харпер Лейк було побудовано станції "SEGS VIII" та "SEGS IX", кожна з яких

має потужність 80 МВт. У зв'язку з банкрутством компанії "Luz International" станціями "SEGS I" - "SEGS IX" з кінця 1991 р. керують інші компанії.

Втім, компанія "Luz International" не була єдиною, хто впроваджував проекти модульних сонячних електростанцій з трубчастим абсорбером. Так, у 2008 р. дочірня фірма іспанської компанії Abengoa Solar розпочала будівництво сонячної електростанції потужністю 280 МВт в штаті Арізона (США) (рис. 2.3).

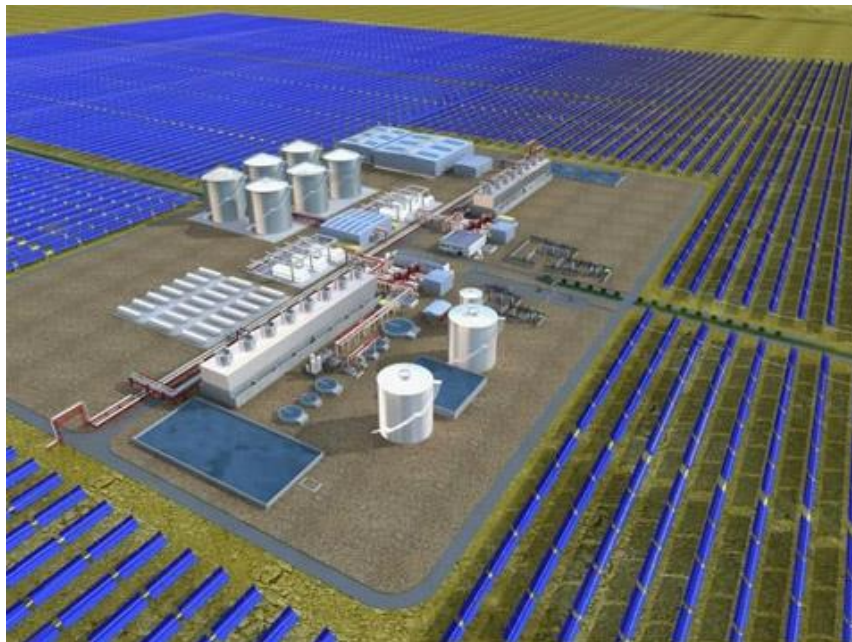


Рисунок 2.3 – Модульна сонячна електростанція з трубчастим абсорбером в штаті Арізона (США)

Проектна потужність цієї станції розрахована на забезпечення потреб у електричній енергії 70 тис. домогосподарств.

### **2.1.3 Баштові сонячні електростанції**

Сонячні електростанції баштового типу, як і модульні з трубчастим абсорбером, є фактично модифікацією класичної теплової електростанції, в якій первинне джерело енергії, викопне паливо, заміщене енергією сонячного випромінювання. Втім, є й суттєва різниця між модульною та баштовою

сонячною станцією. Якщо в першій приймачі сонячного випромінювання з теплоносієм розосереджені в межах площі всього геліополя, то в електростанціях баштового типу відбувається концентрація сонячних променів на єдиному центральному приймачі. Використання центрального приймача є доцільним з термодинамічної точки зору, оскільки це дозволяє досягти значно вищого температурного рівня теплоносія, забезпечивши тим самим і вищу ефективність перетворення енергії в тепловій установці.

В баштових сонячних електростанціях сонячне випромінювання сприймається окремими дзеркалами (геліостатами), що заповнюють певну ділянку земної поверхні навколо башти, і внаслідок відбивання від них спрямовується на центральний приймач, розташований на вершині башти (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Баштова сонячна електростанція «Solar-1» (США)

По мірі видимого переміщення Сонця по небосхилу геліостати змінюють свою просторову орієнтацію так, щоб напрямки відбитих від них світлових потоків спрямовувались на нерухомий центральний приймач. Це потребує застосування складної системи орієнтації, здатної керувати кожним



геліостатом окремо.

Окрім того, до оптичної системи баштової сонячної електростанції висувається ще й низка суперечливих вимог. Так, з одного боку, дзеркала мають найщільніше заповнювати земельну ділянку, щоб досягти високої інтенсивності спрямованого до приймача світлового потоку, а з іншого – вони не мають затінювати та заважати один одному під час зміни просторової орієнтації. До того ж, для збільшення інтенсивності світлового потоку потрібно збільшувати кількість дзеркал у геліополі за рахунок задіявання периферійних областей. Геліостати ж периферійної системи внаслідок ефекту розходження променів збільшують площу світлової плями на приймачі і роблять все менший внесок у концентрацію світлового потоку. Сукупність цих та низка інших особливостей оптичної системи баштової сонячної станції перетворює її на систему з жорсткими внутрішніми зв'язками, незначні порушення яких можуть призвести до втрати здатності ефективно концентрувати сонячну енергію на центральному приймачі.

Незважаючи на вказані недоліки, проекти баштових сонячних електростанцій були реалізовані в цілій низці країн. Так, станом на 1986 р. було побудовано 7 експериментальних станцій електричною потужністю від 0,5 до 10 МВт.

Найбільшою з них була «Solar -1» (Каліфорнія, США), потужність якої становила 10 МВт (рис. 2.4). Ця станція, яку було введено в експлуатацію у квітні 1982 р., мала башту висотою 91 м з циліндричним центральним приймачем, навколо якої розташовувались 1818 геліостатів загальною площею 73,2 тис. м<sup>2</sup>. Площа центрального приймача становила 294 м<sup>2</sup>, а температура його поверхні – близько 520 °С.

Функціонувала сонячна електростанція баштового типу і на теренах України. Експериментальну станцію «СЕС-5» (рис. 2.5) з максимальною електричною потужністю 5 МВт було побудовано у 1985 р. поблизу с. Щолкіне (АР Крим). Оптична система цієї станції складалась із 1600 геліостатів загальною площею 40 тис. м<sup>2</sup>, які було згруповано в 20 кільцевих рядів. Башта з

приймачем розташовувалась у геометричному центрі кільцевого геліополя. Висота башти становила 89 м. Центральний приймач площею 154 м<sup>2</sup> мав поверхню у вигляді циліндра з діаметром і висотою по 7 м. Номінальна температура теплоносія у приймачі дорівнювала 250 °С при на декілька градусів вищій температурі поверхні, що сприймає сонячне випромінювання.



Рисунок 2.5 – Баштова сонячна електростанція «СЕС-5» (АР Крим)

Водяна пара, що утворювалась в центральному приймачі під дією сонячного випромінювання, під тиском 40 атмосфер спрямовувалась по трубопроводах до машинної зали, де розташовувався турбогенератор. Одночасно частина високотемпературної пароводяної суміші акумулювалась в двох спеціальних ємностях об'ємом по 1000 м<sup>3</sup> кожна. Такий тепловий акумулятор здатен був забезпечити роботу станції на стандартній потужності протягом 3-4 годин у випадку відсутності сонячної інсоляції або у нічний час.

Станція пропрацювала до початку 1990-х років і була закрита за непотрібністю та відсутністю фінансування. Вежу демонтовано у 2005 році.

За час своєї експлуатації «СЕС-5» виробила близько 2 млн кВт·год електричної енергії.

## 2.2 Термоелектричні сонячні установки

Підвищення ефективності сонячних електроенергетичних систем можна досягти зменшенням кількості стадій в ланцюзі перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію, кожна з яких характеризується певними втратами. Реалізація цього підходу стає можливою при застосуванні термоелектричних систем, в яких виключено стадії, пов'язані з отриманням механічної енергії.

В таких системах сонячне випромінювання поглинається у пластині абсорбера, перетворюючись на теплоту. Теплова ж енергія абсорбера передається до гарячих спаїв термоелектричного генератора. Одночасне відведення теплоти від холодних спаїв забезпечує встановлення певної різниці температур між гарячими і холодними спаями і генерацію електричної енергії внаслідок *ефекту Зеебека*, який полягає у виникненні електрорушійної сили (ЕРС) та струму у колі за умови наявності різниці температур між спаями різних матеріалів (рис. 2.6).

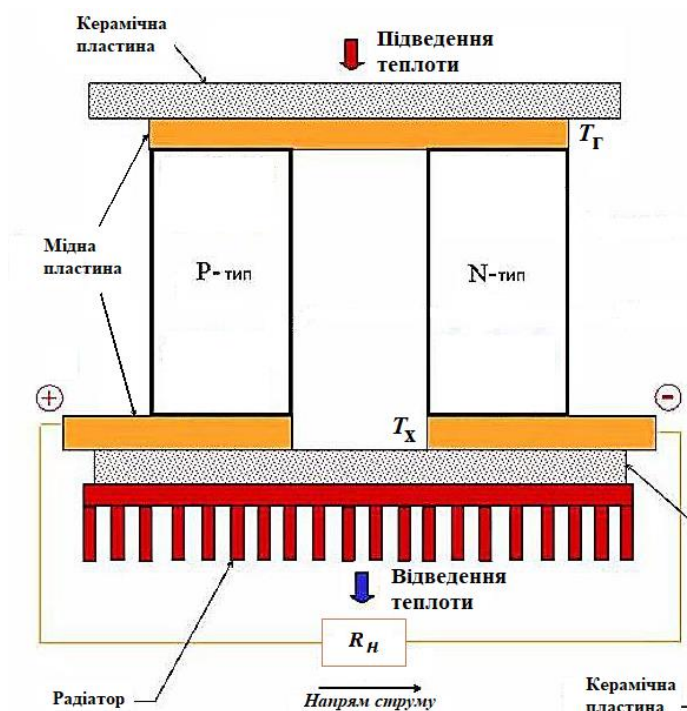


Рисунок 2.6 – Схема побудови термоелектричного генератора



Електрична потужність, що виділяється на навантаженні  $R_n$  термоелектричного генератора, може бути визначена у відповідності до рівняння:

$$P_{TEG} = Q_G - Q_X = UI = \alpha(T_G - T_X)I = \alpha \Delta T I, \quad (2.1)$$

де  $Q_G$  – потік теплоти, що підводиться до гарячих спаїв;  $Q_X$  – потік теплоти, що відводиться від холодних спаїв;  $U$  та  $I$  – відповідно, напруга та струм термоелектричного генератора;  $\alpha$  – коефіцієнт Зеєбека, що показує зміну електрорушійної сили при зміні різниці температур  $\Delta T$  на 1 градус та залежить від матеріалів термоелектричної пари;  $T_G$  та  $T_X$  – температури гарячих та холодних спаїв, відповідно.

Як слідує з виразу (2.1), для досягнення високих електричних потужностей в термоелектричних системах необхідно забезпечувати значну різницю температур між гарячими та холодними спаями  $\Delta T$ , а також використовувати матеріали з високими значеннями коефіцієнту Зеєбека  $\alpha$ .

У випадку сонячних термоелектричних систем високу різницю температур між гарячими і холодними спаями забезпечують концентрацією сонячного випромінювання, що спрямовується на поверхню абсорбера, з одночасним застосуванням ефективних систем відведення теплоти від холодних спаїв. Високі ж значення коефіцієнту Зеєбека притаманні термоелементам, виготовленим на основі напівпровідникових р-п- структур зі спеціалізованих термоелектричних матеріалів таких, як системи Bi-Te, Bi-Sb, Pb-Te, Ge-Te, Ge-Si (рис. 2.7, а).

Втім, по мірі збільшення різниці температур  $\Delta T$  підвищуються і теплові потоки від гарячих до холодних спаїв, що зменшує ефективність перетворення теплоти абсорбера в електричну енергію і змушує застосовувати більш продуктивні системи відведення теплоти, здатні підтримувати задане значення  $\Delta T$ . Для зменшення величини цих теплових потоків варто використовувати напівпровідникові матеріали з малою теплопровідністю, а також розміщувати

термоелектричний генератор у вакуумованому корпусі (рис. 2.7, б).

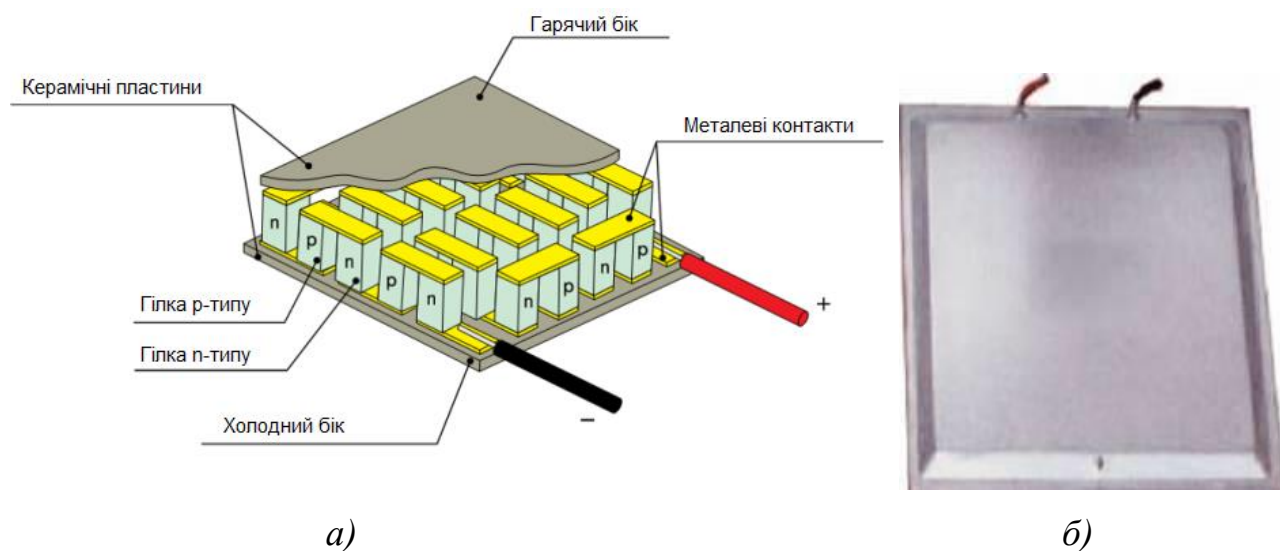


Рисунок 2.7 – Будова (а) та зовнішній вигляд (б) термоелектричного генератора

Умова забезпечення низької теплопровідності гілок термоелектричних елементів супроводжується зменшенням величини електропровідності цих гілок, що призводить до збільшення внутрішнього опору термоелектричного генератора та зростання омичних втрат на ньому. Таким чином, існує оптимальне співвідношення між електро- та теплопровідністю матеріалів гілок термоелектричного генератора, а також геометричними параметрами гілок, при яких досягається максимальна ефективність перетворення теплової енергії в електричну.

Незважаючи на те, що розрахункова ефективність термоелектричних генераторів перевищує 20%, досягнуті на практиці значення ефективності є доволі скромними і, зазвичай, не перевищують 10%. Цілком прийнятними вважаються значення ефективності на рівні 5-7%. Тому широкого поширення сонячні термоелектричні генератори не набули.

Втім, наукові дослідження, пов'язані із застосуванням термоелектричних генераторів у сонячній електроенергетиці, продовжуються, і одним із перспективних шляхів їх використання є фототермоелектричні

перетворювачі. В такій системі термоелектричний генератор розглядається як утилізатор теплової енергії, що утворюється внаслідок неповноти перетворення сонячного випромінювання в фотоелектричному перетворювачі.

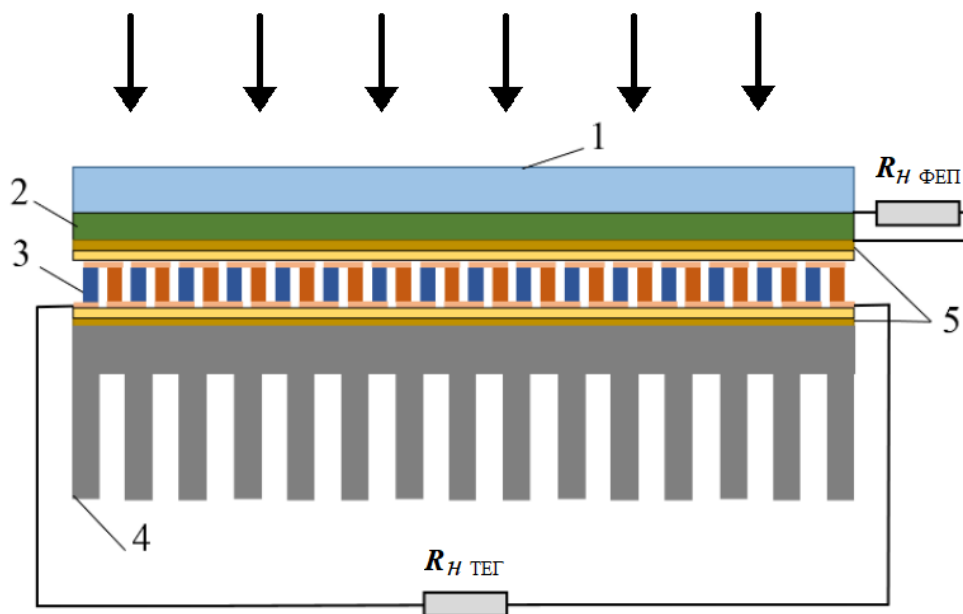


Рисунок 2.8 – Схема побудови фототермоелектричного генератора:

- 1 – гартоване скло; 2 – фотоелектричний перетворювач;
- 3 – термоелектричний генератор; 4 – система відведення теплоти;
- 5 – шари термопасти

Схематична будова типового фототермоелектричного перетворювача представлена на рис. 2.8. Фотоелектричний перетворювач 2 перетворює частину спектру сонячного випромінювання в електричну енергію внаслідок *фотовольтаїчного ефекту*, що полягає у виникненні на освітленому р-n-переході або іншій бар'єрній структурі різниці потенціалів і, як наслідок, струму у колі з електричним навантаженням  $R_{н ФЕП}$ . Частина ж сонячної енергії, не перетвореної фотоелектричним перетворювачем, спрямовується у вигляді теплового потоку до гарячих спаїв термоелектричного генератора 3, який працює на власне електричне навантаження  $R_{н ТЕГ}$ . В результаті часткової утилізації термоелектричним генератором енергії, не перетвореної фотоелектричним елементом, на навантаженні  $R_{н ТЕГ}$  виділяється додаткова

корисна електрична потужність, що підвищує ефективність перетворення сонячного випромінювання системою в цілому. Окрім того, відведення теплоти від фотоелектричного перетворювача покращує температурний режим його роботи, що позитивно відбивається на ефективності.

Внесок термоелектричного генератора в загальну електричну потужність системи збільшується з підвищенням температури гарячих спаїв, а отже, зі збільшенням ступеня концентрації потоку сонячного випромінювання, і вже при концентрації сонячного потоку в декілька десятків разів може доходити до 50% і вище.

### **2.3 Фотоелектричні сонячні установки**

В фотоелектричних сонячних установках реалізовано прямий спосіб перетворення сонячної енергії в електрику, який базується на *фотовольтаїчному ефекті* в напівпровідникових бар'єрних структурах. В фотоелектричних перетворювачах (ФЕП), або ж сонячних елементах (рис. 2.9), відбувається безпосереднє перетворення поглинутого сонячного випромінювання в електричну енергію, яке не потребує проміжних стадій, пов'язаних з отриманням теплової або механічної енергії, що надає потенційну можливість досягти більших ефективностей, ніж при застосуванні сонячних електроенергетичних установок інших типів.

Сонячне випромінювання з енергією фотонів, не меншою за порогове значення, що дорівнює ширині забороненої зони напівпровідника, поглинається в об'ємі напівпровідникової бар'єрної структури, в якості якої найчастіше використовують р-п- перехід (рис. 2.10). Поглинута енергія фотонів витрачається на розрив хімічного зв'язку між атомами кристалічної решітки напівпровідникового кристалу, в результаті чого утворюється вільний *електрон* та позитивно заряджений іон у вузлі кристалічної решітки. Цей позитивний заряд, який подібно до вільного електрону має можливість переміщуватись по кристалу, називають *діркою*. Отже, в проведенні струму в напівпровіднику

приймають участь як вільні електрони, так і дірки. Досягнувши області просторового заряду, зосередженої на границі р- та n- шарів, електрони та дірки розділяються її полем так, що електрони накопичуються в шарі напівпровідника з провідністю n- типу, а дірки – в шарі р- типу. В результаті такого просторового розділення носіїв заряду, n- шар заряджається негативно, а р- шар стає зарядженим позитивно. Різницю потенціалів, що виникає між n- та р- шарами внаслідок освітлення, називають *фото-ЕРС*. При замиканні металевих електродів ФЕП на зовнішнє навантаження з опором  $R_H$  в утвореному електричному колі виникає електричний струм силою  $I$ , яка залежатиме від величини опору навантаження.



Рисунок 2.9 – Фотоелектричні перетворювачі

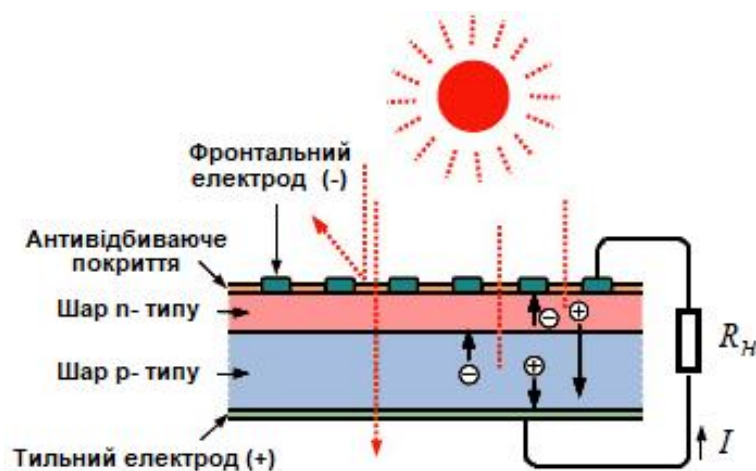


Рисунок 2.10 – Будова сонячного елемента

Для зменшення доли відбитого від поверхні ФЕП сонячного випромінювання застосовують антивідбиваючі покриття у вигляді тонких діелектричних плівок, що наносяться на фронтальну поверхню.

На даний час основним матеріалом для виготовлення сонячних елементів є кремій, на долю якого припадає близько 80% від загального світового виробництва. Ефективність перетворення сонячної енергії, яку демонструють серійні ФЕП на основі кристалічного кремнію, є доволі високою і сягає 24%. Втім, конструкції і технології виготовлення кремнієвих ФЕП постійно вдосконалюються з метою підвищення їх ефективності. Так, за даними Національної лабораторії з відновлюваної енергії (NREL) рекордне на даний час значення ефективності монокристалічних кремнієвих сонячних елементів становить 26,1% за умов перетворення неконцентрованого сонячного випромінювання та 27,6% для концентрованого.

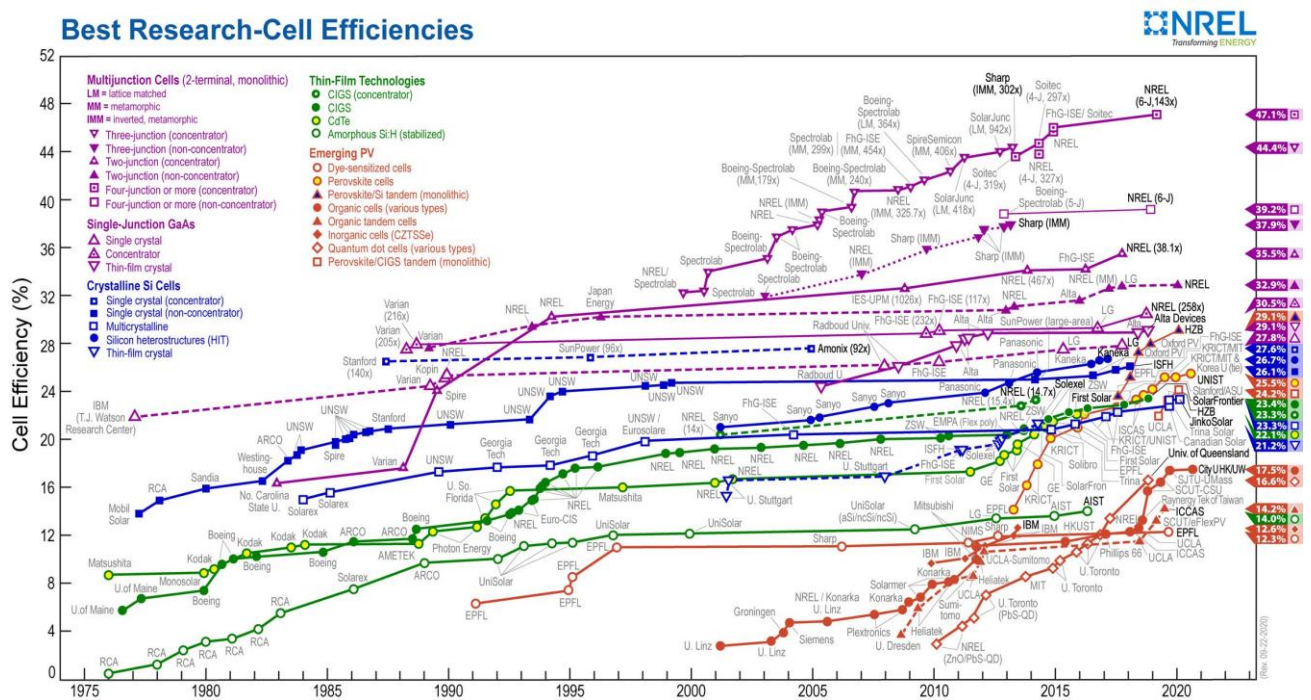


Рисунок 2.11 – Діаграма підтверджених значень ефективності сонячних елементів за даними NREL [28]

Як показує аналіз діаграми на рис. 2.11, отримані для кремнієвих ФЕП значення ефективності не є гранично досяжними. Застосування низки інших

напівпровідників, як-то арсеніду галію та багатокомпонентних сполук на його основі, дозволило перевищити показник ефективності 30%. Втім максимальну на сьогоднішній день ефективність перетворення в 47,1% продемонстрував зразок шестиперехідного елемента за умов концентрованого до 143 крат сонячного випромінювання. Такі значення досягнутих ефективностей є порівняними та навіть перевищують ККД традиційних теплових електростанцій, що працюють на викопному паливі.

Окрім високих досягнутих значень ефективності перетворення сонячного випромінювання, фотоелектричні системи отримання електричної енергії мають низку додаткових переваг, а саме: модульність, яка дозволяє будувати станції практично будь-якої потужності; статичність системи, обумовлена відсутністю механічної енергії в ланцюзі перетворення сонячного випромінювання; порівняно невеликі капіталовкладення у будівництво станцій та невисокі витрати на обслуговування; тривалий термін експлуатації систем, що становить 25 років і навіть більше. Ці фактори в поєднанні з державною підтримкою розвитку відновлюваної енергетики поставили сонячну фотовольтаїку на лідируючі позиції поміж інших технологій сонячної електроенергетики в більшості країн світу.

#### **2.4 Питання для самоперевірки**

1. Наведіть класифікацію сонячних електроенергетичних установок.
2. Опишіть загальні принципи, на яких базуються електроенергетичні установки, що використовують термодинамічний спосіб перетворення сонячної енергії.
3. Опишіть принцип дії та будову сонячної електростанції на основі двигуна Стірлінга.
4. Наведіть схему модульної сонячної електростанції з трубчастим абсорбером та складіть ланцюг перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію.

5. Опишіть будову та принцип дії баштових сонячних електростанцій.
6. Назвіть переваги використання центрального приймача сонячного випромінювання в порівнянні з системою розосереджених приймачів.
7. Наведіть основні параметри відомих вам проектів баштових сонячних електростанцій.
8. Назвіть основні переваги та недоліки термоелектричного способу перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію.
9. Опишіть принцип дії термоелектричного генератора.
10. Наведіть схему побудови та опишіть принцип дії фототермоелектричного генератора.
11. Назвіть головні переваги фотоелектричного способу перетворення сонячної енергії.
12. Розкрийте сутність фотовольтаїчного ефекту.
13. Опишіть принцип дії фотоелектричного перетворювача.
14. Які значення ефективності є характерними для сучасних сонячних елементів?
15. Назвіть напівпровідникові матеріали, що використовуються для виготовлення фотоелектричних перетворювачів. Які значення ефективності демонструють сонячні елементи на основі цих матеріалів?
16. Вкажіть фактори, що обумовлюють широке розповсюдження фотоелектричного способу перетворення сонячної енергії в електричну.

**Рекомендована література [1, 2, 5, 13, 15-19, 28]**



### 3 ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ БАР'ЄРНИМИ СТРУКТУРАМИ

#### 3.1 Механізми поглинання сонячного випромінювання в напівпровідниках

Сонячне випромінювання при потраплянні на границю розділу між повітрям та напівпровідником частково відбивається від неї, частково поглинається напівпровідниковим матеріалом, а частково проходить крізь нього без поглинання. Ці процеси характеризуються *коефіцієнтами відбивання  $r$ , поглинання  $a$  та пропускання  $t$ .*

Коефіцієнт відбивання  $r$  показує відношення густини потоку відбитої від поверхні напівпровідника сонячної радіації  $I_r$  до густини падаючого світлового потоку  $I$ :

$$r = \frac{I_r}{I} . \quad (3.1)$$

Аналогічно, коефіцієнт поглинання є відношенням густини поглинутого потоку сонячного випромінювання  $I_a$  до падаючого  $I$ :

$$a = \frac{I_a}{I} . \quad (3.2)$$

Коефіцієнт пропускання – це відношення густини потоку сонячного випромінювання, що пройшло крізь напівпровідник без поглинання  $I_t$ , до густини падаючого світлового потоку  $I$ :

$$t = \frac{I_t}{I} . \quad (3.3)$$

Зважаючи на закон збереження енергії, зрозуміло, що сума всіх цих трьох коефіцієнтів дорівнює одиниці:

$$r + a + t = 1. \quad (3.4)$$

Звісно, до виникнення вільних носіїв заряду в напівпровіднику, тобто, електронів і дірок, може призвести лише поглинута частина сонячного випромінювання. Отже, зважаючи на рівняння (3.4), потрібно вживати заходи щодо мінімізації коефіцієнтів відбивання  $r$  та пропускання  $t$ . Так, суттєвого зменшення коефіцієнту відбивання можна досягти, використовуючи антивідбиваючі покриття поверхні у вигляді тонких діелектричних плівок або ж створенням регулярного мікрорельєфу на поверхні кристалу шляхом хімічної обробки, утворивши, так звані, текстуровані поверхні.

Щодо зменшення коефіцієнту пропускання, то тут ситуація виглядає більш складною, зважаючи на фундаментальні обмеження щодо енергії фотонів  $h\nu$ , що здатні бути поглинутими у напівпровіднику. Так, у чистих напівпровідниках, що не містять домішок, фотони з енергією, меншою за граничне значення, що дорівнює ширині забороненої зони  $E_g$ , не можуть бути поглинутими, їх енергії недостатньо для розриву хімічного зв'язку між атомами. Отже, світло з енергією фотонів  $h\nu < E_g$  не може утворити електронно-діркову пару і не приймає участі у фотовольтаїчному ефекті, проходячи крізь шар напівпровідника без поглинання.

Втім, світло з енергією фотонів  $h\nu \geq E_g$  активно поглинається напівпровідниковим матеріалом з витрачанням енергії фотонів на розрив хімічних зв'язків між атомами кристалічної решітки та утворенням вільних електронно-діркових пар. Цей процес поглинання фотону може бути зображений на енергетичній діаграмі як перехід електрона з валентної зони до зони провідності з подоланням смуги заборонених для електрона енергій  $E_g$  (рис. 3.1, група переходів 1). Такий механізм поглинання світла отримав назву

власного (фундаментального) поглинання. Власне поглинання є головним механізмом поглинання світла в напівпровідниках для фотонів з енергією  $h\nu \geq E_g$ .

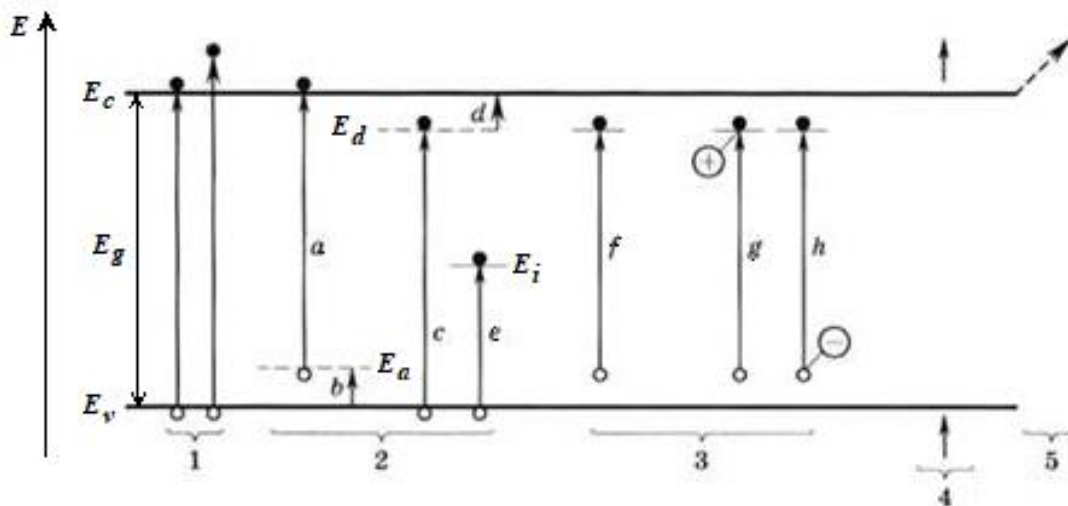


Рисунок 3.1 – Механізми поглинання світла в напівпровіднику

Окрім власного поглинання, в реальних напівпровідникових кристалах має місце і низка інших механізмів. Це – *домішкове поглинання, екситонне поглинання, поглинання вільними носіями заряду та поглинання кристалічною решіткою* (рис. 3.1).

*Домішкове поглинання* (рис. 3.1, група переходів 2) відбувається за участю енергетичних рівнів акцепторних  $E_a$  та донорних  $E_d$  домішок, а також домішок, що створюють глибокі центри з енергією  $E_i$ . Причому можливі декілька варіантів реалізації домішкового поглинання: перехід електронів з акцепторних рівнів  $E_a$  до зони провідності  $E_c$  (рис. 3.1, перехід  $a$ ); перехід електрона з валентної зони  $E_v$  на акцепторний рівень  $E_a$  (рис. 3.1, перехід  $b$ ); перехід електронів з валентної зони на енергетичні рівні донорних домішок з енергією  $E_d$  (рис. 3.1, перехід  $c$ ); іонізація донорної домішки з переходом електрону до зони провідності (рис. 3.1, перехід  $d$ ); перехід електрона на енергетичний рівень глибокого домішкового центру з енергією  $E_i$ , який виступає в ролі, так званої, пастки (рис. 3.1, перехід  $e$ ). З рис. 3.1 видно, що

енергія, потрібна для здійснення цих переходів, є меншою ширини забороненої зони напівпровідника  $E_g$ , тому наявність домішок в напівпровіднику призводить до зміщення краю поглинання у довгохвильову ділянку спектра відносно власного поглинання. Втім, ймовірність здійснення таких переходів на декілька порядків менша, ніж власних.

*Екситонне поглинання* схематично представлено на рис. 3.1 групою переходів 3. Екситон – це пара пов'язаних між собою кулонівським притягуванням електрона і дірки. Утворюється при збудженні електрона, що знаходиться у валентній зоні, енергією, меншою за ширину забороненої зони  $E_g$  (рис. 3.1, перехід *f*). Окрім, так званих, вільних екситонів, що здатні переміщуватись по кристалу у вигляді електрично нейтральної пари, можливе утворення зв'язаних екситонів, коли вільна дірка об'єднується з нейтральним донором (рис. 3.1, перехід *g*) або вільний електрон – з нейтральним акцептором (рис. 3.1, перехід *h*). Такі зв'язані екситони не є електронейтральними і отримали назву екситонних іонів.

Екситони не є стабільними утвореннями і, зазвичай, існують лише при порівняно низьких температурах кристалу, а екситонне поглинання проявляється у появі серії вузьких піків на краю спектру власного поглинання.

*Поглинання вільними носіями заряду* полягає в переході вільних носіїв (електронів і дірок) з одного енергетичного рівня на інший в межах однієї зони (рис. 3.1, група переходів 4), тобто поглинута світлова енергія в цьому механізмі лише збільшує повну енергію вільних носіїв. Спектральна смуга поглинання вільними носіями практично безперервна і зміщена в область довгих хвиль.

*Поглинання кристалічною решіткою* проявляється у збільшенні коливальної енергії атомів у вузлах кристалічної решітки в результаті поглинання фотонів з певною енергією (рис. 3.1, група 5). Кристалічна решітка поглинає світло резонансно, тобто лише при певних значеннях енергії фотона, тому спектр такого поглинання характеризується низкою піків, що лежать в далекій інфрачервоній області спектра.

Із всіх вказаних механізмів поглинання світла в напівпровідниках *фотоактивними*, тобто такими, що призводять до генерування (виникнення) нових вільних носіїв заряду, є лише власне та домішкове поглинання. Тому саме ці два механізми є важливими з точки зору реалізації фотовольтаїчного ефекту.

Екситонне ж поглинання, поглинання вільними носіями заряду та кристалічною решіткою не є фотоактивними і, в кінцевому рахунку, викликають лише розігрівання кристалу.

Окрім процесів *генерації* вільних носіїв заряду під дією поглинутого випромінювання, має місце і зворотній процес – зникнення пар вільних зарядів через певний проміжок часу, який називають *часом життя* вільних носіїв. Цей процес зникнення вільних носіїв заряду називають *рекомбінацією*. В умовах опромінення напівпровідників стаціонарним світловим потоком через короткий проміжок часу встановлюється паритет між процесами генерації та рекомбінації вільних зарядів так, що загальна їх концентрація, а отже, й електропровідність кристалу, залишається незмінною. Припинення опромінення напівпровідника світлом порушує цей баланс, і за рахунок процесів рекомбінації концентрація вільних носіїв заряду швидко зменшується до свого *рівноважного* значення. Вільні носії заряду, що утворюються в кристалі внаслідок зовнішнього енергетичного впливу, відмінного від теплового, називають *нерівноважними носіями заряду*.

Концентрація нерівноважних носіїв заряду в напівпровіднику пропорційна густині світлового потоку: чим більшою є інтенсивність освітлення, тим більша кількість нерівноважних носіїв виникає в одиниці об'єму напівпровідника в одиницю часу. Втім, внаслідок процесів поглинання густина світлового потоку, а отже і концентрація генерованих світлом носіїв заряду, по мірі розповсюдження в глибину напівпровідника зменшується.

У відповідності до закону Бугера-Ламберта-Бера при опроміненні кристалу монохроматичним світлом з довжиною хвилі  $\lambda$  густина світлового потоку  $I_\lambda$  на глибині  $x$  від поверхні становитиме:

$$I_{\lambda} = I_{\lambda m} \exp(-\alpha x), \quad (3.5)$$

де  $I_{\lambda m}$  – густина світлового потоку в кристалі біля приймальної поверхні, координата якої  $x = 0$ ;  $\alpha$  – спектральний коефіцієнт поглинання.

Коефіцієнт поглинання  $\alpha$  у виразі (3.5) визначається властивостями середовища, в якому розповсюджується світло, а величина, обернена до цього коефіцієнта,  $1/\alpha$ , показує глибину  $x$ , на якій інтенсивність світла в даному середовищі зменшується в  $e \approx 2,718$  разів. Величину коефіцієнта поглинання прийнято виражати в обернених сантиметрах.

Значення спектрального коефіцієнта поглинання напівпровідників залежить від довжини хвилі випромінювання, а також температури кристалу. Залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі (або частоти) випромінювання називають *спектром поглинання речовини*.

На рис. 3.2 представлено спектри поглинання для напівпровідникових кристалів, що доволі широко використовуються для виробництва фотоелектричних перетворювачів сонячного випромінювання.

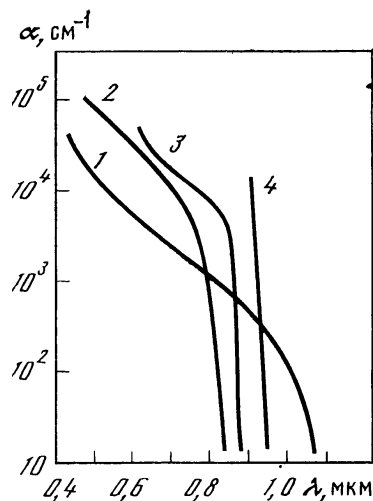


Рисунок 3.2 – Спектри поглинання монокристалів кремнію (1), телуриду кадмію (2), арсеніду галію (3) та фосфіду індію (4) при кімнатній температурі

З рис. 3.2 видно, що зі зменшенням довжини хвилі (збільшенням частоти) випромінювання коефіцієнт поглинання зростає. Зважаючи на зміст коефіцієнта поглинання, це означає, що чим менша довжина хвилі сонячного випромінювання, тим меншою є глибина його проникнення в напівпровідниковий матеріал. Отже, короткохвильове сонячне випромінювання поглинається безпосередньо біля поверхні напівпровідника, а довгохвильове розповсюджується в об'єм кристалу на значні відстані.

## 3.2 Типи напівпровідникових бар'єрних структур

### 3.2.1 Донорні та акцепторні домішки

Концентрацією рівноважних носіїв заряду в напівпровідниках, а отже, й провідністю, можна керувати легуванням кристалу певним типом домішок. Домішки, уведення яких до кристалічної решітки призводить до надлишку в напівпровіднику електронів провідності над дірками називають *донорними*, а сам напівпровідник – напівпровідником *n-типу*. Так, у кремнії, який знаходиться в IV групі Періодичної системи елементів, донорними є домішки атомів фосфору, арсену, стибію, тобто хімічних елементів, що належать до V групи і мають один «зайвий» електрон, не задіяний в утворенні ковалентного зв'язку з атомами кремнію. Цей електрон доволі легко переходить у вільний стан в результаті іонізації атому домішки (рис. 3.3, а), для чого потрібно надати невелику в порівнянні зі значенням забороненої зони енергію іонізації  $\Delta E_d$  (рис. 3.3, б).

Втой же час, уведення певних домішок дозволяє отримати у напівпровідниках перевищення концентрації рівноважних дірок над електронами. Такі домішки прийнято називати *акцепторними*, а відповідні напівпровідники – напівпровідниками *p-типу*. У випадку кремнію акцепторними домішками є атоми з III групи Періодичної системи елементів, такі як алюміній, бор, індій. Утворення насичених ковалентних зв'язків між

акцепторною домішкою та атомами основної речовини потребує захоплення електрона, який з'являється внаслідок розриву ковалентного зв'язку сусідніх атомів. В результаті атом домішки перетворюється у негативно заряджений нерухомий іон (рис. 3.4, а), а атом основної речовини, що віддав електрон, отримує позитивний заряд, тобто, утворюється позитивний носій заряду – дірка. На енергетичній діаграмі (рис. 3.4, б) цей процес відповідає переходу електрона з валентної зони  $E_v$  на акцепторний рівень  $E_a$ , і для здійснення такого переходу необхідна енергія іонізації акцептора  $\Delta E_a$ , що набагато менша за ширину забороненої зони напівпровідника  $E_g$ .

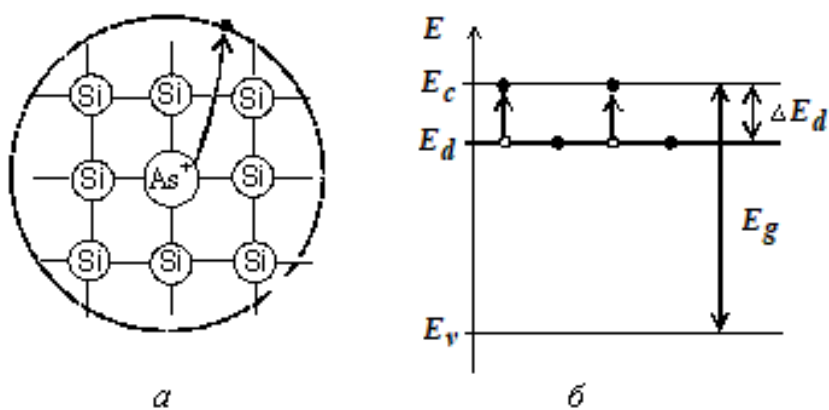


Рисунок 3.3 – Схема утворення вільного електрону в результаті іонізації атому донорної домішки (а) та енергетична діаграма напівпровідника n-типу (б)

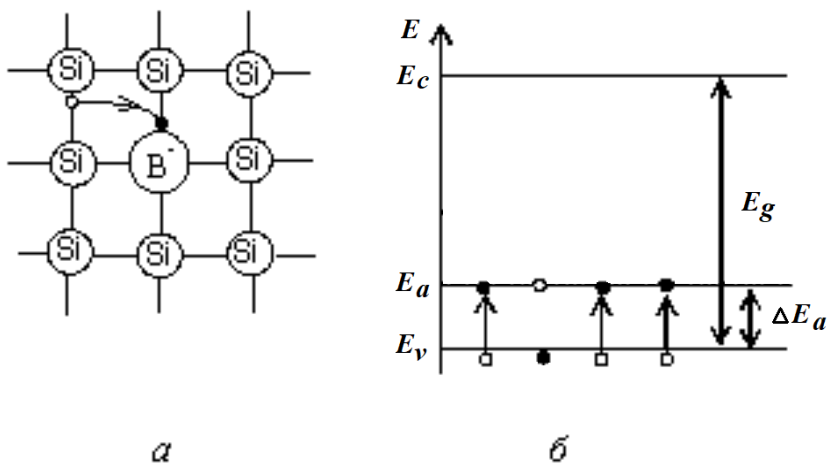


Рисунок 3.4 – Схема утворення дірки (а) та енергетична діаграма напівпровідника p-типу (б)



Внаслідок незначних енергій іонізації донорних та акцепторних домішок фактично всі вони є іонізованими навіть при незначних температурах кристалу. У зв'язку з цим, за звичайних температур провідність напівпровідникових шарів n-типу забезпечується переважно вільними електронами, а шарів p-типу – дірками. Отже, *основними носіями заряду* в напівпровідниках n-типу є електрони, а в напівпровідниках p-типу – дірки. Електрони в напівпровіднику p-типу та дірки в матеріалі n-типу присутні в порівняно невеликій концентрації і є *неосновними носіями заряду*.

### 3.2.2 Утворення та властивості p-n- переходу

При контакті двох напівпровідників з p- та n-типом провідності в них, внаслідок градієнта концентрацій електронів і дірок, виникає дифузійний потік електронів з напівпровідника n-типу в напівпровідник p-типу і, навпаки, потік дірок з p- в n-напівпровідник. Електрони, що перейшли з n-області в p-область, рекомбінують з основними носіями заряду – дірками, що знаходяться поблизу границі розділу. Аналогічно рекомбінують з електронами і дірки при переході з p-області в n-область. В результаті поблизу p-n- переходу практично не залишається вільних носіїв заряду і утворюється подвійний заряджений шар, сформований нерухомими іонами (рис. 3.5, а). Цей збіднений вільними носіями заряду шар, що має низьку провідність, отримав назву *область просторового заряду* (ОПЗ).

Електричне поле області просторового заряду  $E$  перешкоджає подальшому переходу електронів і дірок з однієї області до іншої. Внаслідок цього встановлюється певний рівноважний стан, який може існувати як завгодно довго за умов відсутності зовнішніх впливів.

На рис. 3.5, б зображено енергетичну діаграму p-n- переходу. Поле ОПЗ еквівалентне наявності поблизу границі переходу потенціального бар'єру з висотою, що дорівнює добутку елементарного заряду на *контактну різницю*

потенціалів  $\varphi_k$ .

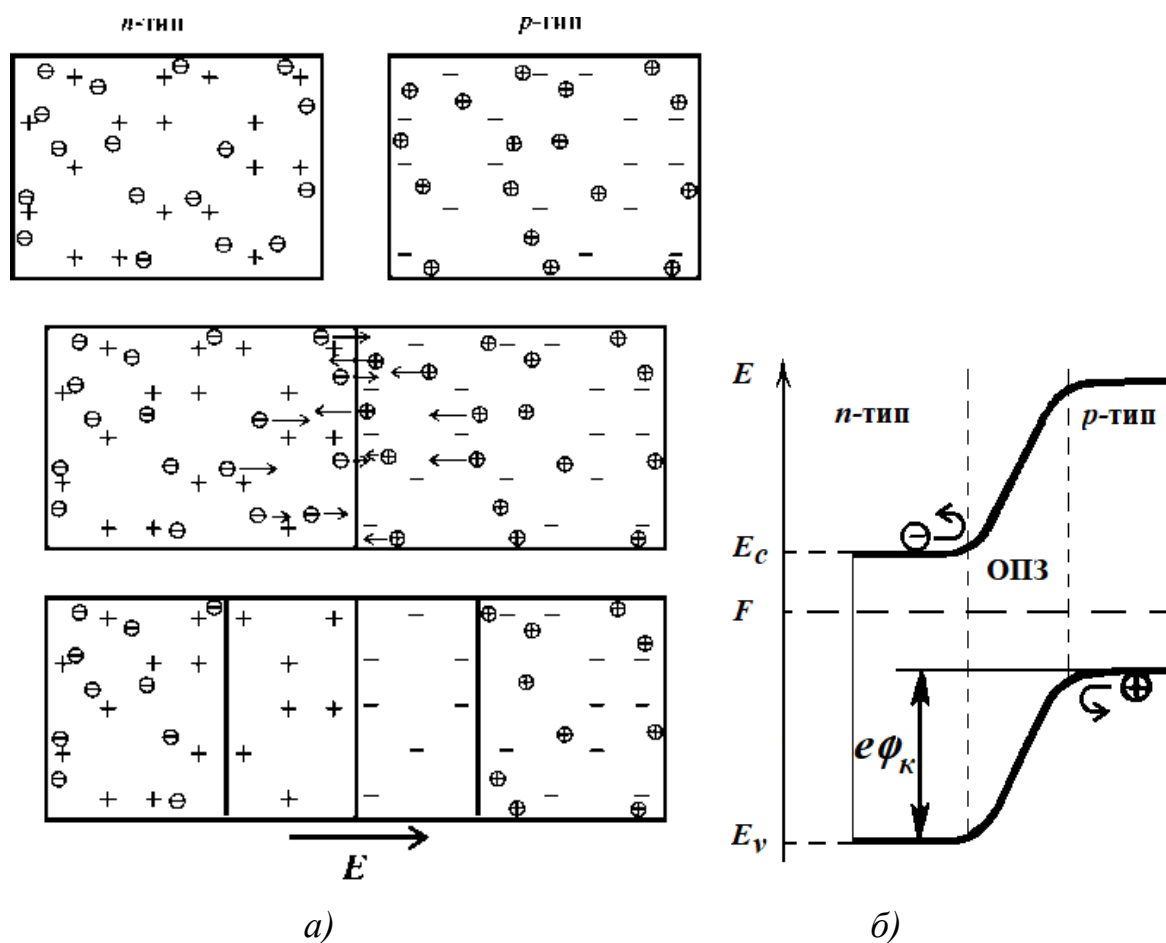


Рисунок 3.5 – Процес утворення (а) та енергетична діаграма (б) р-п-переходу

Енергетичний рівень  $F$  на рис. 3.5, б – це уявний рівень, ймовірність заповнення якого електронами складає 0,5. Цей енергетичний рівень називають *рівнем Фермі*. При температурі абсолютного нуля він чітко розділяє заповнені та не заповнені електронами рівні: всі енергетичні стани з енергією, меншою за енергію рівня Фермі, є заповненими електронами, а вищі – порожні. Видно, що в стані термодинамічної рівноваги енергетичне положення рівня Фермі є спільним для напівпровідників обох типів провідності, які утворюють р-п-перехід.

Висотою потенціального бар'єру  $e\varphi_k$  можна керувати за рахунок подачі на р-п-перехід напруги  $U$  від зовнішнього джерела. Так, в режимі *прямого*

зміщення, коли до n-області прикладається негативний потенціал, а до р-області – позитивний, ширина ОПЗ та її опір зменшуються, а висота потенціального бар'єру знижується на величину, обумовлену прикладеною різницею потенціалів  $U$ . Більшість носіїв заряду стають здатними подолати бар'єр зменшеної висоти, в результаті чого виникає *прямий струм* крізь р-n- перехід.

Навпаки, в режимі *зворотного зміщення*, коли до n-області прикладається позитивний потенціал, а до р-області – негативний, ширина ОПЗ та її опір збільшуються, а висота потенціального бар'єру стає вищою у порівнянні з рівноважним станом р-n- переходу. Це блокує потоки основних носіїв заряду з р- та n-шарів, а отже і струм, через р-n- перехід. Втім, неосновні носії заряду, що присутні в невеликій концентрації в р- та n-областях, безперешкодно рухаються крізь ОПЗ і формують незначний струм, який називають *зворотним струмом* р-n- переходу.

Отже, головною властивістю р-n- переходу є його *випрямляючий ефект* – здатність пропускати значні струми у прямому зміщенні та блокувати проходження електричного струму у режимі зворотного зміщення.

*Вольт-амперна характеристика* (ВАХ) р-n- переходу є залежністю струму  $I$ , що протікає через р-n- перехід, від прикладеної до нього напруги  $U$  (рис. 3.6). Рівняння цієї ВАХ записується у вигляді:

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eU}{AkT}\right) - 1 \right], \quad (3.6)$$

де  $I_0$  – струм насичення діода;  $A$  – параметр ідеальності діода;  $k$  – постійна Больцмана, що становить  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $e$  – елементарний заряд, який дорівнює  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $T$  – абсолютна температура.

Параметр ідеальності  $A$ , що фігурує в рівнянні (3.6), відображає ступінь наближення реального р-n- переходу до ідеального, для якого  $A = 1$ .

Струм насичення діода  $I_0$  визначається лише електрофізичними властивостями напівпровідникових шарів, що формують р-n- перехід, та

температурою. Підвищення температури призводить до збільшення струму насичення внаслідок зростання концентрації вільних носіїв заряду в напівпровіднику в результаті їх теплової генерації (рис. 3.6).

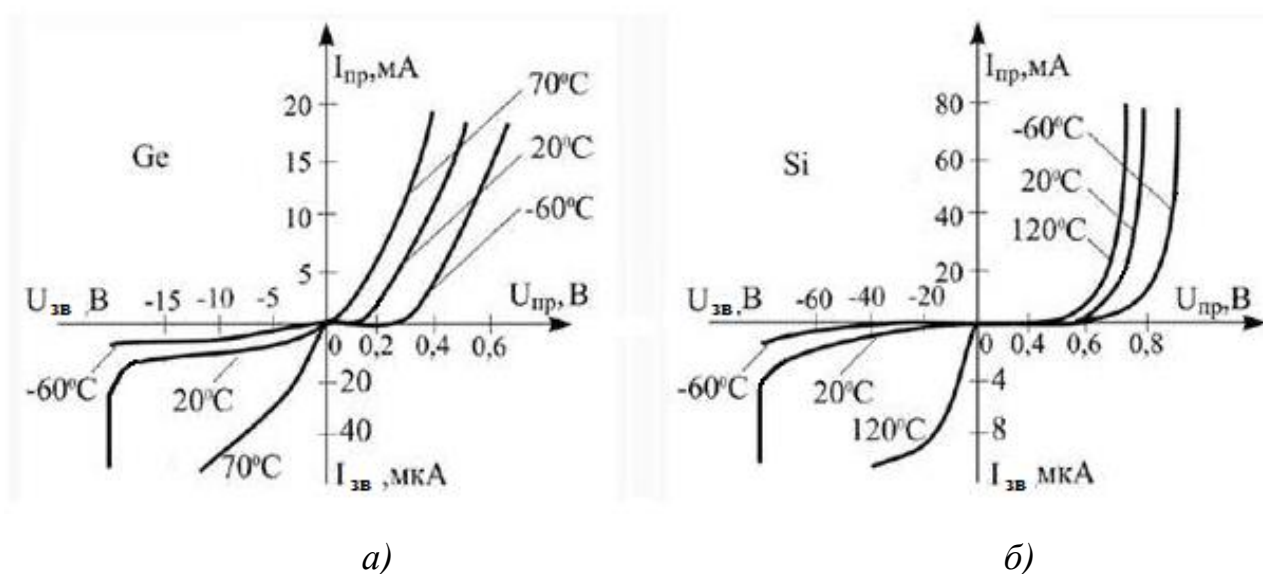


Рисунок 3.6 – Вольт-амперні характеристики германієвого (а) та кремнієвого (б) р-п- переходів

Р-п- перехід є основним типом бар'єру, що застосовується для реалізації фотовольтаїчного ефекту в переважній більшості кристалічних сонячних елементів.

### 3.2.3 Інші типи бар'єрних структур для фотоелектричних перетворювачів

Головна роль потенціального бар'єру, яку він відіграє у фотовольтаїчному ефекті, полягає в просторовому розділенні (сепарації) нерівноважних носіїв заряду з протилежним знаком по різні боки від цього бар'єру, в результаті чого і виникає різниця потенціалів при освітленні напівпровідникової структури. Окрім р-п- переходу, існує низка інших напівпровідникових структур, що утворюють потенціальний бар'єр для носіїв заряду (рис. 3.7), а саме: *гетероперехід, контакт метал – напівпровідник* та

контакт метал – діелектрик – напівпровідник.

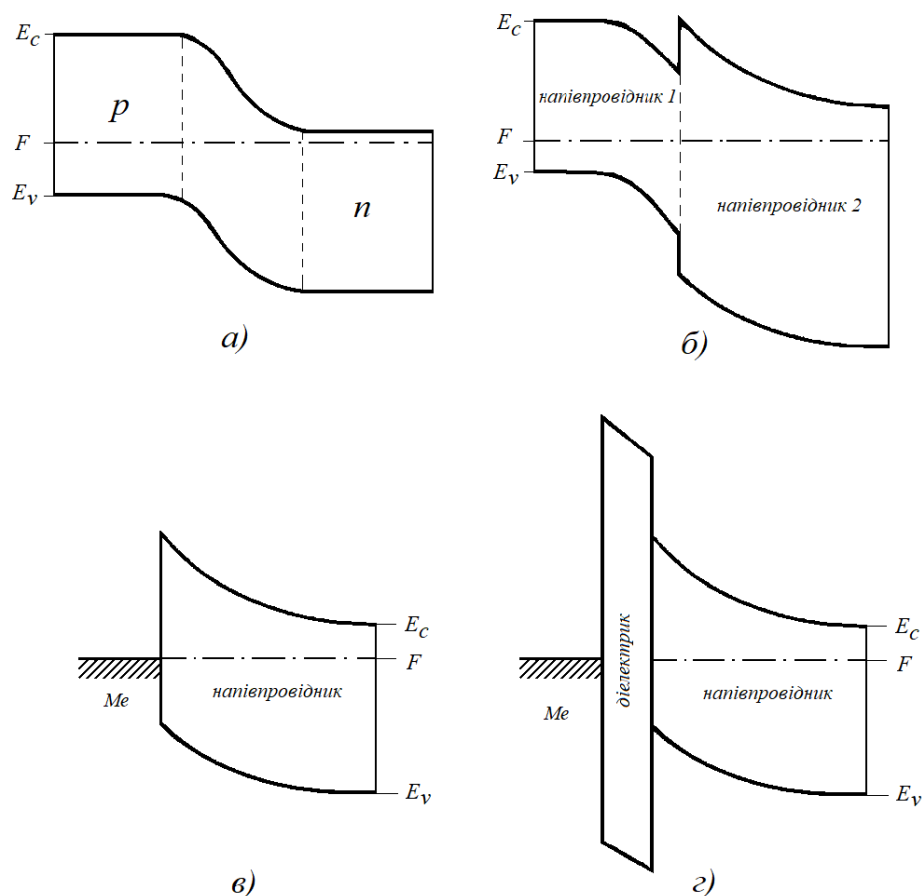


Рисунок 3.7 – Енергетичні діаграми напівпровідникових структур з p-n-переходом (а), на основі гетеропереходу (б), контакту метал – напівпровідник (в) та метал – діелектрик – напівпровідник (г)

Гетероперехід (рис. 3.7, б) являє собою контакт двох різних напівпровідникових матеріалів, які відрізняються за структурними та електрофізичними властивостями, такими як будова кристалічної решітки, ширина забороненої зони, робота виходу електронів, тощо. Параметри потенціального бар'єру, що утворюється на гетерограниці, визначаються властивостями кристалів, які формують гетероперехід, зокрема, концентрацією і типом легуючих домішок. У зв'язку з цим, розрізняють *ізотипні* та *анізотипні* гетеропереходи. До ізотипних відносять гетеропереходи, що утворюються напівпровідниковими матеріалами з однаковим типом провідності. Анізотипні

ж гетеропереходи формуються напівпровідниками з різним типом провідності.

Для створення ФЕП найширше застосовуються анізотипні гетеропереходи, зокрема в таких системах, як AlGaAs – GaAs, CdS – CdTe.

Існують конструкції сонячних елементів, що використовують у якості бар'єрної структури контакт метал – напівпровідник (*бар'єр Шотткі*, рис. 3.7, в) або метал – діелектрик – напівпровідник (*МДН-структура*, рис. 3.7, г). Бар'єр Шотткі утворюється в приконтактному шарі напівпровідника, що межує з металом. Висота бар'єру Шотткі залежить від різниці робіт виходу електронів з металу та напівпровідника. Уведення того шару діелектрика між металом і напівпровідником, тобто створення МДН-структури, дозволяє покращити сепарацію носіїв заряду за рахунок збільшення результуючої висоти потенціального бар'єру.

Бар'єрні структури метал – напівпровідник та метал – діелектрик – напівпровідник широко застосовуються в конструкціях тонкоплівкових сонячних елементів.

### **3.3 Фотовольтаїчний ефект в р-п- переході**

Фотовольтаїчний ефект полягає у виникненні напруги на бар'єрній структурі в результаті її опромінення світлом з енергією фотонів  $h\nu \geq E_g$ . Розглянемо процеси, що призводять до фотовольтаїчного ефекту в напівпровідниковій структурі з р-п- переходом, для випадку *холостого ходу*, коли р- та п-області не замкнені через зовнішнє електричне коло. Вважатимемо, що освітлюється р-шар структури і фотони з енергією  $h\nu \geq E_g$  поглинаються саме у ньому.

Внаслідок фотоактивного поглинання фотонів в р-області в ній відбувається генерація електронно-діркових пар. Вільні електрони і дірки дифундують від місця генерації по об'єму кристалу. Якщо відстань від місця генерації цих носіїв заряду до ОПЗ є меншою або такою, що дорівнює їх *дифузійній довжині*, тобто середній відстані, на яку дифундують носії заряду за

час свого життя, то вони потрапляють під дію поля ОПЗ. Поле ОПЗ не дозволяє подальший рух дірок до n-області, тобто, ОПЗ для дірок, що знаходяться в р-області, є потенціальним бар'єром. В той же час, електрони, які в р-області є неосновними носіями заряду, підхоплюються полем ОПЗ і спрямовуються до n-області, утворюючи потік, що обумовлює *фотострум*  $I_{\phi}$ . В результаті р-область напівпровідникової структури заряджається надлишковим позитивним зарядом, оскільки там накопичуються дірки, а n-область, куди переходять електрони, стає негативно зарядженою, і між цими областями виникає різниця потенціалів, яка в стаціонарних умовах дорівнюватиме *напрузі холостого ходу*  $U_{xx}$  (рис. 3.8).

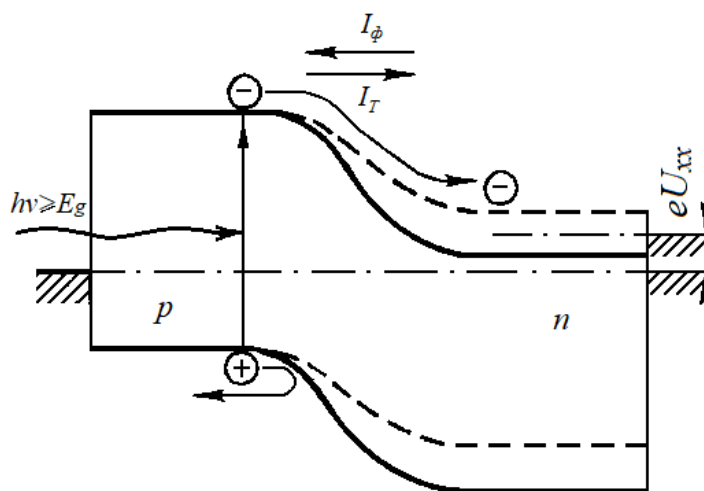


Рисунок 3.8 – Енергетична діаграма освітленого р-п- переходу в режимі холостого ходу

Поява цієї різниці потенціалів між р- та n-областями еквівалентна режиму прямого зміщення р-п- переходу, в результаті чого висота потенціального бар'єру зменшується в порівнянні з рівноважним станом, і виникає зустрічний до фотоструму потік носіїв заряду, що формує струм прямозмщеного переходу  $I_T$ , величина якого визначається у відповідності до виразу (3.6). Оскільки зовнішнє коло є розімкненим, то результуючий струм через р-п- перехід має дорівнювати нулю. Це означає, що в режимі холостого

ходу фотострум  $I_\phi$  компенсується *темновим* струмом прямозмщеного переходу  $I_T$ :

$$I_\phi = I_T. \quad (3.7)$$

Застосовуючи формулу (3.6) для темного струму р-п- переходу, що виникає в результаті прямого зміщення напівпровідникової структури напругою  $U_{xx}$ , вираз (3.7) можна переписати у наступному вигляді:

$$I_\phi = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eU_{xx}}{AkT}\right) - 1 \right], \quad (3.8)$$

Виразивши з (3.8) напругу холостого ходу та враховуючи, що  $I_\phi \gg I_0$ , отримуємо:

$$U_{xx} = \frac{AkT}{e} \ln\left(\frac{I_\phi}{I_0} + 1\right) \approx \frac{AkT}{e} \ln\left(\frac{I_\phi}{I_0}\right). \quad (3.9)$$

Отже, напруга холостого ходу логарифмічно залежить від величини фотоструму.

Енергетична діаграма освітленого р-п- переходу, що перебуває в режимі *короткого замикання*, показана на рис. 3.9.

На відміну від холостого ходу, в режимі короткого замикання р- та п- області напівпровідникової структури перебувають під однаковим потенціалом за рахунок їх з'єднання зовнішнім провідником, а отже, різниця потенціалів на р-п- переході є нульовою. В цьому випадку енергетична діаграма р-п- переходу не відрізняється від тієї, що відповідає рівноважному стану. Втім, через р-п-структуру та зовнішній провідник протікає струм  $I_\phi$ , обумовлений генерацією електронно-діркових пар в освітленій р-області.



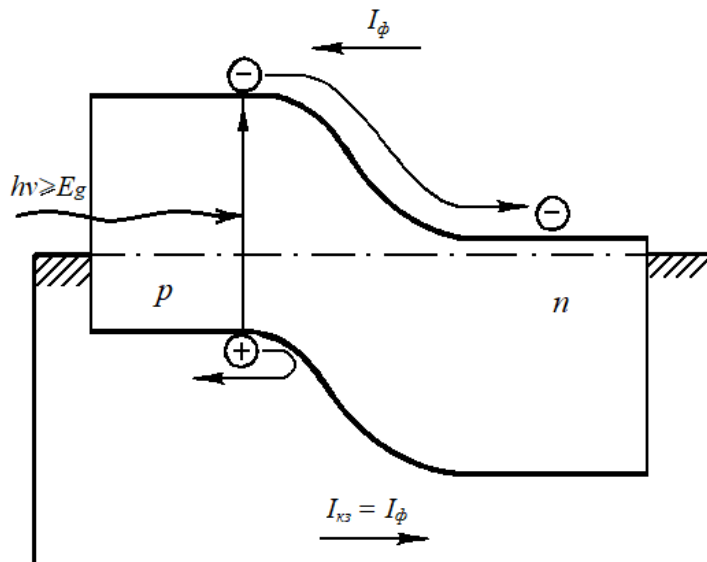


Рисунок 3.9 – Енергетична діаграма освітленого р-п- переходу в режимі короткого замикання

Електрони, генеровані світлом в р-шарі, дифундують до ОПЗ, захоплюються її полем і потрапляють до п-області. В п-області виникає рух електронів до зовнішнього металевого контакту, їх перетікання у зовнішній провідник і потрапляння до контакту з р-областю. На границі контакту з р-областю відбувається рекомбінація електронів, що підійшли сюди через зовнішнє коло, з фотогенерованими дірками. Цей потік генерованих світлом носіїв обумовлює фотострум  $I_\phi$ , який в ідеальному сонячному елементі співпадає з величиною струму короткого замикання  $I_{кз}$ .

Величина фотоструму  $I_\phi$  пропорційна кількості фотогенерованих носіїв, що пройшли через р-п- структуру в одиницю часу. Якщо кожен поглинений квант світла призводить до генерації однієї електронно-діркової пари, то фотострум буде дорівнювати:

$$I_\phi = e \frac{P_0}{h\nu}, \quad (3.10)$$

де  $P_0$  – потужність поглинутого випромінювання.

Оскільки струм короткого замикання  $I_{кз}$  практично співпадає зі

значенням фотоструму, то, спираючись на вираз (3.10), можна зробити висновок, що струм короткого замикання сонячного елемента прямо пропорційний величині світлового потоку:

$$I_{\text{кз}} \sim P_0. \quad (3.11)$$

У випадку, коли освітлений р-п- перехід підключено до опору навантаження  $0 < R_H < \infty$ , різниця потенціалів на р-п- структурі  $U$  прийме проміжне значення між 0 (режим короткого замикання,  $R_H = 0$ ) та напругою холостого ходу  $U_{\text{хх}}$  ( $R_H = \infty$ ). Фотострум  $I_\phi$  вже не буде повністю компенсуватися темновим струмом прямозмщеного р-п- переходу  $I_T$ , як у режимі холостого ходу, оскільки висота потенціального бар'єру буде більшою, а темновий струм – меншим (рис. 3.10). В результаті у колі р-п- структури виникне результуючий струм  $I$ , що дорівнюватиме різниці фотоструму  $I_\phi$  та темнового струму  $I_T$ :

$$I = I_\phi - I_T. \quad (3.12)$$

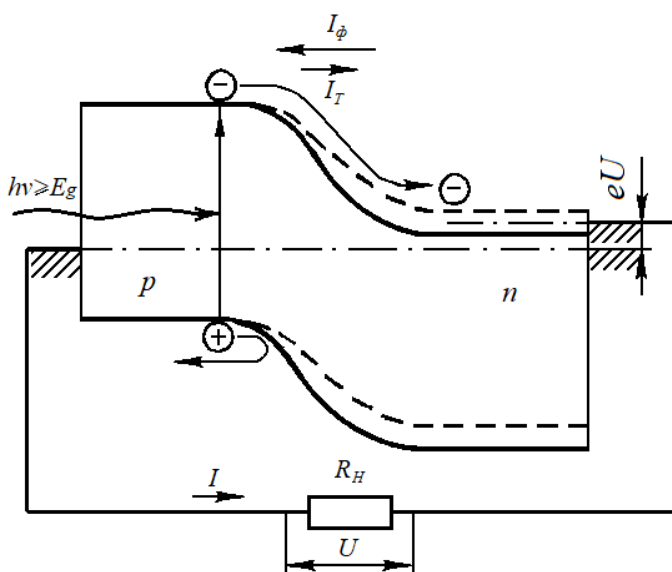


Рисунок 3.10 – Енергетична діаграма освітленого р-п- переходу при роботі на опір навантаження  $R_H$

Підставляючи в (3.12) вираз для темнового струму (3.6), отримуємо рівняння, що описує *вольт-амперну характеристику освітленого p-n- переходу*:

$$I = I_{\phi} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{eU}{AkT}\right) - 1 \right]. \quad (3.13)$$

### 3.4 Вольт-амперна характеристика сонячного елемента

Рівняння (3.13) описує *світлову ВАХ ідеального сонячного елемента*, тобто такого ФЕП, для якого вся напруга  $U$  прикладена лише до ОПЗ p-n-переходу, а падіння напруги на опорі напівпровідникових шарів, металевих контактів, тощо, відсутнє.

Світлова ВАХ ідеального сонячного елемента, побудована у відповідності до рівняння (3.13) у вигляді залежності струму  $I$  від напруги  $U$ , схематично представлена на рис. 3.11 суцільною кривою.

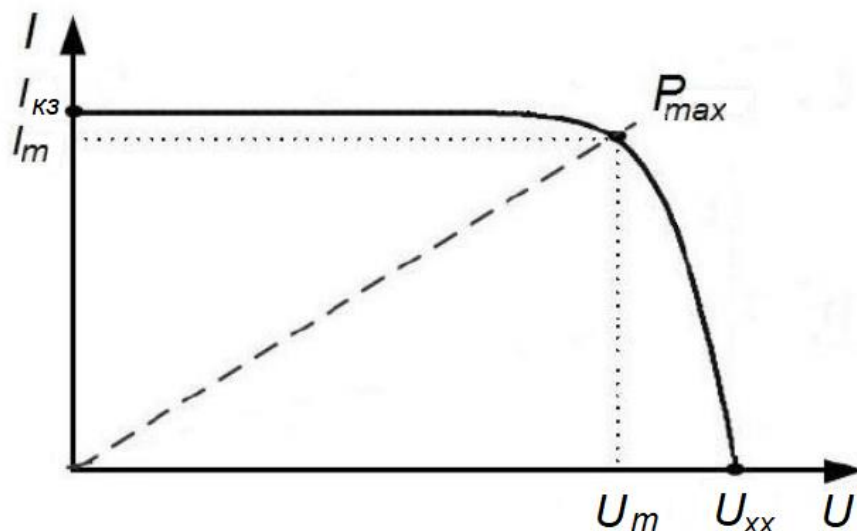


Рисунок 3.11 – Графік вольт-амперної характеристики освітленого p-n-переходу

Характерними точками цієї ВАХ є *струм короткого замикання*  $I_{кз}$  та

напруга холостого ходу  $U_{xx}$ . Струм  $I$  та напруга  $U$  у робочій точці сонячного елемента визначаються точкою перетину його світлової ВАХ з ВАХ опору навантаження  $R_n$  (пунктирна пряма лінія на рис. 3.11). При певному опорі навантаження  $R_n$  значення струму та напруги в робочій точці будуть такими, що електрична потужність, яка є їх добутком, прийме максимальне значення:

$$P_{max} = I_m U_m. \quad (3.14)$$

Значення  $P_{max}$  прийнято називати *максимальною потужністю сонячного елемента*, а значення струму  $I_m$  та напруги  $U_m$  – відповідно *струмом та напругою в точці максимальної потужності*. Опір навантаження  $R_n$ , при якому сонячний елемент генерує максимальну електричну потужність  $P_{max}$ , називають *оптимальним опором навантаження*  $R_{opt}$ :

$$R_{opt} = \frac{U_m}{I_m}. \quad (3.15)$$

Параметром, що описує форму світлової ВАХ сонячного елемента, є *фактор заповнення ВАХ*, який позначають  $FF$ . Він дорівнює відношенню максимальної потужності ФЕП до добутку струму короткого замикання та напруги холостого ходу:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{кз} U_{xx}} = \frac{I_m U_m}{I_{кз} U_{xx}}. \quad (3.16)$$

Як видно з рівняння (3.16), фактор заповнення наближається до одиниці для такого сонячного елемента, у якого  $I_m \rightarrow I_{кз}$ , а  $U_m \rightarrow U_{xx}$ , тобто, форма світлової ВАХ якого близька до прямокутної. У реальних ФЕП, в яких мають місце електричні втрати,  $FF < 1$ . Якість сонячного елемента є тим вищою, чим більше значення фактору заповнення  $FF$ , тобто, чим ближча форма його

світлової ВАХ до ідеальної прямокутної.

Значення струму і напруги ФЕП суттєво залежать від таких зовнішніх чинників, як інтенсивність світлового потоку та температура, як це слідує, зокрема, з рівнянь (3.9), (3.10) та (3.13). Отже, світлова ВАХ сонячного елемента, як і його параметри, визначаються поточним рівнем освітлення та температурою (рис. 3.12).

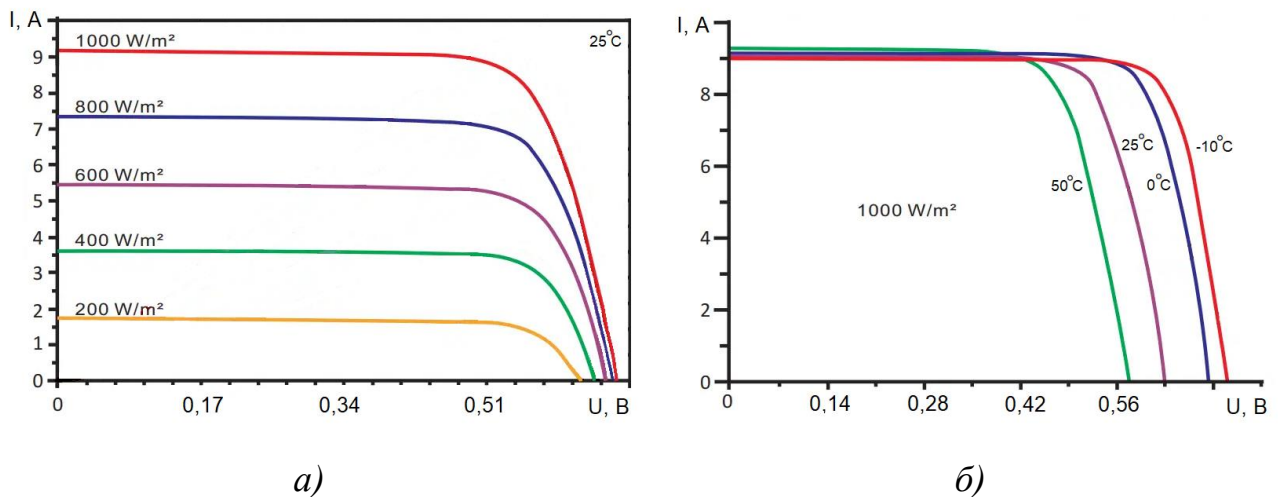


Рисунок 3.12 – Світлові вольт-амперні характеристики сонячного елемента при різних інтенсивностях світлового потоку (а) та температурах (б)

### 3.5 Еквівалентні схеми сонячного елемента

#### 3.5.1 Ідеальний сонячний елемент

Рівняння світлової ВАХ ідеального сонячного елемента (3.13) відповідає еквівалентній електричній схемі, зображеній на рис. 3.13.

Така еквівалентна схема містить джерело незалежного від напруги на р-п-переході фотоструму  $I_\phi$ . Діод  $VD$  моделює неосвітлений р-п-перехід, що знаходиться під напругою прямого зміщення  $U$ . Струм  $I_\phi$  розподіляється між діодом  $VD$  та навантаженням  $R_n$ : через діод протікає струм прямозмщеного р-п-переходу  $I_T$ , а через навантаження – струм  $I$ , який є різницею між фотострумом та струмом  $I_T$ .

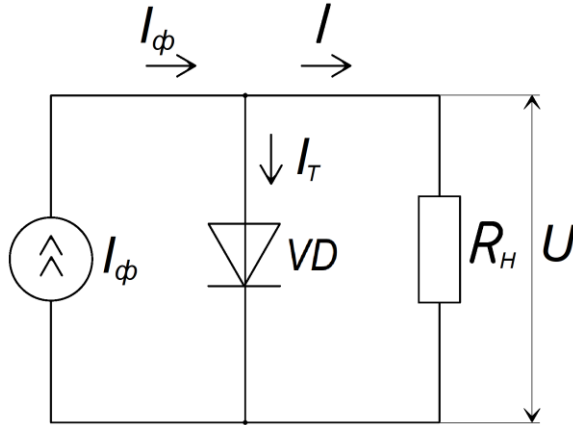


Рисунок 3.13 – Еквівалентна схема ідеального сонячного елемента

### 3.5.2 Однодіодна еквівалентна схема реального сонячного елемента

Еквівалентна схема ідеального сонячного елемента, як і ВАХ освітленого р-п- переходу, не враховує електричні втрати, що мають місце у реальних ФЕП. Для врахування цих втрат, а отже, для отримання виразу, що більш коректно описує реальні світлові ВАХ сонячних елементів, до еквівалентної схеми на рис. 3.13 потрібно внести корективи, увівши два додаткових опори – внутрішній послідовний опір  $R_s$  та шунтуючий опір  $R_{sh}$  (рис. 3.14).

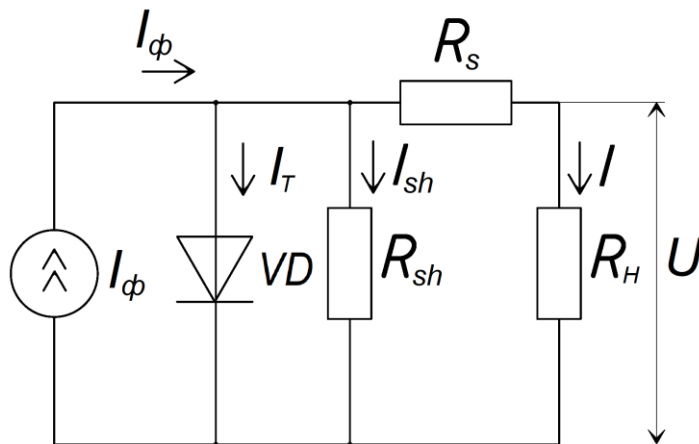


Рисунок 3.14 – Однодіодна еквівалентна схема реального сонячного елемента

Послідовний опір  $R_s$  відображає наявність в реальному сонячному елементі ненульових опорів р- та n-областей, контактних областей на межі напівпровідника і металу, а також опору матеріалів, з яких виготовлено контакти. Шунтуючий опір  $R_{sh}$ , який включено паралельно діоду  $VD$ , пов'язаний з витоками струму  $I_{sh}$  повз р-n- перехід, зокрема, з поверхневими витоками.

Світлова ВАХ реального сонячного елемента у відповідності до однодіодної еквівалентної схеми, представленої на рис. 3.14, запишеться у вигляді:

$$I = I_\phi - I_0 \left[ \exp\left(\frac{e(U + IR_s)}{AkT}\right) - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}}. \quad (3.17)$$

Вираз (3.17) отримав назву *рівняння світлової ВАХ сонячного елемента в однодіодній моделі*.

### 3.5.3 Дводіодна еквівалентна схема реального сонячного елемента

Рівняння (3.17) здатне доволі коректно описати реальні ВАХ для більшості кристалічних сонячних елементів. Втім, для низки ФЕП, особливо тих, що виготовлені на основі аморфних напівпровідників, спостерігається доволі сильна залежність механізму протікання струму через р-n- перехід від рівня напруги: при низьких напругах струм має переважно рекомбінаційний характер, а при високих – змінюється на дифузійний. В цьому випадку застосування рівняння (3.17) для опису ВАХ сонячних елементів може призводити до значних розбіжностей між розрахунковими та експериментальними результатами, і для більш точного моделювання потрібно застосувати *дводіодну модель* ФЕП, яка відповідає еквівалентній схемі, представленої на рис. 3.15.

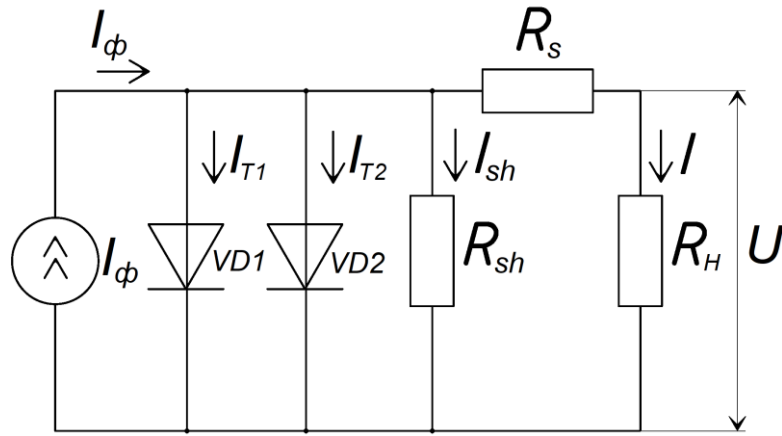


Рисунок 3.15 – Дводіодна еквівалентна схема реального сонячного елемента

Світлова ВАХ сонячного елемента у відповідності до дводіодної еквівалентної схеми записується у вигляді:

$$I = I_{\phi} - I_{01} \left[ \exp\left(\frac{e(U + IR_s)}{A_1 kT}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp\left(\frac{e(U + IR_s)}{A_2 kT}\right) - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}}, \quad (3.18)$$

де  $I_{01}$  та  $I_{02}$  – струми насичення першого та другого діоду;  $A_1$  та  $A_2$  – параметри ідеальності першого та другого діоду, відповідно.

Рівняння ВАХ сонячного елемента в дводіодній моделі дозволяє більш точно описати реальні світлові ВАХ, ніж одnodіодна. Втім, практичне застосування рівняння (3.18) вимагає більшої кількості вхідних параметрів для опису ВАХ. Зокрема, крім значень послідовного та шунтуючого опору мають бути відомими струми насичення та параметри ідеальності для обох діодів. Потрібно зазначити, що в більшості випадків прийнятна точність моделювання світлових ВАХ реальних ФЕП забезпечується при  $A_1 = 1$  та  $A_2 = 2$ , що еквівалентно припущенню про дифузійний механізм протікання струму через перший діод та рекомбінаційний – через другий.



### 3.5.4 Вплив внутрішнього послідовного та шунтуючого опорів на вольт-амперну характеристику сонячних елементів

Наявність внутрішнього послідовного та шунтуючого опорів суттєво впливає на світлові ВАХ реальних сонячних елементів. Вплив цих компонентів на ВАХ наочно показано на рис. 3.16.

Як видно з аналізу рис. 3.16, а, послідовний опір  $R_s$  практично не впливає на напругу холостого ходу, але позначається на величині струму короткого замикання і суттєво – на формі світлової ВАХ: зі збільшенням  $R_s$  фактор заповнення ВАХ зменшується, що призводить до зміщення положення точки максимальної потужності в бік менших значень струму та напруги. Помітне зменшення струму короткого замикання відносно величини фотоструму може відбуватися вже при відносно невеликих значеннях внутрішнього послідовного опору, оскільки навіть при  $R_n = 0$  діод  $VD$  буде знаходитись в режимі прямого зміщення за рахунок наявності падіння напруги  $IR_s$  на послідовному опорі (рис. 3.14), а отже, струм у зовнішньому колі  $I_{кз}$  буде меншим за  $I_\phi$ .

При високих інтенсивностях світлового потоку вплив внутрішнього послідовного опору на параметри ФЕП стає більш помітним.

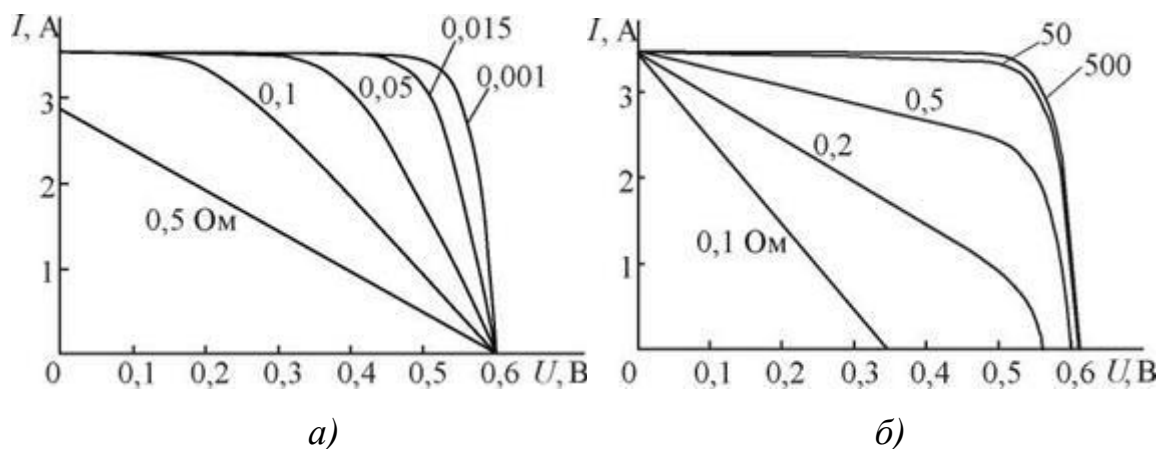


Рисунок 3.16 – Світлові ВАХ кремнієвого сонячного елемента при різних значеннях внутрішнього послідовного (а) та шунтуючого (б) опорів

Щодо шунтуючого опору  $R_{sh}$ , то на струм короткого замикання він практично не впливає, але має суттєвий вплив на величину напруги холостого ходу (рис. 3.16, б): зі зменшенням шунтуючого опору напруга холостого ходу теж зменшується.

В ФЕП, що використовуються на практиці, шунтуючий опір, як правило, становить сотні і навіть тисячі Ом і тому практично не впливає на роботу сонячного елемента, особливо при високих інтенсивностях світлового потоку. Більш суттєве значення величина шунтуючого опору має при малих інтенсивностях світла.

При розробці конструкцій сонячних елементів намагаються досягти максимально можливого значення шунтуючого опору і мінімізувати внутрішній послідовний опір.

### **3.6 Основні параметри сонячних елементів та їх залежність від зовнішніх факторів**

Сонячні елементи характеризуються низкою параметрів, основними з яких є *струм короткого замикання*  $I_{кз}$ , *напруга холостого ходу*  $U_{хх}$ , *максимальна потужність*  $P_{max}$ , *струм*  $I_m$  та *напруга*  $U_m$  *в точці максимальної потужності*, *фактор заповнення ВАХ*  $FF$ , *ККД* або *ефективність*  $\eta$ . Всі ці параметри визначають з аналізу світлових ВАХ, що вимірюють експериментально при певних зовнішніх умовах. Значення основних параметрів ФЕП залежать від інтенсивності світлового потоку, а також від температури сонячного елемента під час вимірювань.

#### **3.6.1 Струм короткого замикання**

Струм короткого замикання  $I_{кз}$  – максимальне значення струму, що генерує сонячний елемент при заданому рівні освітленості та температурі за умови нульового опору навантаження. Значення  $I_{кз}$  пропорційне до площі

приймальної поверхні сонячного елемента і лінійно зростає зі збільшенням інтенсивності світла (в певному діапазоні світлових потоків) та температури.

Струм короткого замикання пропорційний до потужності світлового потоку  $P_r$ , що надходить на поверхню сонячного елемента:

$$I_{кз P} = I_{кз P0} \frac{P_r}{P_{r0}}, \quad (3.19)$$

де  $I_{кз P0}$  – значення струму короткого замикання при початковій потужності потоку випромінювання  $P_{r0}$ .

Варто зазначити, що лінійна залежність (3.19) є справедливою при порівняно незначних потоках випромінювання, а при високих ступенях концентрації світлового потоку може спостерігатися надлінійна ділянка, пов'язана як зі збільшенням температури ФЕП, так і з насиченням каналів рекомбінації в об'ємі напівпровідникової структури.

Залежність струму короткого замикання від температури характеризують *температурним коефіцієнтом струму*  $\alpha_I$ , який показує відносну зміну струму при збільшенні температури на 1 градус:

$$\alpha_I = \frac{1}{I} \frac{dI}{dT}, \quad (3.20)$$

Температурна залежність струму короткого замикання описується наступним рівнянням:

$$I_{кз T} = I_{кз T0} [1 + \alpha_I (T - T_0)], \quad (3.21)$$

де  $I_{кз T0}$  – значення струму короткого замикання при початковій температурі сонячного елемента  $T_0$ .

Температурний коефіцієнт струму  $\alpha_I$  є позитивною величиною.

### 3.6.2 Напруга холостого ходу

Напруга холостого ходу  $U_{xx}$  – це максимальне значення напруги, що генерує сонячний елемент при заданому рівні освітленості та температурі за умови нескінченно великого опору навантаження, тобто при розімкненому зовнішньому колі.

Значення  $U_{xx}$  зростає зі збільшенням потужності світлового потоку  $P_r$ , приблизно за логарифмічним законом:

$$U_{xx p} \approx U_{xx p0} + \frac{AkT}{e} \ln\left(\frac{P_r}{P_{r0}}\right). \quad (3.22)$$

де  $U_{xx p0}$  – значення напруги холостого ходу при початковій потужності потоку випромінювання  $P_{r0}$ .

Температурна залежність напруги холостого ходу є лінійною:

$$U_{xx T} = U_{xx T0} [1 + \alpha_U (T - T_0)], \quad (3.23)$$

де  $U_{xx T0}$  – значення напруги холостого ходу при початковій температурі сонячного елемента  $T_0$ ;  $\alpha_U$  – температурний коефіцієнт напруги.

Оскільки температурний коефіцієнт напруги  $\alpha_U$  є величиною негативною, то з підвищенням температури напруга холостого ходу зменшується.

### 3.6.3 Максимальна потужність

Максимальна потужність  $P_{max}$  – це максимальне значення електричної потужності, що генерується сонячним елементом при заданому рівні освітленості та температурі за умов оптимального опору навантаження  $R_{opt}$ .

Для ідеального сонячного елемента залежність максимальної електричної потужності від потужності світлового потоку мала б бути практично лінійною. Втім, наявність втрат в реальних ФЕП призводить до сублінійного характеру цієї залежності, особливо при високих інтенсивностях світлового потоку.

Щодо температурної залежності максимальної електричної потужності сонячного елемента, то відбувається лінійне зменшення  $P_{max}$  зі збільшенням температури:

$$P_{maxT} = P_{maxT_0} [1 + \alpha_P (T - T_0)], \quad (3.24)$$

де  $P_{maxT_0}$  – значення максимальної потужності при початковій температурі сонячного елемента  $T_0$ ;  $\alpha_P$  – температурний коефіцієнт потужності.

Коефіцієнт  $\alpha_P$  в рівнянні (3.24) є величиною негативною. Це обумовлено тим, що при підвищенні температури сонячного елемента швидкість зменшення напруги перевищує швидкість зростання струму, в результаті чого потужність ФЕП зменшується.

#### 3.6.4 Струм та напруга в точці максимальної потужності

Струм в точці максимальної потужності або *номінальний струм*  $I_m$  – струм в колі сонячного елемента, при якому забезпечується його максимальна потужність.

Напруга в точці максимальної потужності або *номінальна напруга*  $U_m$  – напруга на сонячному елементі, при якій забезпечується максимальна електрична потужність.

Номінальні значення струму  $I_m$  та напруги  $U_m$  пов'язані з максимальною електричною потужністю виразом (3.14):

$$P_{max} = I_m U_m.$$

Збільшення інтенсивності світлового потоку призводить до підвищення номінальних значень напруги і струму сонячного елемента.

### 3.6.5 Фактор заповнення вольт-амперної характеристики

Фактор заповнення ВАХ  $FF$  є відношенням максимальної електричної потужності сонячного елемента до добутку його струму короткого замикання і напруги холостого ходу.

Величина  $FF$  визначається у відповідності з формулою (3.16):

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{кз} U_{хх}}.$$

Фактор заповнення ВАХ характеризує досконалість сонячних елементів: чим більше значення  $FF$ , тим ближча форма реальної світлової ВАХ до ідеальної прямокутної (рис. 3.16), а отже, тим меншими є втрати потужності в сонячному елементі і тим вищою є його ефективність.

На величину фактора заповнення, головним чином, впливає температура. Зі збільшенням температури сонячного елемента значення  $FF$  зменшується і форма світлової ВАХ «спрямляється», наближаючись до прямої лінії.

Щодо інтенсивності світлового потоку, то цей чинник має переважний вплив при високих потужностях опромінення, коли відбувається перерозподіл втрат в напівпровідниковій структурі, викликаний значною концентрацією генерованих світлом нерівноважних носіїв заряду. Як правило, зі збільшенням потужності світлового потоку фактор заповнення спочатку повільно зростає у зв'язку з насиченням каналів рекомбінації вільних носіїв, виходить на максимум, а потім починає стрімко спадати, що, головним чином, пов'язано зі

збільшенням електричних втрат на внутрішньому послідовному опорі сонячного елемента по мірі зростання струму в напівпровідниковій структурі.

### 3.6.6 Ефективність сонячного елемента

Ефективність або ККД сонячного елемента  $\eta$  – це відношення максимальної потужності ФЕП до потужності потоку сонячного випромінювання  $P_r$ , що надходить на його приймальну поверхню:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_r} = \frac{I_{кз} U_{xx} FF}{P_r} = \frac{I_{кз} U_{xx} FF}{p_{0r} S}, \quad (3.25)$$

де  $p_{0r}$  – густина потужності випромінювання;  $S$  – площа приймальної поверхні сонячного елемента.

Як і у випадку з фактором заповнення, існує таке значення світлового потоку, при якому сонячний елемент демонструє максимальну ефективність.

Залежність ефективності ФЕП від температури повністю визначається температурною залежністю його максимальної електричної потужності, і з врахуванням виразів (3.24) та (3.25) може бути записана у наступному вигляді:

$$\eta_T = \frac{P_{maxT}}{P_r} = \frac{P_{maxT_0} [1 + \alpha_p (T - T_0)]}{P_r} = \eta_0 [1 + \alpha_p (T - T_0)], \quad (3.26)$$

де  $\eta_0$  – значення ККД при початковій температурі  $T_0$ .

Зважаючи на негативні значення температурного коефіцієнту потужності  $\alpha_p$ , з підвищенням температури ККД сонячних елементів зменшується.

### 3.7 Спектр fotocутливості сонячних елементів

Під *спектром fotocутливості* сонячного елемента розуміють залежність коефіцієнту збирання нерівноважних носіїв заряду від довжини хвилі падаючого випромінювання.

*Коефіцієнт збирання  $Q$*  – це відношення кількості носіїв заряду, які розділилися бар'єром напівпровідникової структури, до загальної кількості електронно-діркових пар, утворених в результаті поглинання світла з довжиною хвилі  $\lambda$ . Він показує внесок монохроматичного світла з даною довжиною хвилі  $\lambda$  у величину фотоструму сонячного елемента.

Характерною особливістю спектру fotocутливості сонячних елементів є наявність максимуму при певній довжині хвилі (рис. 3.17). Положення цього максимуму визначається напівпровідниковим матеріалом і особливостями конструкції ФЕП. Так, для сонячних елементів на основі кристалічного кремнію максимум спектральної чутливості, зазвичай, припадає на діапазон довжин хвиль  $0,8 \div 0,9$  мкм, а на основі арсеніду галію – на діапазон  $0,7 \div 0,8$  мкм.

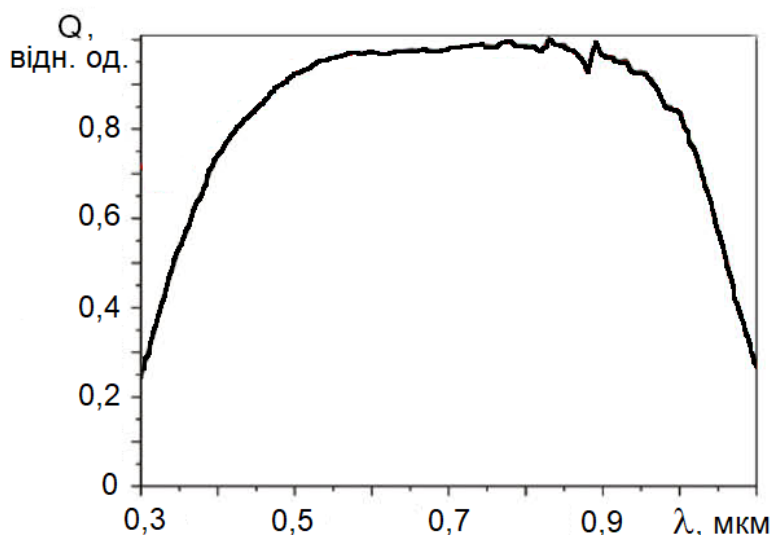


Рисунок 3.17 – Спектр fotocутливості сонячного елемента на основі кристалічного кремнію



Наявність максимуму на спектрі fotocутливості обумовлена тим, що світло з різними довжинами хвилі поглинається в напівпровіднику на різній глибині: чим менша довжина хвилі, тим менша глибина проникнення світла у напівпровідник. В результаті цього нерівноважні електронно-діркові пари генеруються на різній відстані від ОПЗ. Якщо за час свого життя генеровані світлом носії заряду встигають дістатись ОПЗ, то вони будуть розділені бар'єрною структурою (рис. 3.18, переходи за участю фотонів  $h\nu_3$  та  $h\nu_4$ ), якщо ж ні, то відбудеться їх *рекомбінація в об'ємі* напівпровідника і вони не прийматимуть участі у фотовольтаїчному ефекті (рис. 3.18, переходи за участю фотонів  $h\nu_2$  та  $h\nu_5$ ). Таким чином, внесок у фотовольтаїчний ефект роблять лише ті носії заряду, які генеруються на відстані від ОПЗ, що не перевищує дифузійної довжини  $L$ .

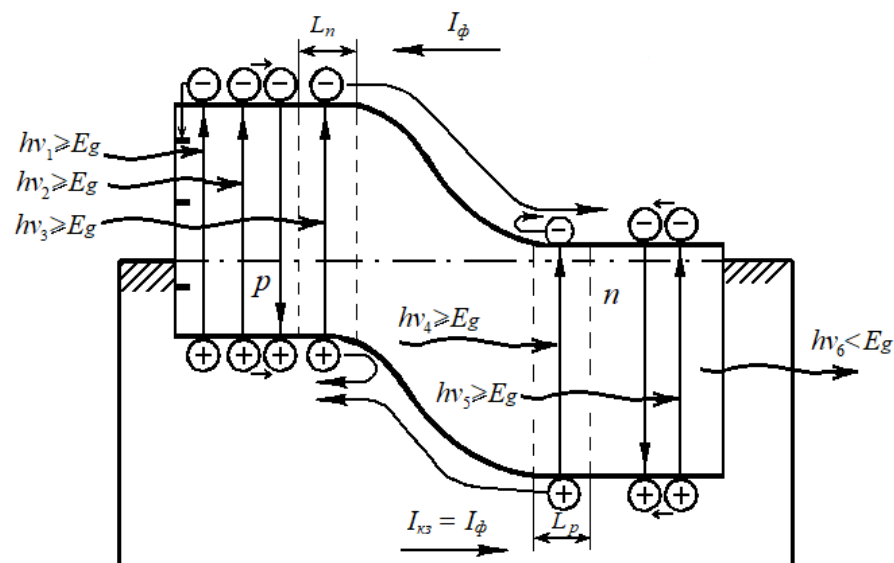


Рисунок 3.18 – Генерація електронно-діркових пар при поглинанні фотонів з різною енергією:  $h\nu_1 > h\nu_2 > h\nu_3 > h\nu_4 > h\nu_5 > h\nu_6$  (довжини хвиль випромінювання  $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3 < \lambda_4 < \lambda_5 < \lambda_6$ )

Короткохвильове випромінювання поглинається поблизу поверхні напівпровідникової структури, де доволі сильним є вплив поверхневих станів, які є наслідком ненасиченості хімічних зв'язків атомів поверхні кристалу. Ці

поверхневі стани здатні інтенсивно захоплювати вільні носії заряду, призводячи до, так званої, *поверхневої рекомбінації*. Отже, на спектральну чутливість ФЕП в короткохвильовому діапазоні світла буде суттєво впливати поверхнева рекомбінація (рис. 3.18, перехід за участю фотона  $h\nu_1$ ).

По мірі збільшення довжини хвилі область генерації нерівноважних носіїв заряду буде віддалятися від поверхні, вплив поверхневих станів зменшуватиметься, і в той же час, вільні електрони та дірки будуть виникати ближче до ОПЗ (рис. 3.18, переходи за участю фотонів  $h\nu_2$  та  $h\nu_3$ ), в результаті чого ймовірність їх сепарації бар'єром підвищуватиметься, а фотострум зростатиме. Для певного діапазону довжин хвиль область поглинання світла, а отже, і генерації електронно-діркових пар, буде припадати безпосередньо на ОПЗ – носії заряду майже миттєво з ймовірністю 100% розділяться полем ОПЗ, а спектр фоточутливості виходить на максимум.

Подальше збільшення довжини хвилі випромінювання віддалятиме область генерації носіїв заряду від ОПЗ (рис. 3.18, переходи за участю фотонів  $h\nu_4$  та  $h\nu_5$ ) і фоточутливість зменшуватиметься, аж поки не буде досягнуто межі поглинання, обумовленої шириною забороненої зони напівпровідника. Якщо довжина хвилі світла стане такою, що енергія фотону буде меншою за ширину забороненої зони напівпровідника, то фоточутливість сонячного елемента стане нульовою, оскільки таке випромінювання проходить крізь кристал без поглинання (рис. 3.18, фотон  $h\nu_6$ ).

На спектр фоточутливості сонячних елементів впливає температура, що обумовлено, головним чином, температурною залежністю ширини забороненої зони напівпровідника. Оскільки ширина забороненої зони напівпровідників з підвищенням температури зменшується, то довгохвильова границя фоточутливості ФЕП зміщується в область більших довжин хвиль. Положення ж короткохвильового краю визначається, головним чином, товщиною фронтального шару бар'єрної структури та інтенсивністю рекомбінаційних процесів за участю поверхневих станів.

### 3.8 Втрати в сонячних елементах

Енергетичні втрати в ФЕП, що супроводжують процес перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію, поділяють на три основні групи: *оптичні, рекомбінаційні та омічні (джоулеві) втрати*.

#### 3.8.1 Оптичні втрати

До оптичних втрат відносять *відбивання сонячного випромінювання від фотоприймальної поверхні ФЕП та затінення приймальної поверхні фронтальною контактною сіткою*.

Зменшення цих втрат досягається за рахунок створення на фотоприймальній поверхні антивідбиваючих покриттів, формування регулярного мікрорельєфу поверхні, оптимізації геометричних параметрів фронтальної контактної сітки, створення конструкцій ФЕП з контактною системою, що винесена на тильну поверхню.

Головними способами мінімізації втрат на відбивання є нанесення на фотоприймальну поверхню антивідбиваючих покриттів у вигляді тонких діелектричних плівок (рис. 3.19, а) та текстурування поверхні (рис. 3.19, б).

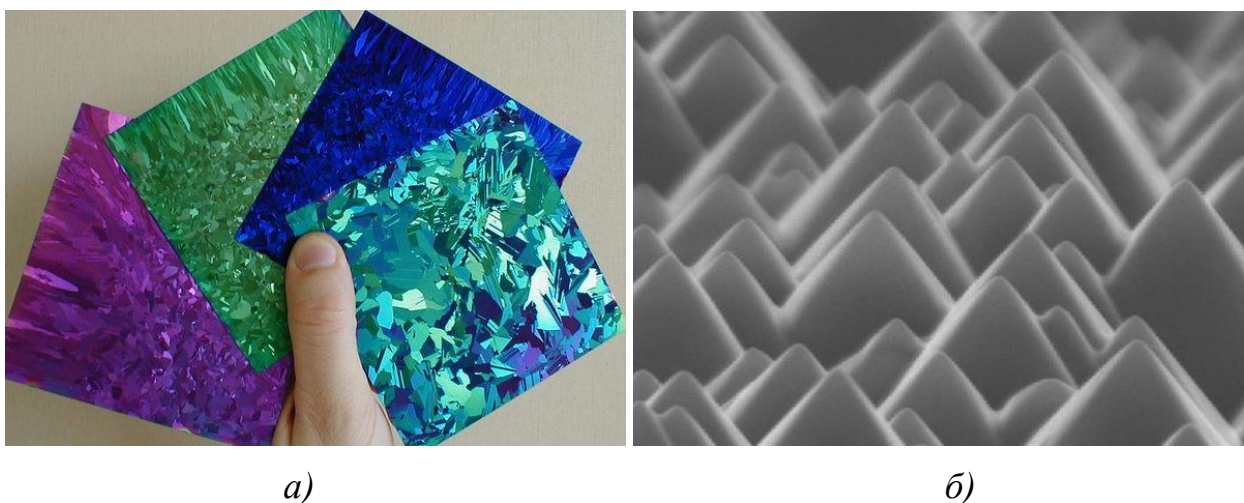


Рисунок 3.19 – Пластини кремнію з шаром антивідбиваючого покриття (а) та мікрорельєф текстурованої поверхні (б) [29]

Антивідбиваючі покриття за рахунок інтерференції забезпечують взаємне гасіння падаючої та відбитої від границі плівка – напівпровідник світлових хвиль, за рахунок чого коефіцієнт відбивання суттєво зменшується. Маючи певну контрольовану товщину та показник заломлення, антивідбиваюче покриття дозволяє зменшити інтегральний коефіцієнт відбивання сонячного випромінювання з 35% для непокритої поверхні кремнієвої пластини до 10% і менше для поверхні з одним шаром діелектричної плівки. В якості матеріалу для формування таких покриттів найчастіше використовують діоксид кремнію, нітрид кремнію та оксид титану.

Втім, застосування тонких діелектричних плівок для зменшення коефіцієнту відбивання має суттєвий недолік, що полягає в спектральній селективності – ефективно гасіння відбитого світлового потоку спостерігається при певному значенні довжини хвилі випромінювання. Досягти ефективного зменшення коефіцієнту відбивання в більш широкому діапазоні довжин хвиль сонячного випромінювання можна за рахунок створення багат шарових антивідбиваючих покриттів, що формуються з плівок на основі різних діелектриків.

Іншим способом зменшення коефіцієнту відбивання в широкому спектральному діапазоні є формування текстурованих поверхонь. Текстурована поверхня являє собою безліч регулярно розташованих мікропірамід (рис. 3.19, б). Світло, потрапляючи на поверхню піраміди, частково поглинається, а частково й відбивається від її поверхні під таким самим кутом. Відбита частина світла потрапляє на поверхню сусідньої піраміди і там додатково поглинається. За рахунок такого повторного поглинання вдається знизити коефіцієнт відбивання для пластин кремнію з 35% до 11%.

Текстурування поверхонь здійснюють шляхом хімічної обробки пластин. Склад розчинів, температура і тривалість обробки залежать від типу та матеріалу пластин. Втім, текстуруванню в хімічних розчинах підлягають лише пластини монокристалічних напівпровідників, де спостерігається залежність

швидкості травлення від кристалографічного напрямку. Для текстурування пластин монокристалічного кремнію найчастіше використовують лужні розчини, наприклад, розчини на основі гідроксиду калію.

В сучасних ФЕП на основі монокристалічного кремнію застосовують одночасно і текстурування поверхонь, і нанесення антивідбиваючих покриттів, що дозволяє зменшити коефіцієнт відбивання приймальної поверхні до 1 – 2 % в широкому спектральному діапазоні сонячного випромінювання.

Інша частина оптичних втрат – це втрати на затінення фоточутливої поверхні ФЕП фронтальною контактною сіткою. Вони пов'язані з тим, що частину від загальної площі приймальної поверхні займає фронтальний металевий контакт, а доступ світла до ділянок напівпровідника під цим контактом виявляється заблокованим.

З точки зору зменшення внутрішнього послідовного опору ФЕП важливим є забезпечення максимальної площі фронтального контакту. Втім, чим більшою є площа фронтального контакту, тем менше ділянок залишається для вільного доступу світла. І навпаки, чим меншою буде площа контакту, тим більшим буде внутрішній послідовний опір, а отже, і втрати потужності на ньому, але тим більшою буде площа, доступна для сонячного випромінювання. У зв'язку з цим, фронтальний контакт виконують у вигляді сітки або гребінки (рис. 3.20), намагаючись знайти оптимальне співвідношення між електричними втратами та втратами на затінення.

Крок контактної сітки суттєво залежить від номінального значення струму сонячного елемента – чим вища сила струму, тим густішою має бути контактна сітка. Так, для сонячних елементів неконцентрованого випромінювання крок контактних доріжок складає від одного до декількох міліметрів, а для ФЕП концентрованого сонячного випромінювання, що генерують значні струми – десяті долі міліметра. Відповідно, втрати на затінення можуть становити від декількох відсотків до 10 – 20%.



Рисунок 3.20 – Фронтальна контактна сітка сонячного елемента

На даний час розроблено такі конструкції ФЕП, в яких контакти як до р-, так і до n-областей винесені на тильну поверхню сонячного елемента (рис. 3.21, а), а отже, втрати на затінення фронтальної поверхні сіткою зведені в них до нуля. Фактично нульовими ці втрати є і в ФЕП з вертикальним відносно приймальної поверхні розташуванням р-n- переходів, так званих, фотовольтах (рис. 3.21, б).

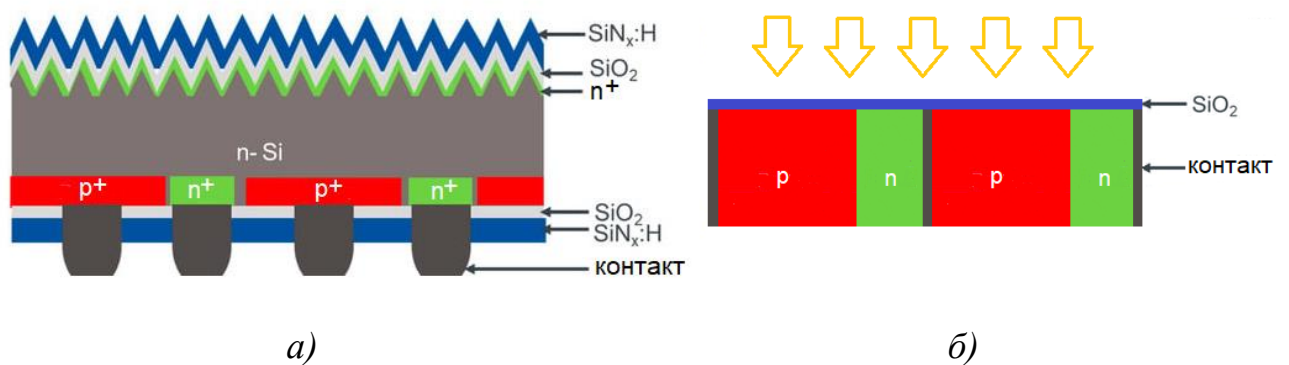


Рисунок 3.21 – Конструкція сонячного елемента з контактами, винесеними на тильну поверхню, (а) та з вертикальним розташуванням р-n- переходів (б)

### 3.8.2 Рекомбінаційні втрати

В реальному сонячному елементі носії заряду генеруються як в р-, так і в n-області р-n- переходу в залежності від того, на якій глибині поглинається світло з даною довжиною хвилі. Деякі неосновні носії заряду, тобто, електрони в р-області та дірки в n-області, рухаючись до ОПЗ, можуть зникнути внаслідок рекомбінації, так і не доставшись потенціального бар'єру та не розілившись полем ОПЗ, а отже, не прийнявши участі у фотовольтаїчному ефекті (рис. 3.18). Втрати, пов'язані з рекомбінацією нерівноважних носіїв заряду в об'ємі та на поверхні бар'єрної структури ФЕП називають *рекомбінаційними втратами*.

Як зазначалось вище, короткохвильове випромінювання має порівняно невелику глибину поглинання у напівпровіднику. Отже, короткохвильовий край фоточутливості визначається ефективністю збирання носіїв заряду з фронтального шару сонячного елемента. Значення коефіцієнту збирання  $Q$  з фронтальної області напівпровідникової структури залежить від дифузійної довжини неосновних носіїв заряду, товщини фронтального шару та інтенсивності процесів поверхневої рекомбінації, кількісною мірою якої є *швидкість поверхневої рекомбінації* – середня швидкість руху носіїв заряду з об'єму напівпровідника до його поверхні. Чим меншою є товщина фронтального шару, тобто, чим ближче знаходиться ОПЗ до фронтальної поверхні, а також чим менша швидкість поверхневої рекомбінації та більша дифузійна довжина носіїв заряду, тим більшим буде коефіцієнт збирання  $Q$ , а отже, й фоточутливість сонячного елемента в короткохвильовій ділянці сонячного спектра.

Отже, для зменшення рекомбінаційних втрат у фронтальному шарі та досягнення високої фоточутливості сонячного елемента в короткохвильовому спектральному діапазоні необхідно забезпечувати високі значення дифузійної довжини носіїв заряду, низькі швидкості поверхневої рекомбінації та малу товщину фронтальної області ФЕП.

Швидкість поверхневої рекомбінації можна суттєво зменшити

спеціальною хімічною обробкою напівпровідникових пластин, а також застосуванням, так званих, пасивуючих шарів у вигляді діелектричних або напівпровідникових плівок, що наносяться на поверхню. Так, у випадку кремнієвих ФЕП хімічна обробка поверхні дозволяє досягти доволі незначних швидкостей поверхневої рекомбінації на рівні  $10^3 - 10^4$  см/с, що при товщині фронтального шару  $0,1 - 0,2$  мкм забезпечує високу фоточутливість в діапазоні довжин хвиль  $0,4 - 0,5$  мкм. У ФЕП на основі арсеніду галію швидкість поверхневої рекомбінації різко зменшується з  $10^7$  см/с до  $10^3$  см/с за рахунок нанесення на поверхню GaAs тонкого напівпровідникового шару AlGaAs з великою шириною забороненої зони, який ефективно заповнює обірвані валентні зв'язки на поверхні структури.

Окрім того, пригнічення поверхневої рекомбінації є можливим за допомогою вбудованого електричного поля, що створюється у фронтальному шарі або за рахунок градієнта концентрації легуючої домішки, або ж за рахунок зміни хімічного складу шару по його товщині. Вбудоване електричне поле обумовлює нахил країв енергетичних зон як при неоднорідному легуванні шару (рис. 3.22, а), так і при зміні його ширини забороненої зони  $\Delta E_g$ , пов'язаній з варіюванням хімічного складу по товщині  $d$  (рис. 3.22, б).

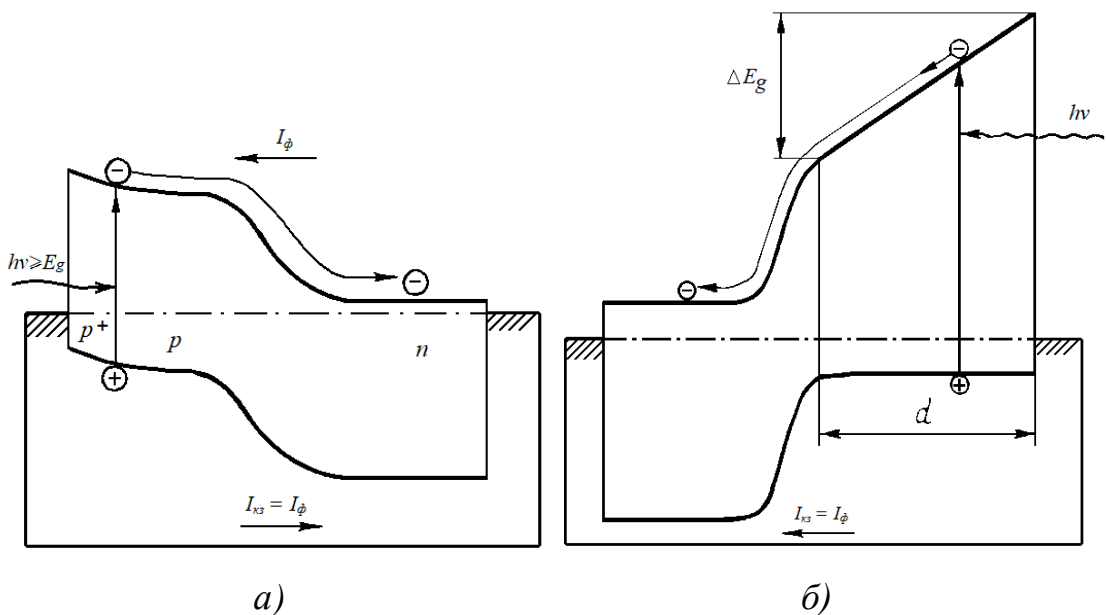


Рисунок 3.22 – Структура з вбудованим електричним полем, створеним за рахунок неоднорідного легування (а) та зміни хімічного складу (б)



В кремнії при швидкості поверхневої рекомбінації близько  $10^4$  см/с величина вбудованого поля для пригнічення цієї рекомбінації повинна становити порядку  $10^3$  В/см. Таке вбудоване поле може бути створене за рахунок градієнта концентрації легуючої домішки, який формується методами дифузії або іонної імплантації при зміні концентрації атомів домішки в напівпровідниковому шарі від  $10^{19}$  см<sup>-3</sup> біля поверхні до  $10^{17}$  см<sup>-3</sup> на глибині 1 мкм.

В арсеніді галію швидкість поверхневої рекомбінації вища, і для її пригнічення використовують напівпровідникові шари з градієнтом ширини забороненої зони. Так, при використанні шарів твердих розчинів  $Al_xGa_{1-x}As$  з вмістом алюмінію  $x$ , що збільшується до поверхні, можливим є досягнення зміни ширини забороненої зони  $\Delta E_g \approx 0,5$  еВ на товщині шару 1 мкм. Такий градієнт ширини забороненої зони є достатнім для ефективного пригнічення рекомбінаційних втрат, пов'язаних з поверхневими станами.

Звісно, у фронтальному шарі бар'єрної структури є і втрати, пов'язані з об'ємною рекомбінацією. Втім, враховуючи порівняно малу товщину фронтальних шарів напівпровідникових структур, що використовуються для виготовлення ФЕП, об'ємна рекомбінація не відіграє тут вирішальної ролі.

Суттєву роль об'ємна рекомбінація відіграє в базовій області структури, що розташована за фронтальним (емітерним) шаром в напрямку від приймальної поверхні сонячного елемента. Товщина базової області ФЕП суттєво більша за емітерну. Саме в базовій області відбувається поглинання довгохвильового сонячного випромінювання, яке має менші коефіцієнти поглинання, ніж у короткохвильового, і тому розповсюджується у напівпровіднику на більшу глибину. В сонячних елементах на основі кристалічного кремнію в базовій області поглинається найбільша частка сонячного випромінювання, а отже, збирання носіїв заряду з бази має вирішальний вплив на параметри кремнієвих ФЕП.

Коефіцієнт збирання носіїв заряду з базової області визначається їх

дифузійною довжиною  $L$ . Якщо світло поглинається в базі на відстані, меншій за  $L$ , то фактично всі неосновні носії, генеровані світлом, за час свого життя встигають досягти ОПЗ і розділитись її полем (рис. 3.18, перехід за участю фотону  $h\nu_4$ ), а коефіцієнт збирання  $Q$  є близьким до одиниці. Зі збільшенням довжини хвилі випромінювання область генерації носіїв заряду віддаляється від ОПЗ вглиб бази, що призводить до збільшення рекомбінаційних втрат носіїв в об'ємі бази (рис. 3.18, перехід за участю фотону  $h\nu_5$ ).

Отже, для збільшення фоточутливості сонячного елемента в довгохвильовій ділянці сонячного спектру необхідно забезпечувати високі значення коефіцієнту збирання носіїв з базової області. Це досягається, головним чином, збільшенням часу життя неосновних носіїв заряду в базі, тобто, значною їх дифузійною довжиною, за рахунок використання якісного напівпровідникового матеріалу з малою концентрацією дефектів кристалічної решітки.

Рекомбінацію носіїв заряду на тильній поверхні сонячного елемента мінімізують, як і у випадку з фронтальним шаром, створенням вбудованого поля поблизу тильної поверхні (*back surface field – BSF*) та нанесенням пасивуючих шарів.

Поле шару BSF спрямовує неосновні носії заряду до ОПЗ, збільшуючи коефіцієнт збирання тим сильніше, чим менша товщина базової області. Втім, зменшення товщини бази має зворотній ефект – збільшуються втрати довгохвильового випромінювання з енергією  $h\nu \approx E_g$ , яке не встигає поглинутись під час проходження тонкого базового шару.

Щоб зменшити втрати такого світла, що має малий коефіцієнт поглинання, на тильній поверхні сонячного елемента з тонкою базою створюють відбиваючі покриття, що спрямовують довгохвильове випромінювання назад до базової області, збільшуючи тим самим його оптичний шлях в напівпровіднику для забезпечення можливості поглинання (рис. 3.23, а). Аналогічного ефекту досягають текстуруванням тильної поверхні: непоглинуте випромінювання спрямовується назад до бази за рахунок явища

повного внутрішнього відбиття при значних кутах падіння променів на грані пірамід, що формують мікрорельєф текстурованої поверхні (рис. 3.23, б).

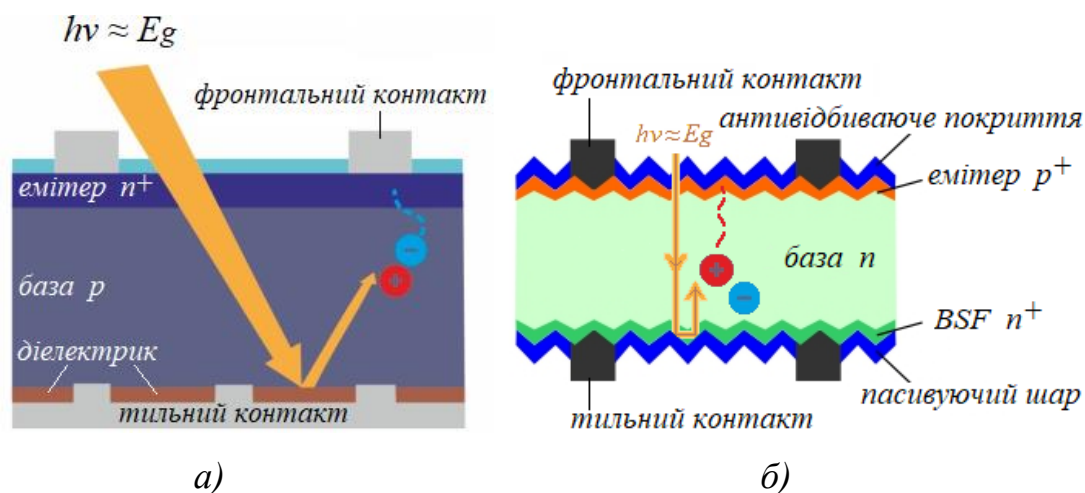


Рисунок 3.23 – Сонячний елемент з тильним відбиваючим покриттям (а) і текстурованою тильною поверхнею (б)

### 3.8.3 Омичні втрати

Як зазначалось вище, в реальному сонячному елементі частина виробленої ним енергії втрачається на внутрішньому опорі. Ці втрати електричної потужності відбуваються у відповідності до закону Джоуля - Ленца і їх прийнято називати *омичними* або *джоулевими втратами*.

При конструюванні сонячних елементів намагаються зменшити всі види втрат, зокрема й омичні. Втім, саме омичні втрати можуть бути критичними і потребувати радикального зменшення, наприклад, як у випадку ФЕП концентрованого сонячного випромінювання, які генерують значні струми.

На рис. 3.24 представлено модель сонячного елемента, яка дозволяє пояснити походження складових внутрішнього послідовного опору та означити основні напрямки їх зменшення.

Генеровані в результаті поглинання світла електрони, що знаходяться в n-області, рухаючись до фронтального контакту, долають *опір емітерного шару*  $R_C$  та опір перехідної області між напівпровідниковим матеріалом емітерного

шару та металом контактної смужки – *контактний опір*  $R_K$ . Під час руху електронів по металевій контактній смужці долається *опір фронтального контакту*  $R_M$ , а після проходження зовнішнього електричного кола – опір тильного контакту  $R'_M$ , контактний опір на тильній поверхні  $R'_K$  та *опір базової області*  $R_b$ .

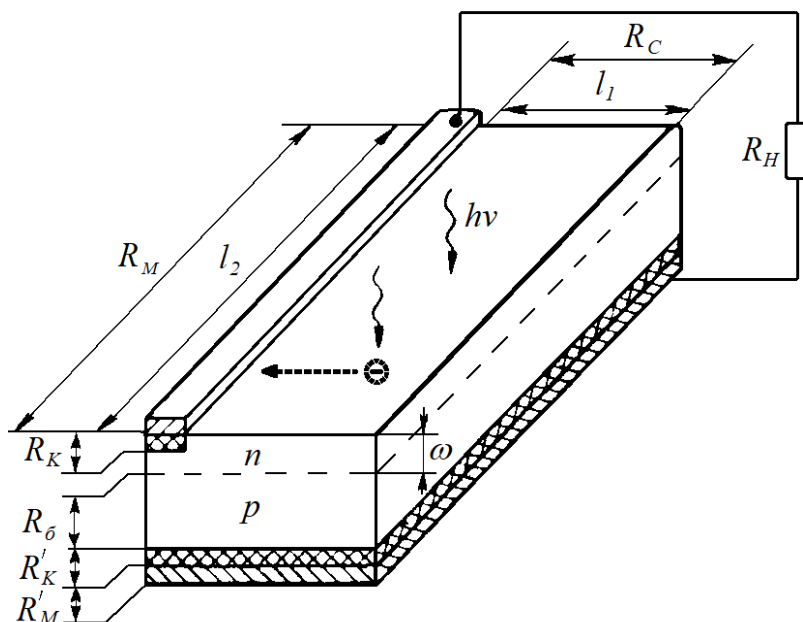


Рисунок 3.24 – Модель сонячного елемента з фронтальним контактом у вигляді смужки

Зазвичай, опори  $R'_M$ ,  $R'_K$  та  $R_b$  є незначними в порівнянні з іншими складовими внутрішнього опору, оскільки площа тильного контакту набагато більша за площу фронтальної контактної сітки, а товщина базової області незначна і становить близько 0,3 мм і менше. Отже, головний внесок у внутрішній послідовний опір сонячного елемента роблять опір емітерного шару  $R_C$ , контактний опір на фронтальній поверхні  $R_K$  та опір фронтального контакту  $R_M$ .

Опір емітерного шару, зважаючи на геометричні розміри сонячного елемента, зазначені на рис. 3.24, визначатиметься наступним виразом:

$$R_C = \rho_e \frac{l_1}{\omega l_2}, \quad (3.27)$$

де  $\rho_e$  – питомий опір емітерного шару.

З виразу (3.27) слідує, що опір  $R_C$  можна зменшити, збільшивши товщину емітерного шару  $\omega$ . Втім, як зазначалося вище, це призведе до зменшення коефіцієнту збирання носіїв з фронтального шару за рахунок збільшення рекомбінаційних втрат, і як наслідок, до погіршення фоточутливості сонячного елемента в короткохвильовій ділянці спектру. До такого ж ефекту може призвести і підвищення концентрації легуючої домішки в емітерному шарі для зменшення його питомого опору  $\rho_e$ .

Радикально зменшити опір  $R_C$  можна за рахунок зменшення відстані  $l_1$ , тобто збільшивши густоту розташування доріжок фронтальної контактної сітки. Однак, і цей спосіб має свої вади: більш густі контактні сітки збільшують втрати на затінення приймальної поверхні. Отже, виникає потреба в оптимізації геометричних параметрів фронтальної контактної сітки для знаходження компромісу між омичними та оптичними втратами.

Контактний опір  $R_K$  можна зменшити, збільшивши площу фронтальної контактної сітки, що, знов таки, призведе до збільшення оптичних втрат. Більш раціональним є підхід, що полягає в тому, щоб підібрати до даного напівпровідника такі метали та технологічні режими їх нанесення, які б забезпечили мінімальне значення  $R_K$ . Так, в сучасних сонячних елементах на основі кремнію та арсеніду галію для виготовлення контактів застосовують такі метали, як Ni, Ag, Au, Ti, Pd, Al, що наносяться на поверхню бар'єрної структури методами вакуумного випаровування, електрохімічними методами, шовкографією (трафаретним друком) з використанням спеціальних контактних паст з металевим порошком. На величину контактного опору також впливають режими термообробки, так званого, впалювання контактів, яке здійснюється після їх нанесення: при певних температурах та тривалостях такої обробки можна мінімізувати контактний опір.

Опір металевих контактів  $R_M$  визначається, в першу чергу, електропровідністю того металу, який використовується для формування контактних сіток. Втім, цей опір можна додатково зменшити, збільшивши площу поперечного перерізу контактних доріжок, застосувавши, наприклад, лудіння припоями. В ФЕП концентрованого сонячного випромінювання найчастіше застосовують електрохімічне сріблення або золочення доріжок контактних сіток.

### 3.9 Матеріали для виготовлення сонячних елементів

На початкових етапах розвитку фотоелектричної енергетики вважалося, що для виготовлення сонячних елементів доцільно використовувати напівпровідники, для яких значення ширини забороненої зони відповідало б положенню максимуму сонячного спектру, тобто, становило б близько 2 еВ. Надалі стало зрозумілим, що варто обирати напівпровідники з меншим, аніж 2 еВ, значенням  $E_g$ , оскільки це призводить до зростання кількості поглинених у напівпровіднику фотонів та збільшення величини фотоструму. Однак, при цьому спостерігається зменшення напруги холостого ходу у зв'язку зі зниженням висоти потенціального бар'єру р-n- переходу. Навпаки, при збільшенні ширини забороненої зони фотострум зменшується, а напруга холостого ходу зростає.

Наявність цих двох протилежних тенденцій призводить до того, що залежність електричної потужності та ефективності сонячного елемента від ширини забороненої зони має вигляд кривої з максимумом при певному значенні  $E_g$  (рис. 3.25). Як видно із залежностей, наведених на рис. 3.25, для перетворення сонячного спектру найкраще підходять напівпровідники з шириною забороненої зони в діапазоні від 1 еВ до 1,7 еВ.

В цей діапазон значень  $E_g$  потрапляють такі напівпровідникові матеріали, як  $\text{CuInSe}_2$ ,  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{CuInGaSSe}$ ,  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{InP}$ ,  $\text{GaAs}$ ,  $\text{CdTe}$ ,  $\text{CuInS}_2$ ,  $\text{CuGaS}_2$ , а також аморфний гідрогенізований кремній a-Si:H.

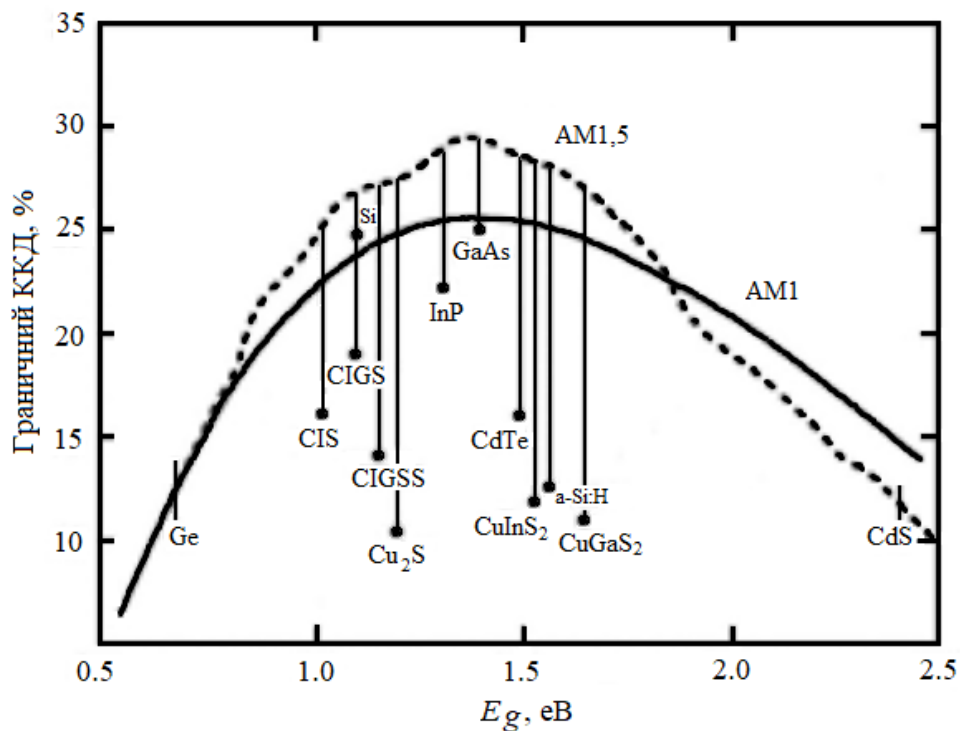


Рисунок 3.25 – Залежність граничної ефективності сонячних елементів від ширини забороненої зони напівпровідникового матеріалу для двох спектрів неконцентрованого сонячного випромінювання (точками позначено реально досягнуті значення ефективності): CIS –  $CuInSe_2$ ; CIGS –  $CuIn_xGa_{1-x}Se_2$ ; CIGSS –  $CuInGaSSe$

Незважаючи на доволі широкий вибір матеріалів для сонячних елементів, в лідерах за досягнутими на практиці ефективностями перетворення сонячного випромінювання до цих пір перебувають лише два з них – це кристалічний кремній та арсенід галію. В одноперехідних сонячних елементах на основі цих двох матеріалів досягнуто ККД, що наближаються до теоретичної межі.

Подальше підвищення ефективності сонячних елементів пов'язане, перш за все, з розширенням їх спектрального діапазону фоточутливості за рахунок застосування багатошарових структур з різних напівпровідників. Кожен такий напівпровідниковий шар зі своїм потенціальним бар'єром утворює елемент, що максимально ефективно перетворює окрему ділянку сонячного спектру (рис. 3.26). По мірі проходження сонячного випромінювання

крізь таку багатошарову структуру відбувається послідовне перетворення окремих його спектральних областей в напрямку від короткохвильової до довгохвильової. Такі ФЕП називають *каскадними* або *тандемними*.

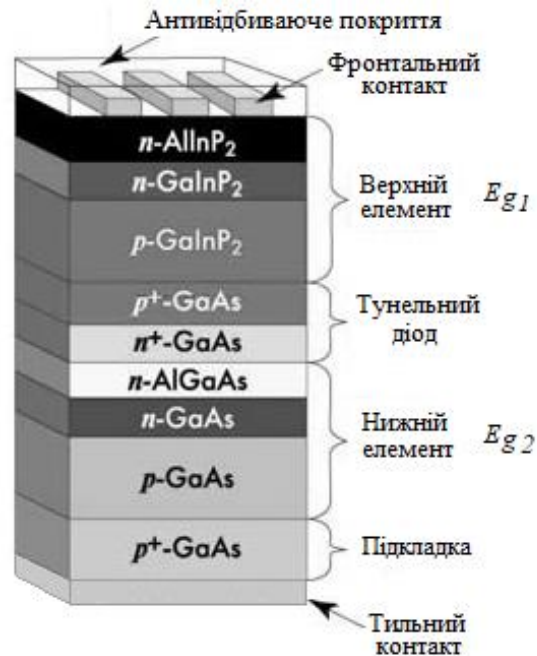


Рисунок 3.26 – Двоелементний каскадний фотоелектричний перетворювач в системі GaInP<sub>2</sub>/GaAs

В каскадних ФЕП верхній елемент має більшу ширину забороненої зони  $E_{g1}$ , ніж нижній. Отже короткохвильова частина сонячного спектру перетворюється саме верхнім елементом, а довгохвильові фотони з енергією  $h\nu < E_{g1}$  пропускаються до нижнього елемента з  $E_{g2} < E_{g1}$ , де поглинаються і перетворюються на електричну енергію. Збільшуючи кількість елементів у каскаді і підбираючи відповідні напівпровідникові матеріали та їх товщину, можна збільшити долю сонячного випромінювання, що перетворюється на електричну енергію, а отже й підвищити ККД.

На даний час розроблено каскадні ФЕП, які мають у своєму складі до шести елементів, що дозволило наблизити ефективність перетворення сонячного випромінювання до 50% (рис. 2.11).



### 3.10 Питання для самоперевірки

1. Які процеси відбуваються зі світлом при його надходженні на границю розділу двох середовищ?
2. Опишіть механізми поглинання світла у напівпровідниках. Які з цих механізмів є фотоактивними?
3. В чому полягає рекомбінація носіїв заряду?
4. Дайте визначення рівноважних та нерівноважних носіїв заряду.
5. Сформулюйте закон Бугера-Ламберта-Бера та розкрийте фізичну сутність спектрального коефіцієнта поглинання.
6. Як легування напівпровідників донорними та акцепторними домішками впливає на концентрацію вільних носіїв заряду? Дайте визначення основних та неосновних носіїв заряду.
7. Поясніть процес утворення p-n- переходу та зобразіть його енергетичну діаграму.
8. Опишіть роботу p-n- переходу в режимах прямого та зворотного зміщення.
9. Запишіть рівняння вольт-амперної характеристики p-n- переходу, схематично зобразіть її графік. Які зовнішні фактори впливають на вольт-амперну характеристику p-n- переходу?
10. Назвіть основні типи бар'єрних структур для сонячних елементів, схематично зобразіть їх енергетичні діаграми.
11. Поясніть сутність фотовольтаїчного ефекту на прикладі освітленого p-n- переходу.
12. Запишіть рівняння світлової вольт-амперної характеристики p-n- переходу, вирази для фотоструму та напруги холостого ходу.
13. Схематично зобразіть світлову вольт-амперну характеристику сонячного елемента, вкажіть на ній характерні точки. Які зовнішні фактори впливають на неї та як саме?
14. Дайте визначення максимальної потужності сонячного елемента та

фактора заповнення вольт-амперної характеристики.

15. Зобразіть еквівалентну схему ідеального сонячного елемента, одна та дводіодну еквівалентні схеми реального сонячного елемента. Порівняйте їх між собою.
16. Запишіть та порівняйте між собою рівняння світлових вольт-амперних характеристик ідеального та реальних сонячних елементів.
17. Поясніть, як впливають послідовний та шунтуючий опори на вольт-амперну характеристику сонячних елементів.
18. Назвіть основні параметри сонячних елементів та опишіть їх залежність від зовнішніх факторів.
19. Дайте визначення коефіцієнта збирання носіїв заряду. Як він змінюється зі збільшенням довжини хвилі випромінювання?
20. Наведіть класифікацію втрат в сонячних елементах та поясніть фізичну сутність цих втрат.
21. Опишіть оптичні втрати в сонячних елементах та назвіть способи їх зменшення.
22. Які втрати в сонячних елементах відносять до рекомбінаційних? Опишіть способи зменшення цих втрат.
23. Яка фізична причина обумовлює наявність омічних втрат у сонячних елементах? Як їх мінімізувати?
24. Назвіть основні компоненти внутрішнього послідовного опору.
25. Назвіть напівпровідникові матеріали, що використовуються для виготовлення сонячних елементів. Які з цих матеріалів знайшли найширше практичне застосування?
26. Опишіть принцип, покладений в основу каскадних сонячних елементів.

**Рекомендована література [1, 2, 4, 5, 10, 12-14, 29]**

## 4 АСПЕКТИ МЕТРОЛОГІЇ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

### 4.1 Вимірювання світлових вольт-амперних характеристик

Основні параметри сонячних елементів, такі як струм короткого замикання, напруга холостого ходу, максимальна потужність, фактор заповнення та ефективність, визначаються з вимірювань світлових ВАХ. Втім, як зазначалося раніше, світлові ВАХ сонячних елементів суттєво залежать від зовнішніх факторів, особливо від потужності світлового потоку та температури. Значно впливає на світлові ВАХ і спектральний склад випромінювання, що застосовується під час вимірювань.

Світлові ВАХ можна виміряти в натурних умовах. Головною перевагою такого підходу є використання природного спектрального складу сонячного випромінювання. Втім, перед початком таких вимірювань потрібно визначитись з наявною густиною потоку сонячного випромінювання та його реальним спектральним складом, які змінюються протягом світлового дня і сильно залежать від погодних умов та стану земної атмосфери. Нестабільність світлового потоку протягом часу проведення натурних вимірювань також може стати на заваді.

Більш зручним виявляється проведення вимірювань в лабораторних умовах з використанням імітаторів сонячного випромінювання, де значно простіше забезпечити стабільність та відтворюваність характеристик випромінювання. Втім, в цьому випадку на перший план виходять проблеми, пов'язані з наближенням спектрального складу випромінювання штучних джерел світла до сонячного спектру, а також забезпечення паралельного ходу променів у світловому потоці, що є особливо важливим для тестування сонячних елементів з концентраторами випромінювання.

Вимірювання світлових ВАХ сонячних елементів реалізується шляхом фіксації напруги і струму в електричному колі, що складається з освітленого ФЕП та змінного опору навантаження. Застосовуються вимірювальні прилади

(амперметр і вольтметр) з високим класом точності та з'єднувальні провідники з малим опором, який має бути суттєво меншим за внутрішній опір самого сонячного елемента.

#### **4.1.1 Стандартизація умов вимірювання світлових вольт-амперних характеристик**

Оскільки світлові ВАХ сонячних елементів залежать від потужності світлового потоку і температури, то порівняння параметрів різних ФЕП між собою можна здійснити лише за однакових умов тестування. У зв'язку з цим розроблено низку стандартизованих умов, в яких мають проводитись вимірювання світлових ВАХ.

За *стандартні умови тестування* (STC) приймають такі умови, при яких сонячний елемент експонується спектром AM1,5, що враховує наявність як прямої, так і дифузної складової сонячної радіації, густина потужності випромінювання складає  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , а температура ФЕП є фіксованою і становить  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Тестування в умовах STC хоча і дозволяє порівнювати сонячні елементи між собою, проте не відображає їх параметри в реальних умовах експлуатації. У зв'язку з цим було розроблено низку додаткових до STC стандартів, які прийнято застосовувати для тестування *модулів сонячних елементів* – електрично з'єднаних між собою ФЕП, згрупованих у єдиному корпусі:

- *умови номінальної робочої температури сонячних елементів* (NOCT);
- *умови низької освітленості* (LIC);
- *умови високих температур* (HTC);
- *умови низьких температур* (LTC);
- *умови випробувань фотовольтаїки для комунальних систем* (PTC).

В умовах NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) нормується не температура сонячних елементів, а температура оточуючого середовища. Номінальна ж робоча температура модуля вимірюється при освітленості

800 Вт/м<sup>2</sup>, спектрі AM1,5, температурі оточуючого середовища 20 °С та швидкості вітру 1 м/с. Кут нахилу модуля сонячних елементів при цьому встановлюється таким, що дорівнює 45°.

Умови LIC (Low Irradiance Conditions) застосовуються для визначення вироблення електричної енергії модулями сонячних елементів за низького рівня освітленості. Фактично ці умови імітують роботу модулів взимку для місцевостей з високою географічною широтою. Потік випромінювання спектру AM1,5 приймається на рівні 200 Вт/м<sup>2</sup>, температура модуля становить 25 °С, вітер відсутній.

В умовах HTC (High Temperature Conditions) модулі тестуються при температурі 75 °С. Світловий потік становить 1000 Вт/м<sup>2</sup>, спектр AM1,5.

Умови LTC (Low Temperature Conditions) є у певному сенсі протилежними до HTC. Світловий потік приймається 500 Вт/м<sup>2</sup>, спектр AM1,5, температура модуля 15 °С, вітер відсутній.

Тестування в умовах PTC (Photovoltaics for Utility Systems Applications Test Conditions) застосовується для модулів сонячних елементів, призначених, в основному, для американського ринку. Ці умови відповідають потоку сонячного випромінювання 1000 Вт/м<sup>2</sup> та спектру AM1,5. На відміну від умов STC, тут нормується не температура ФЕП, а температура оточуючого середовища, подібно до NOCT. Приймається, що модулі мають знаходитись на висоті 10 м над рівнем землі, температура оточуючого повітря становить 20 °С, а швидкість вітру 1 м/с. Номінальна потужність модулів сонячних елементів за умов PTC виявляється на 10-15% меншою, ніж за умов STC. В той же час, умови PTC виглядають більш наближеними до реальних умов експлуатації.

Більшість виробників, що орієнтуються на європейський ринок фотовольтаїки, наводять параметри модулів сонячних елементів одночасно як в умовах STC, так і в умовах NOCT. Втім, тестування в умовах STC є обов'язковим для всіх виробників модулів.

#### 4.1.2 Імітатори сонячного випромінювання

В ідеальному випадку імітатори мають якнайкраще відтворювати всі параметри сонячного випромінювання, як-то: спектральний склад, паралельність променів, рівномірність освітлення, густину потужності потоку. Створення таких пристроїв є складною задачею, і реальні імітатори формують світловий потік, який дещо відрізняється за параметрами від природного сонячного випромінювання.

Складність тієї чи іншої конструкції імітатора сонячного випромінювання визначається, в першу чергу, його призначенням. Так, в установках для вимірювання світлових ВАХ сонячних елементів неконцентрованого випромінювання меншу увагу приділяють колімації світлового потоку для отримання високої паралельності променів, а більше зосереджуються на наближенні спектрального складу випромінювання до природного сонячного, забезпеченні стабільності та однорідності потоку. В той же час, якщо мова йде про тестування концентраторних ФЕП, то колімації світлового потоку потрібно приділяти значну увагу, ускладнюючи оптичну систему установки додатковими елементами. Якщо ж мова йде про поточний контроль якості ФЕП в умовах серійного виробництва, коли можна обмежитись відносними вимірами, наприклад, при сортуванні сонячних елементів за параметрами, варто застосовувати прості конструкції імітаторів на основі вольфрамових ламп розжарювання.

Головним недоліком вольфрамових ламп розжарювання при їх використанні в якості джерел світла в імітаторах сонячного випромінювання є отримання значно завищеної інтенсивності в інфрачервоній частині спектру, що викликає перегрівання ФЕП під час випробувань. Частково цю проблему можна зняти за допомогою тепловідбиваючих фільтрів, що встановлюються між лампами та зразком ФЕП. Задовільні результати зі зменшення інфрачервоної складової імітованого спектру також досягаються при використанні скляних фільтрів з прозорими плівками на основі оксидів індію та

олова або застосуванням теплопоглинаючого фільтру, що утворюється шаром води товщиною від 2 см до 4 см. В останньому випадку, зважаючи на значне поглинання інфрачервоного випромінювання водою, світлофільтри потрібно охолоджувати, а також забезпечувати видалення з перегрітої води повітряних бульбашок за допомогою механічних щіток.

На основі ламп розжарювання можна створити доволі прості імітатори сонячного випромінювання для експрес-контролю якості як окремих сонячних елементів, так і модулів великої площі. Втім, головним недоліком цих імітаторів є значне нагрівання сонячних елементів в процесі вимірювання світлових ВАХ.

Мінімізувати температурний вплив на результати вимірювань вдається за рахунок використання, так званих, імпульсних імітаторів сонячного випромінювання. В якості джерел світла в таких імітаторах застосовують ксенонові лампи-спалахи, які працюють в імпульсному режимі, і сонячний елемент або модуль не встигає нагрітись за короткий час вимірювань, що зменшує похибку в порівнянні з варіантом використання джерел безперервної дії. Імітатор комп'ютеризовано і оснащено відповідною апаратурою, яка за час одного імпульсу тривалістю близько 1 мс має забезпечити вимірювання в усіх точках світлової ВАХ. За допомогою інфрачервоних датчиків здійснюється контроль за реальною температурою модуля під час вимірювань, а обчислювальні пристрої виконують перерахунок світлової ВАХ з реальної на задану температуру з автоматичним визначенням параметрів, що відповідають стандартизованим умовам. Такі автоматизовані імітатори сонячного випромінювання називають *фотовольтаїчними тестерами*. Вони здатні створити світловий потік з нерівномірністю  $\pm 2\%$  на площі понад  $2,5 \times 2,5$  м.

Фотовольтаїчні тестери можуть будуватись не лише на джерелах світла, що працюють у імпульсному режимі. Достатньо розповсюдженими є також тестери безперервної дії на основі галогенних ламп.

В лабораторіях і на виробництві застосовують тестери, які за своїм конструктивним виконанням можуть бути як компактними (рис. 4.1) з доволі

складною оптичною системою, так і такими, що не містять спеціалізованих оптичних елементів, а рівномірність світлового потоку на значній площі забезпечується в них за рахунок суттєвого віддалення джерела світла від модуля сонячних елементів. В останньому випадку фотовольтаїчні тестери розташовують в окремому приміщенні.



Рисунок 4.1 – Компактний тестер модулів сонячних елементів

Втім, діапазон зміни потужностей опромінення, що дозволяють реалізувати більшість стандартних фотовольтаїчних тестерів, які випускаються промисловістю, є незначним, і для вимірювань параметрів сонячних елементів при потужностях світлових потоків, вищих за передбачені STC або NOTC, необхідно здійснювати концентрацію випромінювання від імітатора додатковими оптичними елементами, як-то фоконами, фоклінами або лінзами Френеля. Альтернативним варіантом є використання спеціалізованих імітаторів концентрованого випромінювання, які здатні забезпечити високі інтенсивності світлових потоків (рис. 4.2).





Рисунок 4.2 – Імпульсний імітатор сонячного випромінювання «Техноексан» з діапазоном ступенів концентрації світлового потоку від 1 до 1000

Імітатори концентрованого випромінювання мають задовольняти умовам, додатковим до тих, що диктуються імітацією неконцентрованих світлових потоків, таких як STC або NOCT. Так, має бути більш точна відповідність спектру імітованого випромінювання природному сонячному спектру, оскільки нестача променистої енергії в певному діапазоні довжин хвиль може суттєво спотворити результати вимірювань при концентруванні світла. Застосування концентруючих оптичних елементів обумовлює необхідність забезпечити високу паралельність променів від штучного джерела, яка має відповідати розходженню променів від сонячного диску і складати не більше  $\pm 0,26^\circ$ , а допустима нерівномірність розподілу потоку випромінювання по робочій поверхні повинна бути не гіршою декількох відсотків при густині потужності  $1000 \text{ Вт/м}^2$ .

Паралельність променів досягається в переважній більшості сучасних імітаторів за рахунок застосування коліматорів, в якості яких використовують

параболоїдні дзеркала або лінзи Френеля. В фокусі цих оптичних елементів розміщується зображення джерела випромінювання, яке формується еліпсоїдними концентраторами.

Висока ж рівномірність освітлення поверхні забезпечується оптичним змішуванням, яке здійснюється за допомогою, так званих, оптичних інтеграторів, що являють собою пакет лінзових елементів гексагонального поперечного перерізу. Інтегратор складається з великої кількості (до двох десятків) проєкційних систем, кожна з яких, формуючи свій світловий пучок, спрямовує його на всю робочу поверхню, де пучки від окремих елементів змішувача накладаються один на інший. В результаті освітленість робочої поверхні в різних її точках відрізняється від середнього значення не більше, ніж на  $\pm(2 \div 3)\%$ .

Для тестування окремих ще не зібраних у модуль концентраторних сонячних елементів, зважаючи на їх малу площу, можна також використовувати імітатори з неколімованим світловим потоком. Досягнення високого ступеня концентрації випромінювання в цьому випадку може бути реалізоване не за рахунок використання оптичних елементів, а варіюванням відстані між сонячним елементом та джерелом світла високої інтенсивності, в якості якого найчастіше використовують ксенонові лампи, що працюють або в безперервному, або ж, як у більшості випадків, в імпульсному режимі. Вибір такого джерела світла обумовлений високою відповідністю випромінювання ксенону сонячному спектру, а використання імпульсного режиму забезпечує високі інтенсивності опромінення та запобігає нагріванню зразків сонячних елементів. Корекція спектру ксенонових ламп здійснюється за допомогою інтерференційних світлофільтрів.

На рис. 4.3 представлено схему імітатора сонячного випромінювання, розробленого у Фізико-технічному інституті ім. А.Ф. Іоффе. Цей імітатор призначений для тестування модулів концентраторних каскадних сонячних елементів і при порівняно простій конструкції забезпечує низьку нерівномірність розподілу світлового потоку по робочій площі на рівні  $\pm 3\%$ ,

квазіпаралельний світловий пучок на площі  $50 \times 50 \text{ см}^2$  зі щільністю потужності випромінювання  $1000 \text{ Вт/м}^2 \pm 20\%$ . Спектральний склад випромінювання наближений до сонячного, а кутове розходження світлового пучка становить 33 мінUTI.

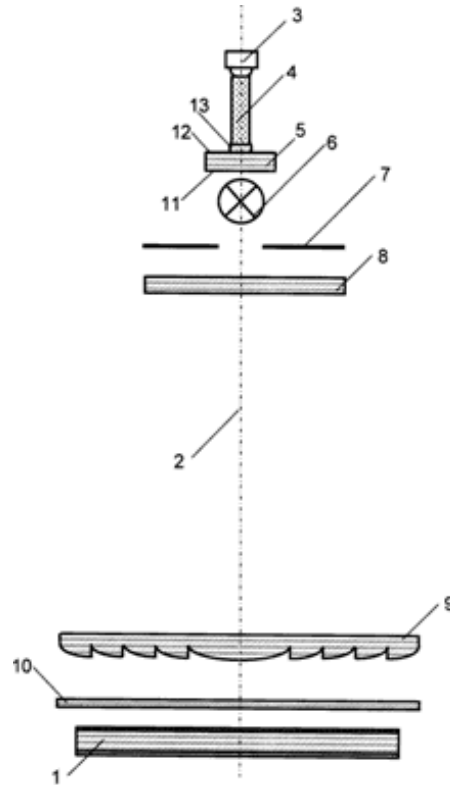


Рисунок 4.3 – Імітатор сонячного випромінювання для дослідження параметрів модулів концентраторних сонячних елементів: 1 – модуль, що досліджується; 2 – оптична вісь; 3 – світлодіод; 4 – світловод; 5 – захисний світлофільтр; 6 – імпульсна ксенонова лампа; 7 – діафрагма; 8 – корекційний світлофільтр; 9 – лінза Френеля; 10 – світлофільтр для вирівнювання густини потоку; 11 – розсіювальна поверхня; 12 – гладка поверхня; 13 – імерсійне середовище

Високоточні імітатори, які дозволяють варіювати ступінь концентрації світлового потоку у широкому діапазоні, розробляються у спеціалізованих лабораторіях, що займаються проблематикою сонячної енергетики, а виготовлення такого обладнання здійснюється під замовлення. Його вартість може складати десятки тисяч доларів.

## 4.2 Вимірювання потужності світлового потоку

Для визначення ефективності сонячних елементів за виразом (3.25) необхідно знати густину потужності світлового потоку, що надходить на поверхню ФЕП.

Безпосереднє вимірювання енергетичних характеристик сонячного випромінювання здійснюється такими приладами, як *актинометри*, *піранометри* та *соляриметри*. Актинометри вимірюють інтенсивність прямої сонячної радіації, піранометри призначені для вимірювання розсіяної та сумарної радіації, а соляриметри є різновидом піранометрів для вимірювання лише сумарної радіації.

В основі цих приладів лежить, як правило, термоелектричний ефект. Так класичні термоелектричні актинометри (рис. 4.4) мають чутливий елемент у формі диску зі срібної фольги, що має затемнену повернуту до сонячних променів поверхню. Зі зворотного боку диску кріпляться активні спаї термобатарей. Під дією поглинутої в диску прямої сонячної радіації температура диску підвищується, а отже з'являється і термострум, який є прямо пропорційним до інтенсивності сонячного випромінювання.



Рисунок 4.4 – Зовнішній вигляд актинометра

Основною частиною піранометра є піранометрична головка (рис 4.5), в якій знаходиться термоелектричний приймач сонячної енергії. Термоелектричний приймач захищено від вітру та зовнішніх забруднювачів скляною півсферою. Ця півсфера одночасно виконує роль фільтра, пропускаючи до приймача тільки радіаційні потоки з довжиною хвиль від 0,33 до 3,0 мкм.

Приймач радіації має вигляд пластини з чорними та білими квадратами, що чергуються. Зі зворотного боку до пластини кріпляться спаї термоелектричного перетворювача. Активні спаї кріпляться до чорних квадратів, а пасивні – до білих. У результаті різного поглинання сонячного випромінювання чорними та білими полями формується різниця температур між активними і пасивними спаями, а отже і термострум, який вимірюється гальванометром. Величина термоструму, як і у випадку актинометра, пропорційна потоку випромінювання, що потрапляє на приймач.

Під час вимірювання розсіяної радіації використовують затінювач приймальної частини піранометра у вигляді диску.



Рисунок 4.5 – Піранометрична головка

Окрім описаних приладів під час реєстрації характеристик сонячної радіації може також використовуватись *альбедометр*, конструкція якого

подібна до піранометра, але закріплена на карданному підвісі, що надає можливість спрямовувати приймач радіації як доверху, так і в бік підстилаючої поверхні.

Для визначення тривалості сонячного сьйва протягом доби застосовують *геліограф* (рис. 4.6). Принцип дії геліографа базується на пропалюванні паперової стрічки сонячними променями, які фокусуються на ній скляною кулею. Стрічка має часові поділки, і за довжиною пропаленої ділянки стрічки визначають час, упродовж якого Сонце не було вкрите хмарами, а густина потоку сонячної радіації становила не менше, ніж  $210 \text{ Вт/м}^2$ .



Рисунок 4.6 – Зовнішній вигляд геліографа

Поряд з термоелектричними приладами, визначення густини потужності світлового потоку здійснюють і фотоелектричним способом за допомогою *еталонних сонячних елементів* (рис. 4.7).

Зазвичай еталонні ФЕП використовують для налаштування світлового потоку від імітаторів сонячного випромінювання. Для цього спочатку визначають струм короткого замикання еталонного елемента при стандартних або інших потрібних умовах освітлення, тобто, проводять градуювання. Потік випромінювання від імітатора налаштовують до тих пір, поки струм короткого замикання, що генерується еталонним ФЕП, не буде дорівнювати тому, що

визначений в умовах градуювання.



Рисунок 4.7 – Еталонний сонячний елемент

Головною вимогою до еталонних сонячних елементів є ідентичність оптичних і спектральних властивостей по відношенню до тих зразків, параметри яких будуть вимірюватись. Важливим моментом також є висока термостабільність параметрів еталонного ФЕП, яка забезпечується його розміщенням під час налаштування на термостатованому столику. Іншим підходом до розв'язання цієї ж проблеми є точний контроль температури еталонного сонячного елемента з наступним врахуванням температурної поправки до виміряного значення струму короткого замикання.

Використання еталонних ФЕП забезпечує задовільні за точністю результати вимірювань навіть при застосуванні в імітаторі джерел випромінювання зі спектральним складом, що достатньо сильно відрізняється від сонячного. Втім, процедура градуювання еталонних сонячних елементів є доволі кропіткою і витратною, починаючи від ретельного відбору зразків і закінчуючи самим процесом градуювання. Так, для градуювання еталонних ФЕП космічного спектру використовують вимірювання із застосуванням літальних апаратів, як-то куль-зондів, висотних літаків і навіть ракет. В останньому випадку вимірювання здійснюються на висоті понад 100 км, чим

забезпечується найвища точність отриманих параметрів. Інші ж зазначені способи потребують введення до струму короткого замикання поправки на атмосферну масу.

Градування в наземних умовах потребує залучення значно менших фінансових та часових ресурсів. Однак і еталонні ФЕП наземного сонячного спектру, що пройшли процедуру градування в натуральних умовах, зазвичай використовуються лише в якості зразкових еталонів, за якими, в свою чергу, здійснюється градування робочих еталонів, що вже й використовуються для налаштування імітаторів сонячного випромінювання.

Еталонний сонячний елемент, зважаючи на лінійну залежність струму короткого замикання від потужності світлового потоку, можна використати не лише для налаштування імітаторів, але й для визначення наявних значень потужності випромінювання: як слідує з виразу (3.19), вимірюваний струм короткого замикання буде відрізнятися від еталонного значення в стільки ж разів, в скільки разів відрізнятиметься від еталонної наявна густина потужності випромінювання. При цьому варто пам'ятати, що лінійна залежність (3.19) може порушуватись при потужних світлових потоках.

Здійснити оцінку густини потужності світлового потоку можна і з використанням замість еталонного будь-якого іншого сонячного елемента або модуля з наперед відомими параметрами, що наводяться в технічному паспорті для умов STC. При цьому потрібно врахувати температурну поправку до вимірюваного значення струму короткого замикання, що обумовлена різницею між реальною температурою ФЕП під час випробувань і стандартною 25 °С. Вираз для поточного значення густини потужності випромінювання  $p_{0r}$ , Вт/м<sup>2</sup>, можна отримати на основі рівнянь (3.19) та (3.21). Остаточний вираз матиме наступний вигляд:

$$p_{0r} = 1000 \frac{I_{кз}}{I_{кз\ STC} [1 + \alpha_I (T - 25)]}, \quad (4.1)$$

де  $I_{кз}$  – поточне вимірне значення струму короткого замикання;  $I_{кз\ STC}$  –



паспортне значення струму короткого замикання, що відповідає умовам STC;  $\alpha_I$  – температурний коефіцієнт струму;  $1000 \text{ Вт/м}^2$  – густина потужності сонячного випромінювання в умовах STC;  $T$  – температура ФЕП під час проведення вимірювань, °C.

Важливо розуміти, що густина потужності світлового потоку, визначена за паспортизованими сонячними елементами або модулями, може містити в собі значну похибку, оскільки, на відміну від еталонних ФЕП, струм короткого замикання  $I_{кзSTC}$ , вказаний в технічному паспорті, характеризує не конкретний елемент чи модуль, що використовувались при вимірюваннях, а цілу партію такої продукції. Отже, за наявності еталонного сонячного елемента саме його використанню слід надавати перевагу, щоб підвищити точність вимірювань.

### 4.3 Вимірювання спектру фоточутливості

Для вимірювання спектру фоточутливості сонячних елементів використовують установки на основі *монохроматорів* – оптичних приладів, що дозволяють відокремити з суцільного спектру джерел світла спектральні лінії монохроматичного випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda$ . Монохроматичне світло спрямовується на зразок ФЕП і фіксується його струм короткого замикання, після чого виконують розрахунки коефіцієнта збирання або *зовнішньої квантової ефективності* сонячного елемента для даної довжини хвилі випромінювання. Зовнішня квантова ефективність – це відношення кількості носіїв заряду, розділених бар'єром сонячного елемента, до кількості фотонів, що надходять до його поверхні.

Зовнішній вигляд установки для вимірювання спектральних характеристик сонячних елементів представлено на рис. 4.8. В якості джерел світла в таких установках при вимірюваннях у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні застосовують, найчастіше, галогенні лампи з вольфрамовим тілом розжарювання. Струм лампи має бути стабілізованим для

уникнення флуктуацій світлового потоку.



Рисунок 4.8 – Установа для вимірювання спектральних характеристик сонячних елементів

Для реалізації вимірювань в ультрафіолетовому спектральному діапазоні застосовують спеціалізовані газорозрядні лампи, наприклад, водневу лампу, яка випромінює суцільний спектр з високою стабільністю. В деяких випадках, зокрема, при проведенні досліджень у ближній ультрафіолетовій області в діапазоні довжин хвиль від 0,3 мкм до 0,4 мкм можна обмежитись використанням лампи розжарювання з увіюлевим склом.

Існують також установки, які використовують джерела світла, що працюють в імпульсному режимі, наприклад, ксенонові лампи-спалахи. Невелика тривалість спалаху запобігає нагріванню як самого сонячного елемента, що досліджується, так і оптичних елементів самої установки.

Оптичними елементами, що забезпечують селекцію спектральних ліній в монохроматорі, можуть слугувати призми, інтерференційні фільтри та дифракційні решітки.

Сучасні установки для дослідження спектральних характеристик мають у своєму складі електронний блок, що забезпечує переведення виміряного аналогового сигналу в цифрову форму для подальшої комп'ютерної обробки та автоматизованої візуалізації отриманих спектрів fotocутливості сонячних елементів.

#### 4.4 Визначення внутрішнього послідовного і шунтуючого опорів

Визначити величину послідовного і шунтуючого опорів сонячного елемента можна на основі вимірювань його світлової або темної ВАХ.

##### 4.4.1 Визначення послідовного та шунтуючого опорів зі світлової вольт-амперної характеристики сонячного елемента

Продиференціюємо рівняння (3.17) для світлової ВАХ за напругою. Враховуючи, що  $R_s \ll R_{sh}$ , отримаємо наступний вираз:

$$dI = -\frac{e}{AkT} I_T (dU + R_s dI) - \frac{1}{R_{sh}} dU, \quad (4.2)$$

де  $I_T$  – темновий струм діода, що дорівнює:

$$I_T = I_0 \left[ \exp\left(\frac{e(U + IR_s)}{AkT}\right) - 1 \right]. \quad (4.3)$$

Оскільки в області малих напруг  $U$  темновий струм діода  $I_T \rightarrow 0$ , то в цій області світлова ВАХ буде визначатися, головним чином, шунтуючим опором сонячного елемента  $R_{sh}$ , причому з рівняння (4.2) слідує, що:

$$R_{sh} = - \left. \frac{dU}{dI} \right|_{U \rightarrow 0}. \quad (4.4)$$

Отже, шунтуючий опір можна визначити як тангенс кута нахилу лінійної ділянки світлової ВАХ відносно осі струмів в області низьких напруг сонячного елемента поблизу точки короткого замикання (рис. 4.9).

Навпаки, при напрузі холостого ходу, коли зовнішнє коло розімкнуте і  $I = 0$ , весь фотострум протікає через діод. Переписавши рівняння (4.2) у

ВИГЛЯДІ:

$$dI \left( 1 + \frac{e}{AkT} I_T R_s \right) = - \left( \frac{e}{AkT} I_T - \frac{1}{R_{sh}} \right) dU \quad (4.5)$$

та нехтуючи в (4.5) одиницею та оберненим шунтуючим опором в порівнянні з величиною  $\frac{e}{AkT} I_T R_s$ , отримуємо:

$$dI \cdot R_s = -dU . \quad (4.6)$$

Отже, з виразу (4.6) слідує, що величина внутрішнього послідовного опору може бути визначена за нахилом лінійної ділянки світлової ВАХ поблизу напруги холостого ходу (рис. 4.9):

$$R_s = - \left. \frac{dU}{dI} \right|_{U \rightarrow U_{xx}} . \quad (4.7)$$

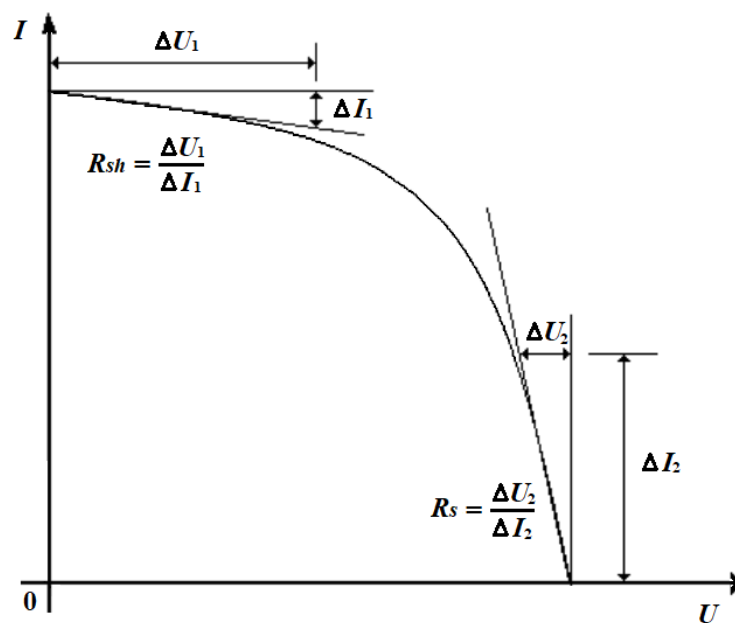


Рисунок 4.9 – Визначення внутрішнього послідовного та шунтуючого опорів зі світлової вольт-амперної характеристики

Втім, практичне застосування описаного методу доволі часто пов'язане з труднощами визначення нахилу дотичної до ВАХ поблизу точки короткого замикання, особливо для сонячних елементів з високими факторами заповнення  $FF$ , для яких ця ділянка ВАХ є фактично паралельною до осі напруг. У зв'язку з цим, шунтуючий опір  $R_{sh}$  варто визначати за нахилом зворотної гілки темної ВАХ сонячного елемента.

#### 4.4.2 Визначення послідовного та шунтуючого опорів за темною вольт-амперною характеристикою сонячного елемента

Ця методика визначення послідовного та шунтуючого опорів базується на вимірюванні темної ВАХ при подачі на сонячний елемент напруги від зовнішнього джерела в режимах прямого та зворотного зміщення р-п-переходу. При цьому створюються умови, що унеможливають потрапляння світла до ФЕП. Змінюючи напругу, що подається від регульованого джерела живлення, фіксують струм у колі сонячного елемента і за отриманими значеннями будують темнову ВАХ (рис. 4.10).

Нахил зворотної гілки темної ВАХ визначається шунтуючим опором сонячного елемента:

$$R_{sh} = \frac{\Delta U_{об}}{\Delta I_{об}}, \quad (4.8)$$

де  $\Delta I_{об}$  – приріст зворотного струму при різниці зворотної напруги  $\Delta U_{об}$ .

В той же час, нахил лінійної ділянки прямої гілки ВАХ в області високих напруг обумовлюється внутрішнім послідовним опором:

$$R_s = \frac{\Delta U_{np}}{\Delta I_{np}}, \quad (4.9)$$

де  $\Delta I_{np}$  – приріст прямого струму при різниці напруги прямого зміщення  $\Delta U_{об}$ .

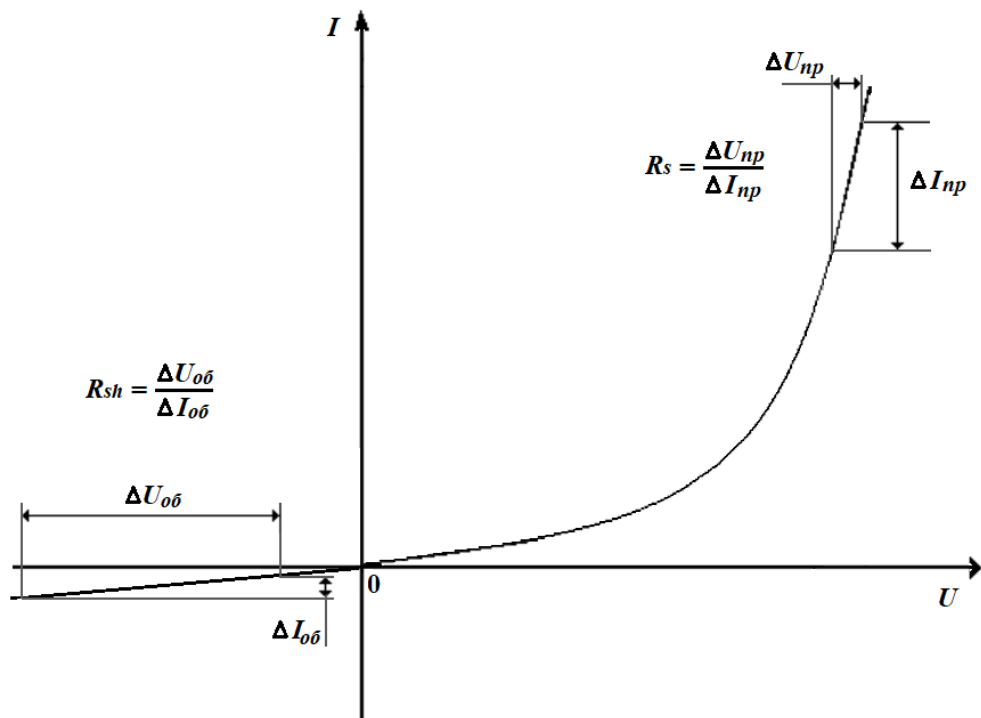


Рисунок 4.10 – Визначення внутрішнього послідовного та шунтуючого опорів за темною вольт-амперною характеристикою сонячного елемента

#### 4.5 Визначення струму насичення та параметра ідеальності

На даний час розроблено низку методик визначення цих параметрів ВАХ сонячного елемента, які ґрунтуються на вимірюванні як темнових, так і світлових його характеристик. Нижче розглянуті лише деякі з таких методик, що знайшли доволі широке практичне застосування.

##### 4.5.1 Визначення струму насичення та параметра ідеальності з прямої гілки темної вольт-амперної характеристики

Темнова ВАХ сонячного елемента, що враховує наявність послідовного і шунтуючого опорів, записується у наступному вигляді:

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{e(U - IR_s)}{AkT}\right) - 1 \right] + \frac{U - IR_s}{R_{sh}}, \quad (4.10)$$

де  $U$  – напруга, що подається на сонячний елемент від джерела живлення.

В області високих напруг перший, експоненційний, доданок в правій частині рівняння (4.10) є набагато більшим за другий, лінійний. Отже, другим доданком можна знехтувати, і рівняння темної ВАХ сонячного елемента дещо спроститься:

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{e(U - IR_s)}{AkT}\right) - 1 \right]. \quad (4.11)$$

Логарифмуючи праву і ліву частини рівняння (4.11), після низки перетворень отримаємо:

$$\ln(I + I_0) = \ln I_0 + \frac{e(U - IR_s)}{AkT}. \quad (4.12)$$

У випадку, коли  $I \gg I_0$ , що забезпечується на практиці розглядом прямої гілки темної ВАХ в області високих напруг, можна знехтувати струмом насичення у лівій частині рівняння (4.12) в порівнянні з результируючим струмом, і воно може бути переписане наступним чином:

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{e(U - IR_s)}{AkT}. \quad (4.13)$$

Якщо  $(U_1, I_1)$  та  $(U_2, I_2)$  – пара точок на прямій гілці темної ВАХ сонячного елемента в області високих напруг, то з використанням виразу (4.13) можна скласти наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \ln I_1 = \ln I_0 + \frac{e(U_1 - I_1 R_s)}{AkT}, \\ \ln I_2 = \ln I_0 + \frac{e(U_2 - I_2 R_s)}{AkT}. \end{cases} \quad (4.14)$$

Віднімаючи з другого рівняння цієї системи перше та виражаючи коефіцієнт ідеальності  $A$ , отримуємо:

$$A = \frac{e[U_2 - U_1 - R_s(I_2 - I_1)]}{kT \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)}. \quad (4.15)$$

Підставляємо знайдене значення параметру  $A$  в одне з рівнянь системи (4.14), наприклад, в перше, і визначаємо  $\ln I_0$ , а отже, і величину струму насичення  $I_0$ :

$$\ln I_0 = \ln I_1 - \frac{U_1 - I_1 R_s}{U_2 - U_1 - R_s(I_2 - I_1)} \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right). \quad (4.16)$$

Слід зазначити, що перед використанням даної методики потрібно зарані визначити внутрішній послідовний опір сонячного елемента  $R_s$  одним з описаних вище методів. Під час вимірювань темної ВАХ необхідно здійснювати контроль температури зразка  $T$ .

#### **4.5.2 Визначення струму насичення та параметра ідеальності зі світлової вольт-амперної характеристики**

В цій методиці визначають параметри ВАХ сонячного елемента, використовуючи підхід, аналогічний тому, що розглянутий вище, але



аналізують не темнову, а світлову ВАХ, записану у відповідності до однодіодної еквівалентної схеми в припущенні, що  $R_{sh} \rightarrow \infty$ , а  $I_{\phi} \approx I_{K3}$ :

$$I = I_{K3} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{e(U + IR_s)}{AkT}\right) - 1 \right]. \quad (4.17)$$

Після низки математичних перетворень виразу (4.17) з логарифмуванням та наступним записом отриманих рівнянь для пари точок  $(U_1, I_1)$  та  $(U_2, I_2)$ , що розташовані на світловій ВАХ поблизу точки максимальної потужності, отримуємо наступну систему з невідомими  $A$  і  $I_0$ :

$$\begin{cases} \ln(I_{K3} - I_1) = \ln I_0 + \frac{e(U_1 + I_1 R_s)}{AkT}, \\ \ln(I_{K3} - I_2) = \ln I_0 + \frac{e(U_2 + I_2 R_s)}{AkT}. \end{cases} \quad (4.18)$$

Розв'язуючи систему (4.18), отримуємо наступні вирази для коефіцієнту ідеальності  $A$  та струму насичення  $I_0$ , які подібні до рівнянь (4.15) та (4.16):

$$A = \frac{e[U_1 - U_2 + R_s(I_1 - I_2)]}{kT \ln\left(\frac{I_{K3} - I_1}{I_{K3} - I_2}\right)}. \quad (4.19)$$

$$\ln I_0 = \ln(I_{K3} - I_1) - \frac{U_1 + I_1 R_s}{U_1 - U_2 + R_s(I_1 - I_2)} \ln\left(\frac{I_{K3} - I_1}{I_{K3} - I_2}\right). \quad (4.20)$$

Ця методика потребує попереднього визначення величини внутрішнього послідовного опору сонячного елемента  $R_s$ , а також його струму короткого замикання  $I_{K3}$ . Необхідно здійснювати контроль температури зразка під час вимірювань світлової ВАХ.

### 4.5.3 Визначення струму насичення та параметра ідеальності з вимірювань струму короткого замикання та напруги холостого ходу

В даній методиці використовується рівняння світлової ВАХ сонячного елемента, записане у вигляді (4.17).

В режимі холостого ходу  $I = 0$ , а напруга  $U = U_{xx}$ . Рівняння (4.17) для цього режиму після ряду математичних перетворень приймає вигляд:

$$\ln(I_{K3} + I_0) = \ln I_0 + \frac{eU_{xx}}{AkT}. \quad (4.21)$$

Нехтуючи величиною струму насичення в порівнянні зі струмом короткого замикання, отримуємо:

$$\ln I_{K3} = \ln I_0 + \frac{eU_{xx}}{AkT}. \quad (4.21)$$

Якщо виміряти дві пари значень  $(U_{xx1}, I_{K31})$  та  $(U_{xx2}, I_{K32})$ , що відповідають двом різним рівням світлового потоку, то, користуючись виразом (4.21), можна скласти наступну систему з двох рівнянь та двома невідомими  $A$  і  $I_0$ :

$$\begin{cases} \ln I_{K31} = \ln I_0 + \frac{eU_{xx1}}{AkT}, \\ \ln I_{K32} = \ln I_0 + \frac{eU_{xx2}}{AkT}. \end{cases} \quad (4.22)$$

Розв'язуючи цю систему відносно невідомих, отримуємо вирази для параметра ідеальності  $A$  та струму насичення  $I_0$ :

$$A = \frac{e(U_{XX2} - U_{XX1})}{kT \ln\left(\frac{I_{K32}}{I_{K31}}\right)}. \quad (4.23)$$

$$\ln I_0 = \ln I_{K31} - \frac{U_{XX1}}{U_{XX2} - U_{XX1}} \ln\left(\frac{I_{K32}}{I_{K31}}\right). \quad (4.24)$$

#### 4.6 Визначення компонент внутрішнього послідовного опору сонячного елемента чотирьохконтактним методом

Компоненти внутрішнього послідовного опору сонячного елемента можуть бути визначені на основі вимірювань питомих параметрів структури ФЕП, до яких відносять: питомий опір фронтальної області  $\rho_e$  (Ом·см) або питомий шаровий опір цієї області  $r_c$  (Ом/□); питомий контактний опір  $r_k$  (Ом·см<sup>2</sup>); погонний опір металевих контактних смужок  $r_m$  (Ом·см<sup>-1</sup>).

Одним з методів вимірювань питомих опорів  $\rho_e$  (або  $r_c$ ) і  $r_k$  є чотирьохконтактний метод, схему реалізації якого зображено на рис. 4.11.

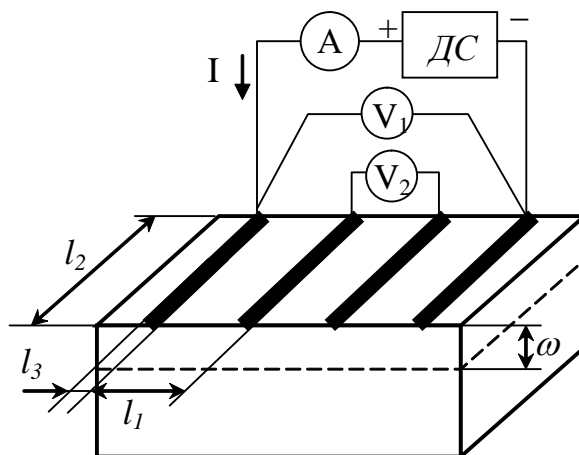


Рисунок 4.11 – Схема реалізації чотирьохконтактного методу

Для проведення вимірювань використовують тестовий зразок, який

виготовляють з такої ж самої структури, що і всю партію сонячних елементів. На емітерний шар товщиною  $\omega$  наносять контактні металеві смужки шириною  $l_3$  із кроком  $l_1$ . До смужок, що відстоять одна від одної на відстані не менш  $3l_1$ , підключають джерело струму  $ДС$ . Розмір зразка  $l_2$  обирають невеликим, щоб мінімізувати вплив поздовжнього опору металевих контактних смужок на результати вимірювань.

Оскільки емітерний шар ізольовано від інших областей зразка просторовим зарядом р-п- переходу, то струм  $I$ , що пропускається, протікає тільки по фронтальній р- або п- області структури. При цьому падіння напруги  $U_1$ , яке фіксується вольтметром  $V_1$ , буде складатися із падіння напруги на двох контактних опорах під металевими смужками і падіння напруги на трьох ділянках емітерного шару між смужками:

$$U_1 = I \frac{2r_k}{l_2 l_3} + 3U_2, \quad (4.25)$$

де  $U_2$  – напруга, яка вимірюється вольтметром  $V_2$  між середніми смужками при пропусканні струму  $I$ .

Виходячи з рівняння (4.25), отримуємо вираз для питомого контактного опору:

$$r_k = \frac{U_1 - 3U_2}{2I} l_2 l_3. \quad (4.26)$$

Знаючи падіння напруги  $U_2$  між середніми смужками, яке викликане протіканням по фронтальному шару струму силою  $I$ , можна визначити питомий опір цього шару (якщо емітерна область однорідно легована по товщині):

$$\rho_e = \frac{U_2}{I} \frac{\omega l_2}{l_1}, \quad (4.27)$$

або питомий шаровий опір (якщо має місце розподіл концентрації легуючої домішки по товщині емітерного шару):

$$r_c = \frac{\rho_e}{\omega} = \frac{U_2 l_2}{I l_1}. \quad (4.28)$$

Після визначення питомих параметрів напівпровідникової структури можна розрахувати контактний опір  $R_K$  та опір емітерного шару  $R_C$ :

$$R_K = \frac{r_K}{l_2 l_3}; \quad (4.29)$$

$$R_C = \rho_e \frac{l_1}{\omega l_2}, \quad (4.30)$$

або

$$R_C = r_c \frac{l_1}{l_2}. \quad (4.31)$$

Щодо погонного опору металевих доріжок  $r_m$ , його визначають окремо, наносячи металеві контактні смужки на високоомну підкладку.

#### 4.7 Питання для самоперевірки

1. Вкажіть головні переваги та недоліки вимірювань світлових ВАХ сонячних елементів в натурних та лабораторних умовах.
2. Зобразіть електричну схему для вимірювання світлових ВАХ.
3. Охарактеризуйте умови тестування сонячних елементів STC. Які ще стандартизовані умови тестування вам відомі?
4. Назвіть основні вимоги до імітаторів сонячного випромінювання.
5. Які джерела світла застосовують для імітації сонячного

випромінювання?

6. Які імітатори сонячного випромінювання прийнято називати фотовольтаїчними тестерами?
7. Вкажіть головні вимоги, яким мають задовільняти імітатори концентрованого сонячного випромінювання.
8. Назвіть основні прилади, що використовуються для вимірювання енергетичних характеристик сонячного випромінювання. Поясніть принцип їх роботи.
9. Розкрийте сутність фотоелектричного способу визначення густини потужності світлового потоку.
10. Опишіть обладнання, що застосовується для вимірювання спектрів фоточутливості сонячних елементів.
11. Опишіть методику визначення послідовного та шунтуючого опорів зі світлової ВАХ сонячного елемента.
12. Як визначити послідовний та шунтуючий опори з темної ВАХ сонячного елемента?
13. Опишіть методику визначення струму насичення та параметра ідеальності з вимірювань прямої гілки темної ВАХ сонячного елемента.
14. Як визначити струм насичення та параметр ідеальності зі світлової ВАХ сонячного елемента?
15. Розкрийте сутність методики визначення струму насичення та параметра ідеальності з вимірювань струму короткого замикання та напруги холостого ходу.
16. Опишіть чотирьохконтактний метод визначення компонент внутрішнього послідовного опору сонячного елемента.

**Рекомендована література [4, 12-14, 20-22]**

## 5 СОНЯЧНІ ЕЛЕМЕНТИ НА ОСНОВІ КРИСТАЛІЧНОГО КРЕМНІЮ

### 5.1 Класифікація сонячних елементів на основі кристалічного кремнію

Класифікація сонячних елементів за матеріалами, що найширше застосовуються для виготовлення ФЕП, представлена на рис. 5.1.

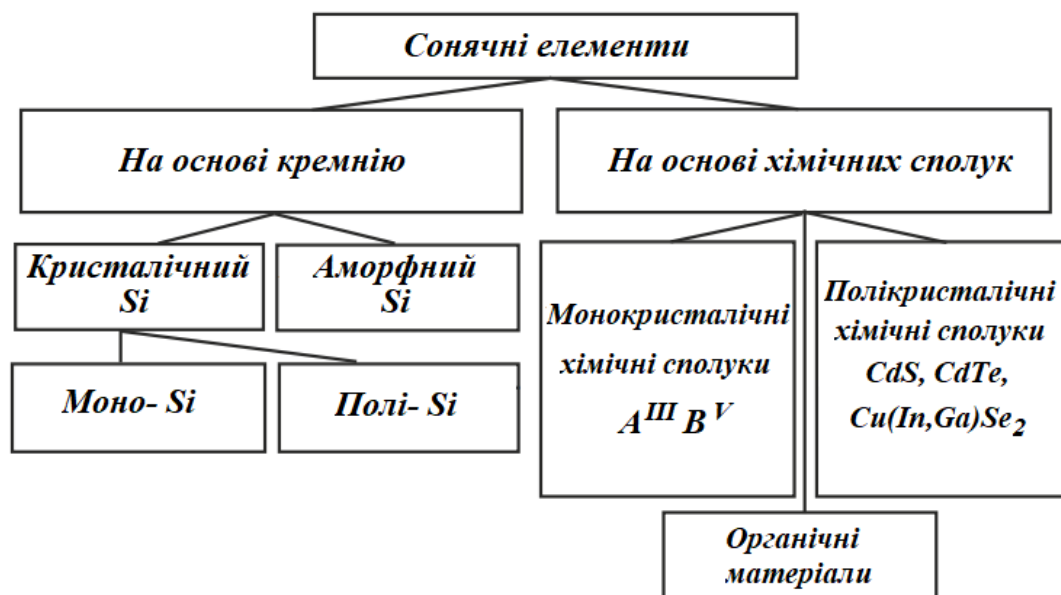


Рисунок 5.1 – Класифікація сонячних елементів за матеріалами

На даний час найбільша доля світового ринку, а саме понад 80%, припадає на ФЕП та модулі на основі кристалічного кремнію, що обумовлено розумним співвідношенням між їх ціновими, енергетичними та експлуатаційними показниками. Класифікація таких сонячних елементів здійснюється, виходячи з кристалічної структури кремнієвих пластин, що використовуються для виготовлення ФЕП. Згідно до цієї класифікації розрізняють *монокристалічні* (c-Si) та *полікристалічні* (poly-Si) кремнієві сонячні елементи.

Монокристал є структурою з суворо впорядкованим у просторі розташуванням атомів. На відміну від монокристалу, полікристал формується великою кількістю окремих кристалів нерегулярної форми, що зрослись поміж собою, так званих, *кристалітів*, причому просторовий порядок у розташуванні атомів порушується стрибком при переході від одного кристаліту до іншого. Зовнішній вигляд пластин моно- та полікристалічного кремнію представлено на рис. 5.2.

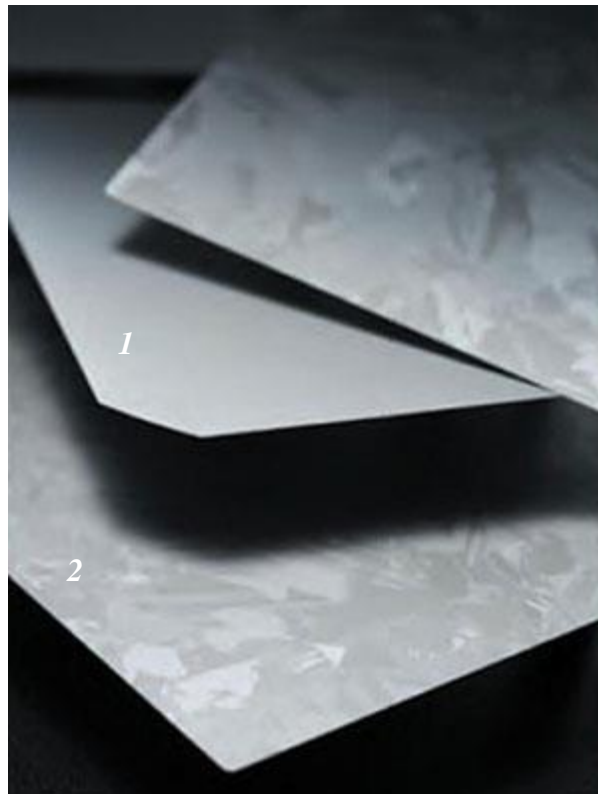


Рисунок 5.2 – Пластини монокристалічного (1) та полікристалічного (2) кремнію [29]

До полікристалічних ФЕП, в свою чергу, застосовують класифікацію за розміром кристалітів. У зв'язку з цим розрізняють *мульти-*, *полі-*, *мікро-* та *нанокристалічні* кремнієві ФЕП: при розмірах кристалітів від 1 до 100 мкм кремній називають мультикристалічним (mc-Si), від 1 до 1000 мкм – полікристалічним (pc-Si), менше 1 мкм – мікрокристалічним ( $\mu$ c-Si), порядку 1 нм – нанокристалічним (nc-Si).

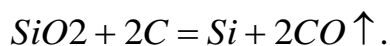


Інша класифікація кремнієвих сонячних елементів базується на товщині застосованого шару напівпровідника: вони можуть бути виготовлені як *на основі об'ємних кристалічних пластин* кремнію товщиною від 0,2 мм до 0,3 мм, так і у вигляді *тонких* (від одиниць до десятків мікрометрів) *плівки* кристалічного або аморфного кремнію, що наносяться на сторонню підкладку (так звані, *тонкоплівкові сонячні елементи*). Втім, тонкоплівкові ФЕП на основі аморфних шарів кремнію не відносяться до кристалічних і представляють окрему групу сонячних елементів (рис. 5.1).

## **5.2 Виготовлення пластин кристалічного кремнію для сонячних елементів**

Елементарний кремній отримують з природного кварцового піску – діоксиду кремнію  $\text{SiO}_2$ , що містить невелику кількість домішок.

Спочатку отримують *металургійний кремній* (MG-Si) шляхом відновлення діоксиду кремнію вугіллям в електродугових печах:



Втім, металургійний кремній містить велику концентрацію домішок, його чистота становить близько 98%, що цілком достатньо для використання в металургійній промисловості, але не задовольняє вимоги електронної промисловості та галузь фотовольтаїки. У зв'язку з цим, наступним етапом є хімічне очищення металургійного кремнію.

Найбільш поширеною технологією очистки кремнію є Siemens-процес, що полягає в дистиляції летких кремнієвих сполук з їх подальшим розкладанням до атомарного кремнію при високих температурах та його осадженням на стержень з моно- або полікристалічного кремнію (*затравку*). В результаті отримують *стрижні полікристалічного кремнію електронної якості* (EG-Si) чистотою понад 99,999%, які вже можуть застосовуватись в

технологічному процесі виготовлення *монокристалів* або *полікристалічних злитків* для потреб електронної промисловості та фотовольтаїки.

Втім, у сонячних елементах не завжди доцільно застосовувати кремній електронної якості. Так, високі ефективності перетворення неконцентрованого сонячного випромінювання досягаються і у ФЕП, виготовлених з кремнію, так званої, *сонячної якості* (SoG-Si) з меншою глибиною очищення від домішок, ніж кремній електронної якості, а отже, дешевшого. Чистота кремнію сонячної якості має становити не менше 99,99%. Він може бути отриманий з металургійного кремнію методами шлакового рафінування, хімічними методами або змішуванням доочищеного металургійного кремнію (UMG-Si) із залишками кремнію електронної якості (скрап, обрізки, некондиційні злитки).

Отриманий полікристалічний кремній з якістю, не меншою за SoG-Si, є матеріалом, з якого виготовляють монокристалічні або полікристалічні злитки для потреб фотовольтаїчної промисловості.

Монокристали кремнію для сонячних елементів найчастіше отримують з використанням *методу Чохральського* (рис. 5.3).

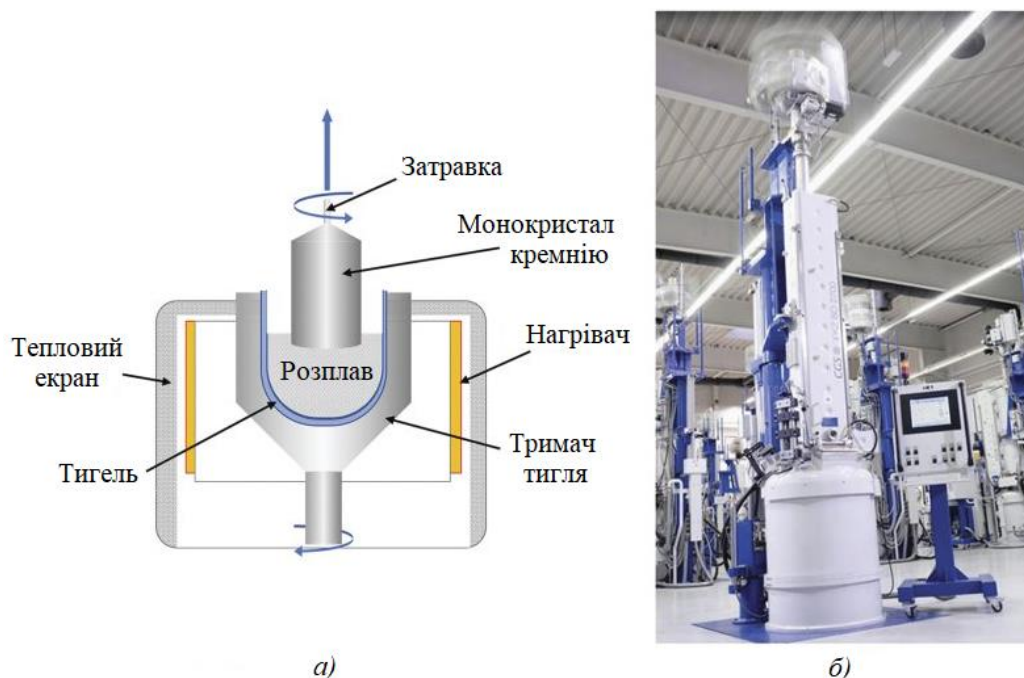


Рисунок 5.3 – Схема методу Чохральського (а) та вигляд установки для вирощування монокристалів за методом Чохральського (б) [31]

Розплавлений кремній високої чистоти з легуючою домішкою підтримується при температурі вище точки плавлення. Затравковий кристал занурюється в розплав і потім повільною витягується. По мірі витягування відбувається охолодження кремнію і він кристалізується на затравці, набуваючи кристалографічних властивостей, що задаються затравковим кристалом. Регулюючи температуру, швидкість витягування та частоту обертання затравки і тигля, можна керувати діаметром злитку, що кристалізується. Цим методом отримують монокристалічні злитки кремнію діаметром до 300 мм і довжиною до 2 м, що мають масу до 200 кг (рис. 5.4, б). Розплавлений кремній легують донорними або акцепторними домішками, щоб отримати відповідний тип провідності монокристалічного злитка.

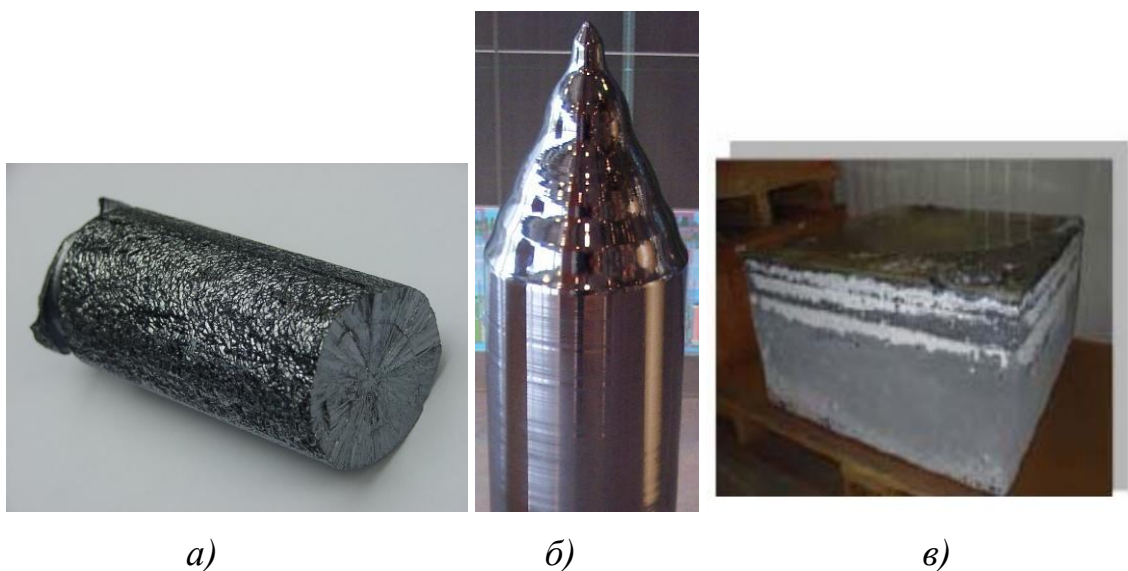


Рисунок 5.4 – Стрижень полікристалічного кремнію, отриманий у Siemens-процесі (а), монокристал кремнію, вирощений за методом Чохральського (б) та злиток мультикристалічного кремнію, виготовлений з використанням процесу направленої кристалізації (в)

Мультикристалічні злитки кремнію для сонячних елементів виготовляють з використанням процесу *направленої кристалізації* (рис. 5.5). Цей процес полягає у плавленні полікристалічного кремнію високої чистоти з наступною його кристалізацією у тиглі без використання еталонного кристала-

затравки, як у методі Чохральського. Відсутність затравки призводить до того, що при охолодженні розплаву в його об'ємі формується велика кількість центрів кристалізації, які поступово розростаються, утворюючи сукупність кристалітів, що зрослися. Отримані в такому процесі злитки мультикристалічного кремнію важать понад 800 кг (рис. 5.4, в).

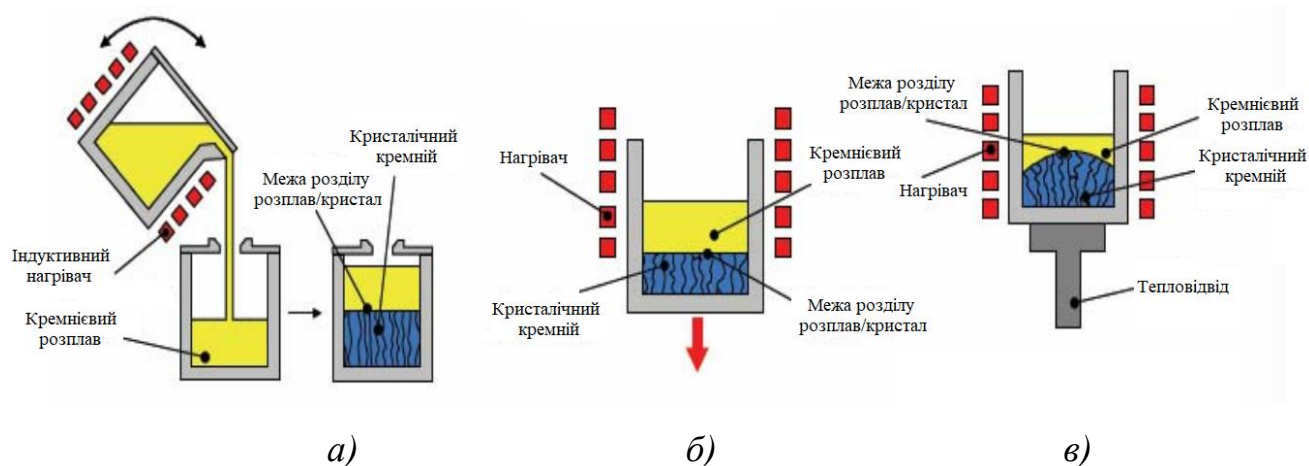


Рисунок 5.5 – Можливі варіанти реалізації процесу направленої кристалізації: метод лиття (а); метод Бріджмена (б) та метод теплообміну (в)

Монокристали або мультикристалічні кремнієві злитки необхідно розділити на пластини для подальшого виготовлення на їх основі сонячних елементів. Зазвичай, розмір цих пластин становить від 150 мм до 300 мм, а товщина – від 180 мкм до 250 мкм.

Технологічні стадії виготовлення кремнієвих пластин з монокристалів дещо відрізняються від тих, що застосовуються при використанні злитків мультикристалічного кремнію. Монокристал кремнію має круглий поперечний переріз, а отже, при безпосередньому його розрізанні отримуються пластини круглої форми. Така форма кремнієвих пластин та ФЕП на їх основі не є раціональною, оскільки не дозволяє максимально компактно заповнити сонячними елементами наявну площу модуля, залишаючи значні ділянки, не задіяні у генерації електричної енергії. Щоб мінімізувати цю проблему монокристалічні кремнієві ФЕП виготовляють у формі псевдоквадрата

(рис. 3.20) – квадрата із заокругленими кутами. Для цього перед розрізанням кристалу на пластини йому надають форму псевдопаралелепіеда (рис. 5.6), обрізаючи з чотирьох боків заокруглені частини алмазним диском або дротом з абразивом. Такий монокристал кремнію вже може використовуватись для нарізання з нього пластин.

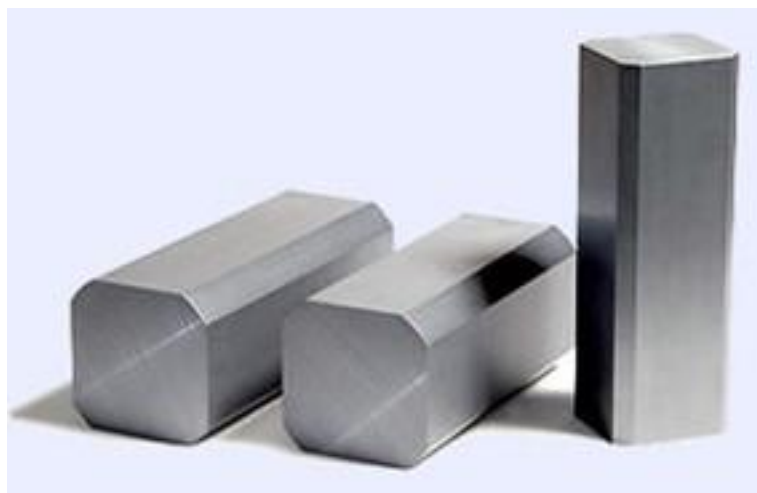


Рисунок 5.6 – Монокристал кремнію у формі псевдопаралелепіеда

У випадку мульткристалічного кремнію його злитки вже мають форму паралелепіеда (рис. 5.4, в). Зовнішні краї цього злитку обрізають, щоб видалити ті його частини, що під час кристалізації контактували з матеріалом тигля, а отриманий блок нарізають на менші паралелепіеди квадратного поперечного перерізу з розмірами 150×150 мм, 170×170 мм або 200×200 мм, з яких в подальшому і виготовляють пластини.

Нарізання злитків на пластини здійснюється, зазвичай, за допомогою сталевого дроту (рис. 5.7). Використовують дріт товщиною від 100 до 140 мкм з зафіксованим на його поверхні алмазним абразивом або з надходженням абразивної суспензії до зони різання.

Незважаючи на уявну простоту, процес нарізання злитків на пластини є відповідальним етапом, оскільки від його досконалості залежить рівень втрат кремнію у вигляді крихти, що безпосередньо позначається на вартості пластин. Рівень втрат напівпровідникового матеріалу під час різання є доволі високим і

може становити від 30% до 50% від початкової маси злитку в залежності від діаметру дроту: чим менший діаметр дроту, тим меншими будуть втрати матеріалу.

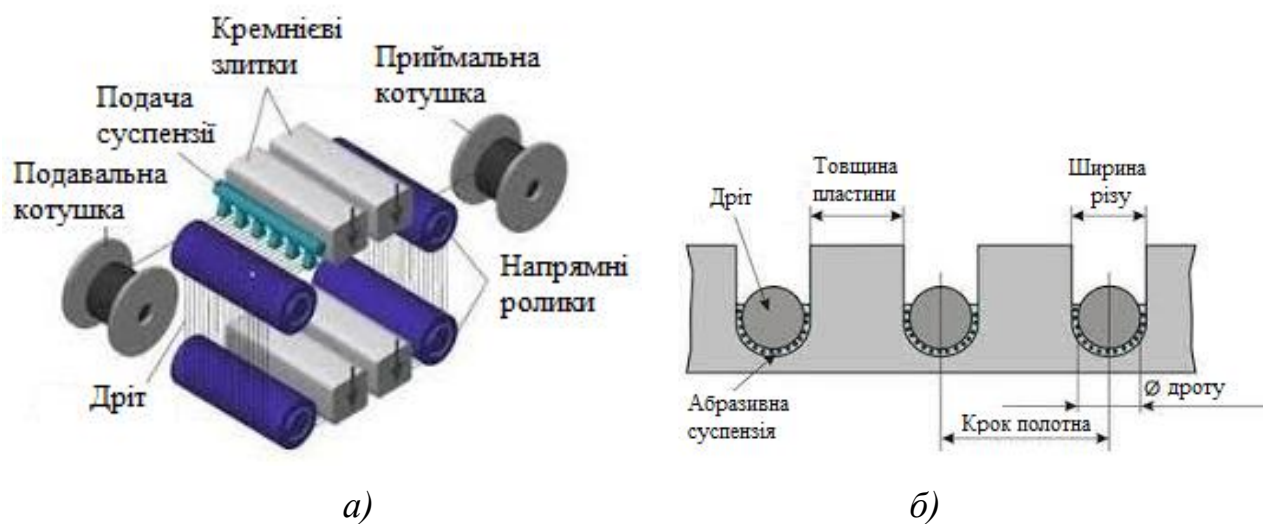


Рисунок 5.7 – Будова верстата для різання злитків на пластини (а) та схема процесу різання дротом (б)

На сьогодні розроблено низку методів з уловлення і повторної переробки крихти кремнію, що дозволило зменшити собівартість пластин. Окрім того, застосовується технологія виготовлення кристалів кремнію у формі стрічок або полих призм із заміною механічного різання лазерним на етапі формування пластин потрібного розміру. Втім, ця технологія не знайшла поки що широкого розповсюдження з комерційних причин.

Основна маса кремнієвих пластин для сонячних елементів, що випускається на даний час промисловістю, має провідність р-типу за рахунок легування бором. На основі пластин n-типу також виготовляють високоефективні сонячні елементи, але отримання великих кристалів кремнію з рівномірним розподілом концентрації донорної домішки по довжині злитку є складнішою технологічною задачею в порівнянні з випадком легування бором.



## 5.3 Конструкції сонячних елементів на основі кристалічного кремнію

### 5.3.1 Класичний сонячний елемент

Класичний ФЕП, конструкція якого представлена на рис. 5.8, створений на основі кремнієвої пластини з провідністю р-типу. Фронтальна область такого сонячного елемента (емітер) створюється дифузійним способом і пасивується тонким шаром діелектрика, таким як  $\text{SiN}_x$ , який одночасно виконує роль і пасивуючого, і антивідбиваючого покриття. У випадку використання монокристалічних пластин кремнію, фронтальна поверхня ФЕП текстурується, що спільно з антивідбиваючим шаром ефективно зменшує втрати на відбивання сонячного випромінювання.

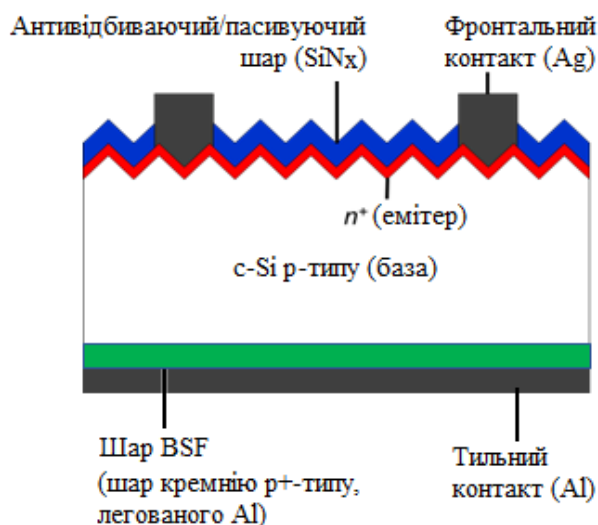


Рисунок 5.8 – Сонячний елемент класичної конструкції [32]

Тильна поверхня кремнієвої пластини не пасивується діелектриком. Втім, зменшення рекомбінаційних втрат на цій поверхні досягається створенням вбудованого поля (BSF) в приповерхневому шарі за рахунок легування кремнію під час дифузії алюмінію в процесі впалювання суцільного тильного алюмінієвого контакту.

Сонячні елементи такої конструкції домінували на ринку фотовольтаїки приблизно до середини 2010-х років завдяки порівняно простій технології виготовлення, невисокій собівартості виробництва на автоматизованих лініях і достатньо високій ефективності перетворення сонячного випромінювання, що сягає 19% для серійних зразків.

### 5.3.2 Сонячний елемент PERC

ФЕП із пасивованим тильним контактом, або PERC (Passivated Emitter Rear Contact), є одним з найпоширеніших у сучасній фотоелектричній промисловості (рис. 5.9). Ця технологія була запропонована досить давно, у 80-х роках минулого сторіччя, а потім вдосконалена у 90-х роках. Широко ж розгорнута більшістю великих виробників фотовольтаїчної продукції лише близько 2019 року.

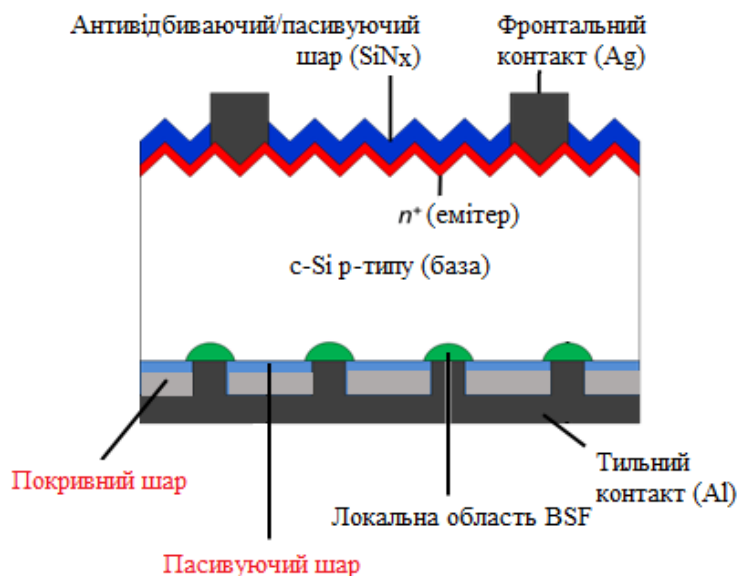


Рисунок 5.9 – Сонячний елемент PERC (червоним кольором позначено головні відмінності від ФЕП класичної конструкції) [32]

У сонячному елементі PERC як фронтальна, так і тильна поверхня пасивуються шарами діелектриків. У тильному діелектричному шарі за



допомогою лазерної обробки відкриваються невеликі отвори, щоб метал міг контактувати з тильною поверхнею напівпровідника. В процесі впалювання контактів в межах цих отворів відбувається дифузія алюмінію в кремній і формуються локальні області BSF (рис. 5.9).

Порівняно із класичними кремнієвими ФЕП, сонячний елемент PERC дозволяє досягти більшої ефективності, головним чином, за рахунок наявності в його конструкції додаткового пасивуючого діелектричного шару на тильній поверхні. Пасивація тильної поверхні запобігає рекомбінації неосновних носіїв заряду, що генерується в результаті поглинання довгохвильового випромінювання глибоко в базі поблизу поверхні. Окрім того, шар тильного діелектрика разом з алюмінієвим контактом формують дзеркало, що відбиває світло з великою довжиною хвилі назад до базової області, створюючи умови для його поглинання та збільшуючи тим самим фотострум. Це дозволяє підвищити ефективність сонячних елементів PERC на понад 1% в порівнянні з ФЕП класичної конструкції, досягнувши значень ККД серійної продукції на рівні 20 – 21%.

### **5.3.3 Сонячний елемент PERT**

Сонячний елемент PERT містить в своїй назві аббревіатуру від англійської Passivated Emitter Rear Totally Diffused (пасивований тильний шар з дифузією по всій поверхні). Останнім часом цей сонячний елемент привертає до себе все більшу увагу як з боку науково-дослідних установ, так і зі сторони представників фотоелектричної промисловості. Це обумовлено тим, що найбільш розповсюджена на сьогодні конструкція PERC наближається до своєї граничної межі в ефективності перетворення сонячного випромінювання, і дослідники проводять інтенсивний пошук інших конструкцій і промислово придатних технологій, щоб забезпечити подальше підвищення ефективності кремнієвих сонячних елементів.

Конструкція сонячного елемента PERT на основі пластини кремнію з

електронною провідністю представлена на рис. 5.10.

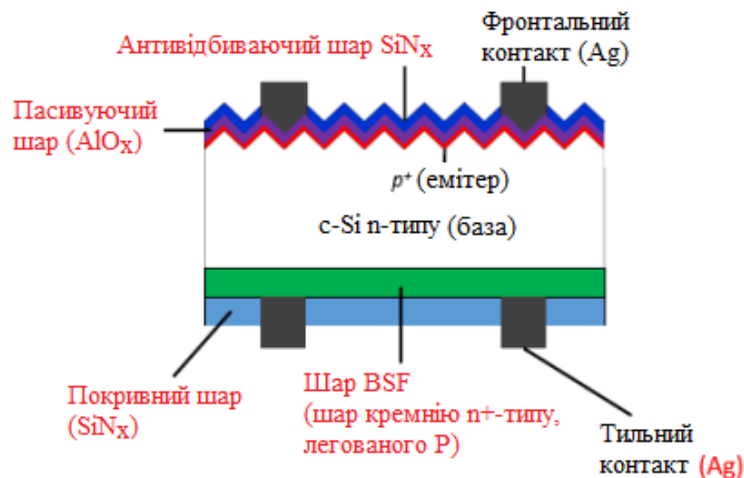


Рисунок 5.10 – Сонячний елемент PERT (червоним кольором позначено головні відмінності від сонячного елемента PERC) [32]

На відміну від структури PERC, яка має області BSF, локалізовані на окремих ділянках тильної поверхні, у сонячного елемента PERT сформовано суцільний шар тильного вбудованого поля, який створюється за рахунок дифузії фосфору (якщо використовується пластина кремнію n-типу) або бору (якщо пластина має провідність p-типу). Це дозволяє більш ефективно відштовхувати неосновні носії заряду від тильної поверхні, зменшуючи тим самим рекомбінаційні втрати.

Зазвичай технологія PERT реалізується на пластинках кремнію з провідністю n-типу, оскільки вони є більш стійкими до присутності сторонніх домішок, демонструють нижчі температурні коефіцієнти та менш схильні до деградації, викликані світлом, ніж пластини кремнію p-типу. Нижчу індуковану світлом деградацію сонячних елементів, виготовлених на основі пластинок кремнію n-типу, пов'язують з меншою концентрацією комплексів бор – кисень, оскільки кремній електронного типу провідності, що застосовується для виготовлення ФЕП, легується фосфором, а не бором.

Незважаючи на більш ефективну пасивацію тильної поверхні суцільним

шаром BSF, його наявність в конструкції сонячних елементів PERT потребує введення в технологічний процес виготовлення ФЕП додаткових операцій, таких як високотемпературна дифузія. В результаті цього сонячний елемент PERT є дорожчим у виробництві, ніж PERC, але має більший ККД, що сягає 22%.

#### **5.3.4 Сонячний елемент TOPCON**

Сонячний елемент TOPCON (Tunnel Oxide Passivated Contact), також відомий, як ФЕП з пасивованим контактом, позиціонується як наступне покоління сонячних елементів після PERC. Ця конструкція була представлена дослідниками з Інституту сонячної енергії Фраунгофера (Німеччина) в 2013 році.

В порівнянні з іншими потенційно новими технологіями, такими як HJT, у випадку впровадження у виробництво технології TOPCON можна достатньо легко оновити наявні виробничі лінії, задіяні у виробництві сонячних елементів PERC або PERT. Як наслідок цього, для виробників сонячних елементів PERC або PERT, які хочуть модернізувати свої існуючі виробничі лінії, необхідні менші капіталовкладення. Крім того, сонячні елементи TOPCON є більш ефективними і демонструють ККД перетворення сонячного випромінювання, вищий приблизно на 1% за абсолютним значенням.

На рис. 5.11 показано конструкцію сонячного елемента TOPCON на основі пластини монокристалічного кремнію n-типу. Ця конструкція має багато спільного з конструкцією сонячного елемента PERT (рис. 5.10) і відрізняється від останньої лише наявністю додаткового ультратонкого шару  $\text{SiO}_2$  і сильно легованого шару полікристалічного кремнію на тильній поверхні.

Ультратонкий шар  $\text{SiO}_2$  діє як пасивуюче покриття між тильною поверхнею бази і шаром полікристалічного кремнію, що, фактично, виконує роль тильного контакту. Шар  $\text{SiO}_2$  має бути достатньо тонким, щоб забезпечити тунельний механізм проходження струму крізь нього.

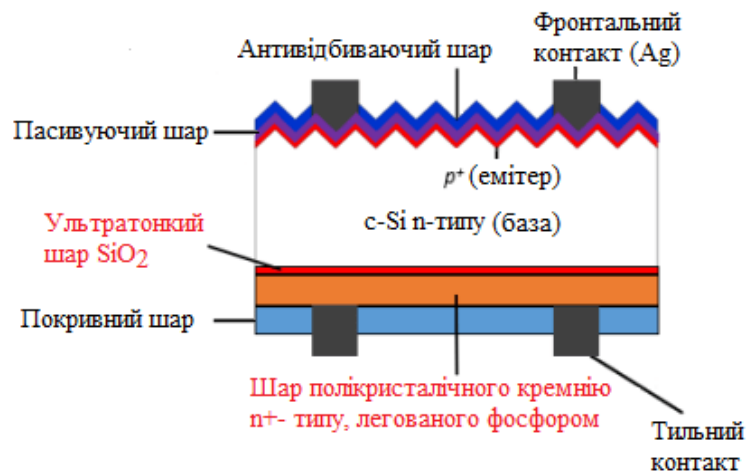


Рисунок 5.11 – Сонячний елемент TOPCON (червоним кольором позначено головні відмінності від сонячного елемента PERT) [32]

Сильно легований шар полікристалічного кремнію з високою провідністю виконує роль суцільного тильного контакту для ефективного збирання струму. Одночасно цей шар, маючи провідність  $p^+$ -типу, пасивує тильну поверхню за рахунок створення вбудованого поля BSF, подібно до легованого фосфором  $p^+$ -шару в елементі PERT.

Ефективність сонячних елементів TOPCON становить понад 22%.

### 5.3.5 Сонячний елемент НІТ

НІТ — це аббревіатура від англійської Hetero-Junction Solar Cell with Intrinsic Thin-Layer (сонячний елемент із гетеропереходом з тонким внутрішнім шаром). Сонячний елемент НІТ був розроблений японською компанією Sanyo Electric у 1980-х роках, а потім придбаний компанією Panasonic у 2010-х.

Поряд з такими конструкціями, як PERT і TOPCON, сонячні елементи НІТ вважаються ще одним потенційним наступником технології PERC. Так, завдяки меншій кількості етапів в технології виготовлення елементів НІТ і значно нижчій температурі технологічного процесу, ця конструкція дозволяє

спростити виробничі лінії в порівнянні з тими, що на даний час використовуються в технології PERC.

Сонячний елемент НІТ, конструкція якого представлена на рис. 5.12, демонструє високу ефективність завдяки наявності внутрішніх шарів аморфного гідрогенізованого кремнію ( $a\text{-Si:H}$ ), що відрізняється високим коефіцієнтом поглинання сонячного випромінювання і забезпечує ефективну пасивацію як фронтальної, так і тильної поверхні пластини монокристалічного кремнію.

Використання плівки ІТО (прозора для видимого світла плівка оксиду індію і олова з високою електропровідністю) в якості прозорого фронтального контакту покращує збирання струму, і одночасно діє як антивідбиваючий шар. Крім того, осадження плівки ІТО здійснюється шляхом розпилення при порівняно низьких температурах, що дозволяє уникнути перекристалізації шару аморфного кремнію і зміни його властивостей в процесі виготовлення сонячного елемента.

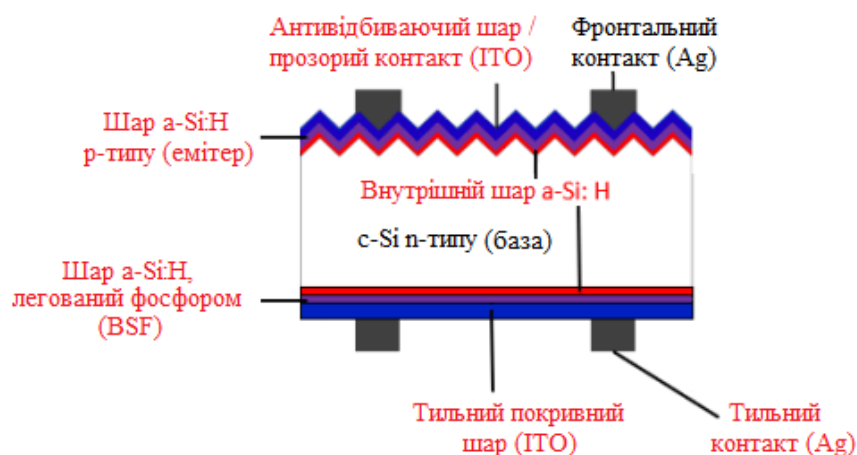


Рисунок 5.12 – Сонячний елемент НІТ (червоним кольором позначено головні відмінності від сонячного елемента PERC) [32]

Порівняння сонячного елемента НІТ (рис. 5.12) з елементом PERC (рис. 5.9) вказує на суттєву різницю в їх конструкціях, а тому налагодження промислового виробництва елементів НІТ на існуючих виробничих

потужностях PERC потребуватиме значного технічного переоснащення. Отже, технологія НІТ вимагатиме значних капіталовкладень у нове обладнання для початку масового виробництва.

Окрім того, як і у випадках з багатьма іншими новими технологіями, довгострокова стабільність роботи сонячних елементів НІТ все ще оцінюється. Також існує проблема, пов'язана з сприйнятливістю шару аморфного кремнію до високотемпературних процесів.

Втім, незважаючи на вказані проблеми, НІТ залишається привабливою технологією, що здатна забезпечити ефективність сонячних елементів понад 23%. Слід також зазначити, що сонячні елементи НІТ, як і елементи TOPCON та PERT, завдяки відсутності суцільного шару металізації тильного контакту придатні для виготовлення на їх основі модулів з двосторонньою чутливістю, які забезпечують ефективну утилізацію розсіяної складової сонячного випромінювання, що надходить до тильної поверхні.

### **5.3.6 Сонячний елемент ІВС**

Всі розглянуті вище конструкції кремнієвих сонячних елементів містять лицьовий контакт до емітерного шару, а отже, характеризуються ненульовими втратами на затінення приймальної поверхні контактною сіткою. В сонячному ж елементі ІВС (Interdigitated Back Contact) контактні доріжки як до емітерної, так і до базової областей винесені на тильну поверхню (рис. 5.13), в результаті чого оптичні втрати значно зменшуються і зводяться лише до втрат на відбивання випромінювання від приймальної поверхні.

Конструкція сонячного елемента ІВС представлена на рис. 5.14. В такому ФЕП локальні емітерні області чергуються з базовими та сильно легованими областями BSF, розташовуючись вздовж тильної поверхні з певним кроком  $h_p$ . На фронтальній поверхні методом дифузії створюється суцільний високолегований шар кремнію, що формує вбудоване поле, яке запобігає рекомбінаційним втратам на лицьовій поверхні та спрямовує неосновні носії

заряду в напрямку до емітера. Для підвищення коефіцієнта збирання носіїв заряду базова область виконується потоншеною: товщина пластини кремнію в таких сонячних елементах становить близько 190 мкм, що сприяє також зменшенню їх вартості.

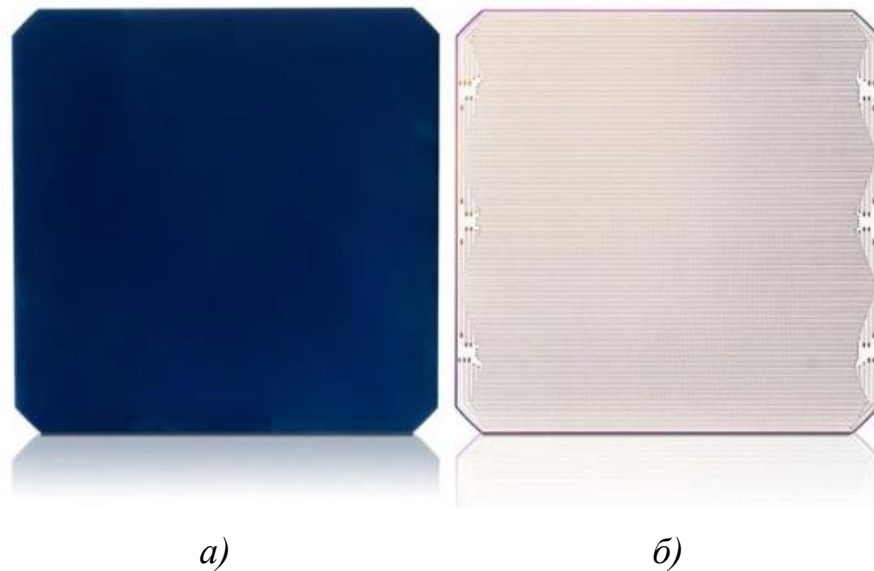


Рисунок 5.13 – Зовнішній вигляд фронтальної (а) та тильної (б) поверхонь сонячного елемента ІВС [33]

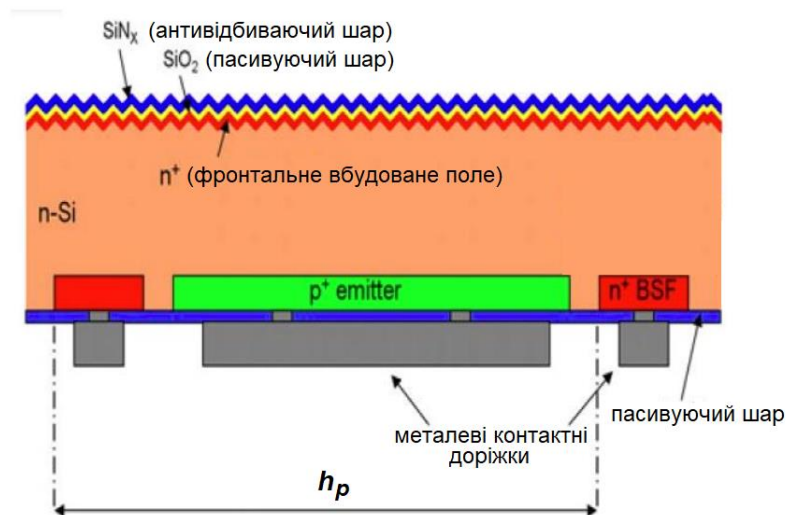


Рисунок 5.14 – Конструкція сонячного елемента ІВС [33]

Винесення контактів на тильну поверхню в сонячних елементах ІВС дозволяє не лише повністю ліквідувати втрати на затінення приймальної

поверхні контактною сіткою, а й надає можливість роздільної мінімізації оптичних та електричних втрат, оскільки відпадає необхідність пошуку компромісу між цими втратами, як це має місце в інших конструкціях ФЕП, де потрібно оптимізувати параметри фронтальної контактної сітки. Завдяки цьому вдається суттєво зменшити контактний опір сонячних елементів ІВС і досягти ефективності понад 23%.

#### **5.4 Типова технологія виготовлення сонячних елементів на основі кристалічного кремнію**

Виготовлення сонячних елементів на основі пластин кристалічного кремнію може здійснюватися з використанням різних технологічних підходів і, відповідно, обладнання, що застосовуються на окремих стадіях виробництва. Так, для формування р-n- переходу в кремнії можуть використовуватись методи термічної дифузії, епітаксії або іонної імплантації. Нанесення металевих контактів до ФЕП також може бути реалізоване декількома способами: трафаретним друком (шовкографією), розпиленням у вакуумі, хімічним або електрохімічним методом. Для видалення ділянок напівпровідникових та діелектричних шарів можуть застосовуватись методи хімічного, плазмового травлення, лазерної обробки.

При виборі тієї чи іншої технології для масового виробництва, за умов однакового технічного результату, зважають на показники економічного характеру, як-то: продуктивність обраного методу, його придатність до інтеграції в автоматизовані лінії, вартість технологічного обладнання, енергоспоживання, тощо. Врахування такого комплексу техніко-економічних показників для зменшення собівартості готової продукції призвело до порівняно усталеного технологічного процесу виготовлення ФЕП на основі кристалічного кремнію, який містить в собі наступні основні технологічні стадії:

- хімічна обробка пластин;



- формування дифузійного р-n- переходу;
- плазмохімічне травлення торців;
- формування антивідбиваючого шару;
- формування контактної металізації;
- тестування / сортування готової продукції.

Розглянемо ці технологічні етапи детальніше.

#### **5.4.1 Хімічна обробка пластин**

Після розрізання злитків пластини кремнію мають поверхню, пошкоджену на мікроскопічному рівні. Цей порушений шар видаляють за допомогою хімічного травлення в розчинах кислот, в результаті чого пластина стає дзеркальною, маючи коефіцієнт відбивання близько 35%.

З метою зменшення коефіцієнту відбивання пластин монокристалічного кремнію до рівня близько 10 - 11% їх текстурують, створюючи розвинений на мікрорівні регулярний рельєф поверхні у вигляді пірамід. Для текстурування застосовується травлення монокристалічних пластин в лужних розчинах і одна або кілька кислотних обробок. При цьому варто не допустити істотного зменшення товщини пластин, оскільки це може призвести до механічного їх розколювання на наступних технологічних стадіях і, як наслідок, до зниження відсотка виходу придатних виробів. Пластини мультикристалічного кремнію не текстуруються.

Після проведення всіх необхідних хімічних операцій пластини ретельно промиваються водою і сушаться. Від якості промивання і сушки залежать параметри дифузійного шару, що створюється на наступній технологічній стадії.

#### **5.4.2 Формування дифузійного р-n- переходу**

Зазвичай у виробництві сонячних елементів класичної конструкції

використовуються вихідні пластини кремнію з провідністю р-типу, леговані бором. Для створення в них емітерного n-шару необхідно в одну з поверхонь впровадити донорну домішку, наприклад, фосфор, перекомпенсувавши наявну в пластині концентрацію атомів бору.

Одним з найбільш економічно обґрунтованих способів створення легованих фосфором тонких поверхневих шарів кремнію є термічна дифузія, під час якої атоми фосфору під дією високих температур проникають в напівпровідник. Традиційно дифузію фосфору проводять у конвеєрних або трубчастих печах (рис. 5.15) при температурах 800 - 900 °С.



Рисунок 5.15 – Трубчаста піч для термодифузії [30]

У випадку застосування конвеєрних печей, кремнієві пластини поміщають на стрічку, а речовина, що містить фосфор (*дифузант*), наноситься на поверхню шляхом розпилення. Після цього пластини конвеєром переміщуються у високотемпературну зону, де і відбувається дифузія.

При використанні трубчастої печі кремнієві пластини попередньо розміщують в кварцові касети. Підготовлені касети переміщують у високотемпературну зону реактора печі, заповненого азотом і парами дифузанта – оксихлориду фосфору  $POCl_3$ . Керуючи потоком газів всередині реактора, температурою, а також тривалістю перебування в ньому кремнієвих

пластин, формують р-n- перехід з необхідними властивостями.

В результаті дифузії фосфору на поверхні і торцях кремнієвої пластини формується шар n-типу, що проникає на глибину, меншу за 0,5 мкм. Окрім того, внаслідок протікання високотемпературних хімічних реакцій на поверхні пластини кремнію утворюється шар  $\text{SiO}_2$ , насичений фосфором, так зване, фосфоросилікатне скло, яке потрібно видалити з поверхні перед здійсненням наступних технологічних операцій.

Видалення фосфоросилікатного скла здійснюють хімічним методом, занурюючи пластини кремнію у розчин фтористоводневої кислоти  $\text{HF}$ , після чого пластини ретельно відмивають водою та сушать.

### **5.4.3 Плазмохімічне травлення**

Конструкція сонячного елемента передбачає наявність р-n переходу лише з боку фронтальної поверхні. Емітерний n-шар, сформований під час дифузії, має високу концентрацію домішок, а отже, й доволі високу електропровідність. Втім, під час дифузії цей шар утворюється не лише на фронтальній стороні пластини, але й на її торцях і по периметру тильної поверхні, навіть, якщо пластини були щільно притиснуті одна до одної тильними сторонами. Якщо не прийняти з цього приводу ніяких заходів, то через цей високолегований шар відбудеться електричне замикання між лицьовим і тильним контактами після їх формування, і сонячний елемент буде непридатним до застосування.

Зазвичай цю проблему вирішують шляхом фізичного видалення дифузійного шару з торців пластин. Зробити це можна механічною, лазерною, хімічною обробкою або плазмохімічним травленням. Кожен з цих методів має низку переваг і недоліків, але одним з найбільш раціональних прийнято вважати плазмохімічне травлення.

Операція плазмохімічного травлення являє собою обробку стопки щільно притиснутих одна до одної кремнієвих пластин в потоці іонізованих

хімічно активних часток, сформованих у газовому розряді. Хімічно активні частки взаємодіють з торцевими поверхнями пластин з утворенням летких сполук кремнію. Ці леткі сполуки видаляються з зони реакції вакуумною системою установки.

Процес видалення кремнію з торців пластини залежить від багатьох факторів, серед яких – тривалість обробки, склад плазми, напрямок потоків іонів в реакторі, місце розташування і щільність прилягання пластин, розмір стопки та інше. При відхиленні від оптимальних режимів плазмохімічної обробки можливе отримання двох протилежних результатів: дифузійний n-шар на торцях пластин не видалився повністю, а отже, замикання сонячного елемента по торцях після формування контактів зберігається; дифузійний шар видалився не лише на торцях пластини, але й по периметру лицьової і тильної поверхонь (рис. 5.16), отже після нанесення фронтальної металізації відбудеться замикання p- і n-областей в місці їх контакту на лицьовій поверхні.



Рисунок 5.16 – Пластина монокристалічного кремнію з видаленим по периметру дифузійним шаром на лицьовій поверхні [29]

В першому випадку проблема вирішується повторним плазмохімічним травленням торців, а у другому – необхідне повне стравлювання n-шару з усієї поверхні пластини, після чого її знову можна буде відправити на початкові технологічні операції. При цьому повторне текстурування пластини неминуче призводить до зменшення її товщини, тобто зростає ризик механічного

ушкодження пластин на подальших технологічних операціях, а додаткові обробки і зменшений вихід придатних виробів істотно погіршує економічні показники виробництва.

#### 5.4.4 Формування антивідбиваючого шару

Як зазначалось вище, текстурування поверхні кремнієвих пластин дозволяє зменшити коефіцієнт відбивання в середньому з 35% до 10 - 11%. З метою ще більшого зниження оптичних втрат на фронтальну поверхню пластин додатково наноситься шар антивідбиваючого покриття. Товщина і показник заломлення покриття обираються так, що коефіцієнт відбивання світла від фронтальної поверхні зменшується до приблизно 2 - 3%.

Антивідбиваючі покриття у вигляді тонких діелектричних плівок таких матеріалів, як  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiN}_x$ ,  $\text{TiO}_2$ , можуть наноситись декількома різними методами хімічного осадження з газової фази (CVD – Chemical Vapor Deposition), наприклад, хімічним осадженням при атмосферному тиску (APCVD), осадженням при низькому тиску (LPCVD), з активацією плазмою (PECVD), тощо. Найчастіше в якості антивідбиваючого покриття для кремнієвих сонячних елементів використовуються плівки оксиду титану або нітриду кремнію, причому останньому все частіше надається перевага.

Нітрид кремнію зазвичай наноситься методом PECVD, тобто плазмовим хімічним осадженням з газової фази, у спеціальних трубчастих печах (рис. 5.17). Процес PECVD полягає в тому, що хімічний реактив, потрапляючи в зону реактора, під впливом плазми і високої температури розпадається на окремі хімічні елементи, які потім осідають на поверхні пластини і вступають там в хімічну реакцію один з одним. В результаті на фронтальній поверхні формується тонка плівка нітриду кремнію з необхідними оптичними властивостями. Її товщина становить близько 70 нм, що набагато менше за розміри мікропірамід текстури і дозволяє добитися антивідбиваючого ефекту незалежно від рельєфу поверхні.



Рисунок 5.17 – Установа для плазмового хімічного нанесення шарів антивідбиваючого покриття [29]

Товщина антивідбиваючого покриття оптимізована таким чином, щоб найбільш ефективно поглинати спектральний діапазон сонячного випромінювання, до якого максимально «чутливий» даний напівпровідник. У випадку пластин кристалічного кремнію забезпечуються умови для ефективного поглинання довгохвильової частини видимого діапазону сонячного спектру, а частково відбиваються від плівки переважно короткі хвилі, довжина яких відповідає синій частині спектра. Через це кремнієві сонячні елементи в переважній своїй більшості мають поверхню темно-синього кольору.

Застосування методу PECVD забезпечує високу рівномірність товщини покриття по площі пластини, індикатором чого є рівномірне забарвлення при переході від однієї точки поверхні до іншої. Існують і альтернативні методи формування антивідбиваючих плівок, наприклад такі, що передбачають попереднє нанесення розчину на поверхню пластини. Втім, такі способи не дозволяють досягти високої рівномірності товщини покриття на текстурованих поверхнях, оскільки рідина накопичуватиметься в просторі поблизу підніжжя пірамід, що призводить до утворення ділянок з більшою товщиною плівки, ніж в околицях вершин пірамід і погіршує оптичні характеристики сонячного елемента. У випадку ж пластин мульткристалічного кремнію, які не

підлягають текстуруванню, використання методів, що передбачають попереднє нанесення хімічних розчинів, дає цілком прийнятні результати.

#### **5.4.5 Формування контактної металізації**

Наступним етапом після нанесення шару ативідбиваючого покриття є формування контактів на фронтальній і тильній поверхнях сонячного елемента.

*Фронтальна контактна металізація кремнієвих ФЕП.* Фронтальні контакти сонячних елементів формуються, зазвичай, у вигляді сітки, яка складається з 2 - 3 достатньо широких контактних шин і декількох десятків тонких доріжок, призначених для збирання струму з емітерного шару.

При виборі конструкції фронтального контакту та оптимізації його геометричних параметрів розробникам доводиться вирішувати два протилежні завдання. По-перше, для зниження оптичних втрат, викликаних затіненням робочої поверхні металом, доріжки контактної сітки намагаються виконати якомога більш тонкими і розташувати їх якнайдалі одна від одної. По-друге, оскільки емітерний шар має певний електричний опір, який визначається режимами формування р-n- переходу під час дифузії, то при великій відстані між доріжками контактної сітки зростає послідовний опір сонячного елемента, що призводить до збільшення електричних втрат. Аналогічна ситуація і з шириною доріжок – чим тонша лінія, тим краще з точки зору оптичних втрат, але тим більший електричний опір такого контакту. На ширину доріжок також впливає і сам спосіб формування металізації, який має певні обмеження щодо мінімальної ширини доріжки. Так, сформувати контакт шириною 100 мкм можна із застосуванням доволі простих і недорогих у реалізації способів, а ось для створення доріжки шириною менше 10 мкм потрібно застосовувати більш складні, а отже, й дорожчі у виробництві методи із залученням фотолітографії.

Для нанесення фронтальної контактної сітки кремнієвих ФЕП широко використовують метод трафаретного друку (шовкографію), який є порівняно простим та недорогим у реалізації і дозволяє знизити вартість сонячного

елемента. Суть цього методу полягає в тому, що за допомогою так званого ракеля (гумового бруска) через дрібну сітку трафарету на поверхню кремнієвої структури продавлюється паста (рис. 5.18), до складу якої входять металеві кульки, флюс і різні сполучні добавки. На трафареті попередньо сформований малюнок, що задає місця, в яких паста повинна бути нанесена на пластину, а в яких — ні (рис. 5.19, а).

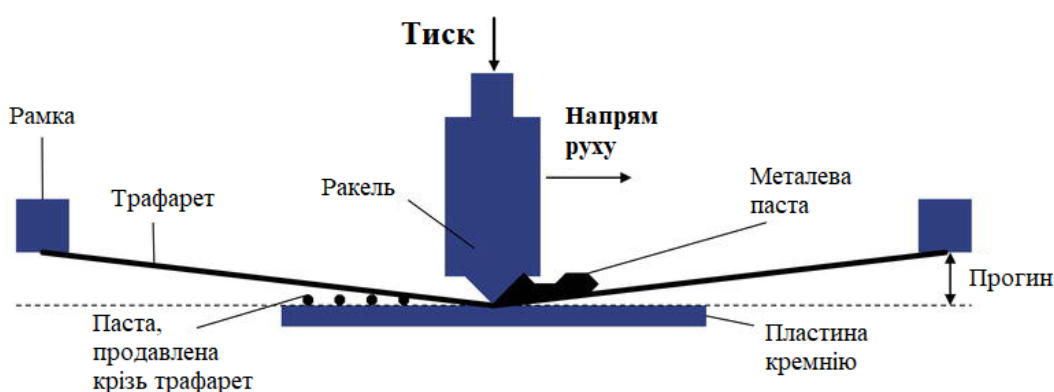


Рисунок 5.18 – Схема процесу трафаретного друку контактів [30]

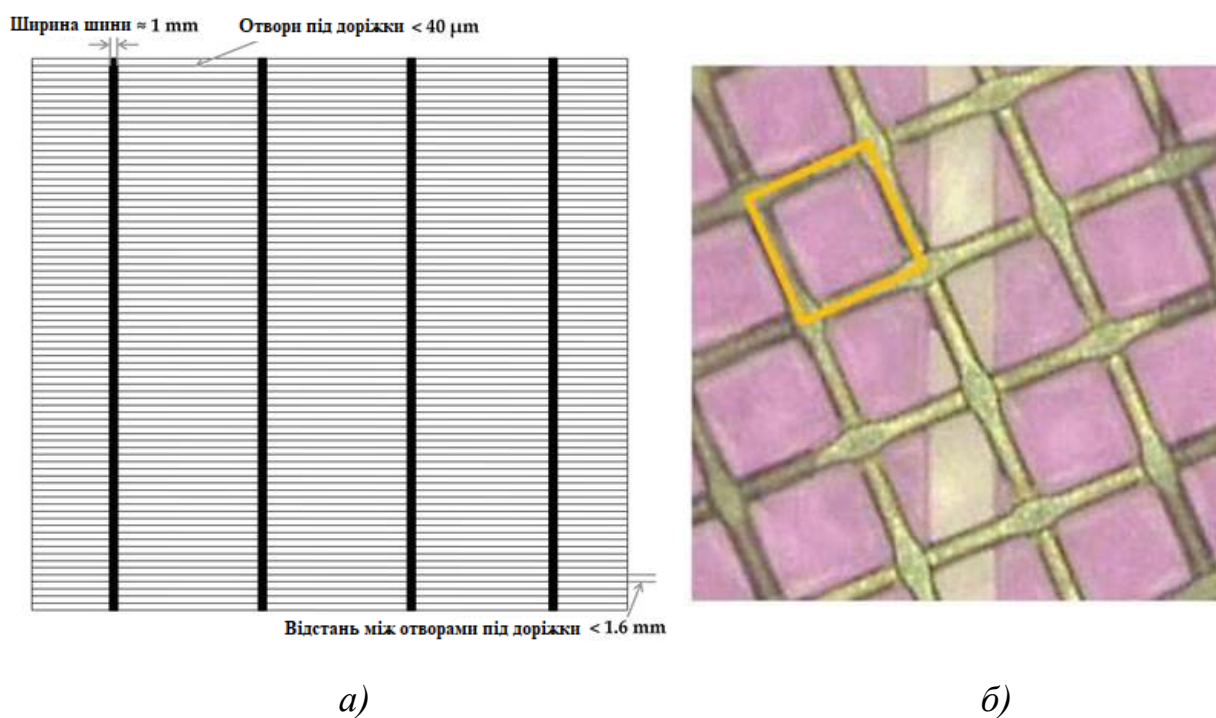


Рисунок 5.19 – Зовнішній вигляд трафарету для друку контактів (а) та збільшене зображення сітки, на якій його сформовано (б) [30]



Трафаретний друк контактів здійснюється на спеціальних верстатах, які називають *принтерами* (рис. 5.20). Після нанесення паста підсушується, і пластина надходить в піч для впалювання контактів, де при температурі понад 800 °С метал впікається в поверхню напівпровідникової структури.



Рисунок 5.20 – Принтер для трафаретного друку контактів [29]

Оскільки паста містить достатньо тверді компоненти, то для збільшення зносостійкості застосовуються трафарети, виконані на металевих сітках (рис. 5.19, б). Ширина тонких доріжок контактної металізації висуває певні вимоги до параметрів сітки, в якій зазвичай сформовано від 165 до 325 отворів на кожен дюйм. Це дозволяє отримувати доволі тонкі контактні доріжки з точністю позиціонування на поверхні не гірше 10 мкм.

Для формування лицьової металізації сонячних елементів використовуються багатокомпонентні паста на основі срібла. Тип паста та її властивості є важливими з точки зору отримання високих параметрів готових сонячних елементів. Лише завдяки технічним поліпшенням паст виробникам вдалося підвищити ефективність ФЕП на 1 - 1,5% в абсолютному вимірі.

Ще один важливий момент пов'язаний з технологічними режимами впалювання фронтальних контактів. Р-п- перехід в сучасних кремнієвих ФЕП

залягає на глибині менше 0,5 мкм від фронтальної поверхні. При впалюванні срібної пасти метал повинен доволі глибоко увійти в n-шар кремнію, щоб сформувати контакт з малим опором, але при цьому він не має досягти р-шару бази, щоб сонячний елемент не виявиться короткозамкнутим. Така вимога суттєво ускладнює процес впалювання пасти, яка повинна проникнути в емітерний шар на контрольовану глибину. Для цього температурну обробку проводять у спеціальних високошвидкісних печах (рис. 5.21), які забезпечують піковий температурний вплив на пластину протягом короткого часу близько 10 - 15 секунд.

Втім, на виробництві ще доволі широко застосовуються і повільні конвеєрні печі, в яких пластини знаходяться в зоні впалювання близько 3 хвилин, але спостерігається поступовий перехід до використання високошвидкісних печей, оскільки це дозволяє збільшити ККД сонячних елементів ще приблизно на 0,5% за рахунок більш оптимальних температурно-часових режимів термообробки.



Рисунок 5.21 - Конвеєрна піч для впалювання контактної пасти [29]

*Тильна металізація.* На відміну від лицьової металізації, що виконує тільки функцію контакту, тильна металізація формує також і тильне вбудоване поле (BSF). Для цього на тильну поверхню сонячного елемента наноситься не один, а два типи металу. Одним з них є суцільний шар алюмінію,

що покриває практично всю площу за винятком декількох отворів, в яких сформована срібна металізація, що виконує функцію контакту. При впалюванні контактів алюміній дифундує в кремній, створюючи поблизу тильної поверхні високолегований тонкий шар р+- типу, тобто, шар BSF. Наявність шару BSF дозволяє збільшити електричну потужність сонячного елемента приблизно на 2% в порівнянні з ФЕП без тильного вбудованого поля.

Як суцільний алюмінієвий шар, так і срібний контакт на тильній поверхні сонячного елемента формуються тим самим способом – трафаретним друком. Змінюється лише малюнок трафарету і деякі геометричні параметри використаної для його виготовлення сітки. Наприклад, через більший розмір частинок алюмінію в пасті доводиться використовувати сітки з більшими осередками в порівнянні з сітками для нанесення срібних паст. Також відрізняється натяг сітки і деякі інші параметри процесу.

Загалом процес трафаретного друку є доволі примхливим і вимагає досвіду від інженерів, наладчиків та операторів. Так, наприклад, в'язкість та інші властивості паст сильно залежать від температури і вологості повітря в цеху, наявності протягів і т. п. Зміна температури в приміщенні навіть на декілька градусів вимагає переналаштування всього процесу трафаретного друку. На результат також впливають термін і умови зберігання паст, стан ракеля, налаштування принтера та інші фактори.

Після нанесення кожного шару пасти його сушать у спеціальних печах, і тільки після формування всіх трьох шарів металізації – одного на фронтальній і двох на тильній поверхні – пластина передається на етап впалювання, яким і завершується процес виготовлення сонячного елемента. Далі ФЕП надходить на контроль параметрів.

#### **5.4.6 Тестування та сортування готової продукції**

Будь-який промисловий виріб перед відправкою споживачеві необхідно перевірити і виміряти його параметри. Така процедура застосовується і при

виробництві сонячних елементів.

Параметри ФЕП вимірюють в умовах STC, які передбачають інтенсивність випромінювання  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , спектр AM1,5 та температуру сонячного елемента  $25^\circ\text{C}$ . Під час тестування фіксують струм короткого замикання, напругу холостого ходу, максимальну електричну потужність і ККД сонячного елемента.

Для проведення вимірювань параметрів ФЕП на виробництві використовують тестери або тестери-сортувальники (рис. 5.22). Вони можуть бути як імпульсними, так і з безперервним опроміненням. Імпульсні тестери дають нижчу похибку вимірювань, оскільки за час практично миттєвого вимірювання параметрів сонячний елемент не встигає нагрітися. Також тестери розрізняються за типом використаних джерел світла, що впливає на спектральний склад штучно отриманого випромінювання.

На даний час найбільшого поширення в промисловості набули імпульсні тестери з ксеноновими лампами.



Рисунок 5.22 – Тестер-сортувальник сонячних елементів [29]

Зазвичай тестер містить еталонний сонячний елемент і вбудований комп'ютер, який перераховує виміряні параметри і приводить їх до стандартизованих умов вимірювання. Під час вимірювань необхідно

забезпечити виконання певних вимог, серед яких точно відомий і постійний рівень освітленості, висока однорідність розподілу світлового потоку по поверхні ФЕП, близький до сонячного спектральний розподіл світла від штучного джерела, точний контроль температури ФЕП, мінімально можливе падіння напруги на контактах і у вимірювальному колі.

Отже, процес виробництва сонячних елементів є доволі простим в порівнянні з технологією виробів мікроелектроніки. Але і тут існує ціла низка труднощів і нюансів, які вирішуються як в лабораторіях при розробці нових конструкцій і технологій виготовлення сонячних елементів, так і безпосередньо на виробництві.

## **5.5 Типові параметри сонячних елементів на основі кристалічного кремнію**

Основні параметри сонячних елементів на основі кристалічного кремнію в умовах STC залежать від особливостей їх конструкції, площі приймальної поверхні, часового фактору, що визначає деградацію характеристик ФЕП внаслідок дії світлового потоку, та від інших чинників. Втім, можна визначити певні середні показники, що є характерними для цієї групи сонячних елементів. Так, густина струму короткого замикання, що є відношенням величини струму до площі фронтальної поверхні сонячного елемента, для сучасних кристалічних кремнієвих ФЕП становить 40 - 41 мА/см<sup>2</sup> (с-Si) або 37 - 39 мА/см<sup>2</sup> (mc-Si). Напруга холостого ходу монокристалічних ФЕП знаходиться у діапазоні 0,65 - 0,67 В, а для мультикристалічних дещо менша і складає 0,62-0,65 В. Максимальна електрична потужність ФЕП залежить від їх площі і для елементів розміром 156×156 мм (6×6 дюймів) становить від 4,5 Вт для мультикристалічних до понад 5 Вт для монокристалічних зразків. Ефективність перетворення сонячного випромінювання для кращих серійних зразків мультикристалічних елементів сягає 20%, в той час як у монокристалічних може перевищувати 22%.

## 5.6 Питання для самоперевірки

1. Наведіть класифікацію сонячних елементів.
2. За якою ознакою класифікують сонячні елементи з кристалічного кремнію?
3. Опишіть технологію виготовлення кремнію сонячної якості, монокристалів та злитків мультикристалічного кремнію.
4. Як виготовляють кремнієві пластини з монокристалів та мультикристалічних злитків?
5. Назвіть відомі вам конструкції сонячних елементів на основі кристалічного кремнію.
6. Опишіть класичну конструкцію кристалічного кремнієвого сонячного елемента.
7. В чому полягає особливість конструкції сонячного елемента PERC в порівнянні з класичною?
8. Опишіть конструкцію сонячного елемента PERT.
9. Вкажіть особливості конструкції сонячного елемента TOPCON порівняно з PERT.
10. Опишіть конструкцію сонячного елемента HJT. В чому полягають її особливості?
11. Назвіть головні особливості конструкції сонячного елемента IBC.
12. Вкажіть основні технологічні стадії виготовлення сонячних елементів класичної конструкції.
13. Як і з якою метою проводять текстурування пластин монокристалічного кремнію?
14. Опишіть технологію формування дифузійного р-n- переходу.
15. З якою метою і як саме проводять плазмохімічне травлення торців кремнієвих пластин?
16. Опишіть технологію формування антивідбиваючого шару для

сонячних елементів.

17. Опишіть процес формування контактів трафаретним друком.
18. Чому стадія впалювання контактів вважається критичною щодо працездатності сонячного елемента?
19. Як відбувається тестування готових сонячних елементів у виробничих умовах?
20. Вкажіть, які значення параметрів вважають типовими для сонячних елементів на основі кристалічного кремнію.

**Рекомендована література [2, 4, 23, 29-33]**

## 6 СОНЯЧНІ ЕЛЕМЕНТИ НА ОСНОВІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СПОЛУК

### 6.1 Сонячні елементи на основі сполук $A^{III}B^V$

Головним матеріалом цього типу напівпровідників, що застосовується для виготовлення сонячних елементів, є арсенід галію (GaAs) – хімічна сполука елемента III групи Періодичної системи – галію – з елементом V групи – арсеном.

Арсенід галію має низку переваг в порівнянні з кремнієм, що обумовлені більшим значенням ширини забороненої зони, яке при температурі 20 °C становить 1,43 eV замість 1,12 eV у кремнію. По-перше, така ширина забороненої зони арсеніду галію практично відповідає максимуму на кривій граничної ефективності (рис. 3.25), що надає можливість досягнення вищих ККД при перетворенні сонячного спектру. По-друге, внаслідок більшої  $E_g$  в арсеніді галію є вищим і потенціальний бар'єр p-n- переходу, що зумовлює менші приблизно на три порядки зворотні струми насичення, ніж у кремнієвих ФЕП, та вищу напругу холостого ходу – понад 0,8 В. Також ФЕП на основі GaAs є більш стійкими до температурних змін: їх температурний коефіцієнт потужності становить -0,25%/°C замість близько -0,45%/°C у кремнієвих сонячних елементів.

Разом з арсенідом алюмінію арсенід галію створює потрібний твердий розчин  $Al_xGa_{1-x}As$ , ширина забороненої зони якого залежить від вмісту AlAs і варіюється в межах від 1,43 eV (чистий GaAs,  $x = 0$ ) до близько 2,2 eV (при  $x = 0,85$ ). Це надає можливість керувати шириною забороненої зони і створювати в сонячних елементах шари з потрібними оптичними властивостями. Окрім потрібних твердих розчинів в конструкціях сучасних сонячних елементів також використовують четверні сполуки  $A^{III}B^V$ , що дозволяє, змінюючи їх склад, незалежно керувати як оптичними, так і механічними властивостями напівпровідникових шарів.



Втім, арсенід галію має і низку недоліків в порівнянні з кремнієм. Пластини GaAs програють за механічними властивостями, оскільки є більш крихкими, мають більшу щільність, а відповідно, і масу за умов ідентичних розмірів, а сам матеріал є суттєво дорожчим за кремній. Саме економічні чинники є причиною того, що в наземних умовах ФЕП на основі арсеніду галію використовуються переважно для перетворення концентрованого сонячного випромінювання, коли з сонячного елемента порівняно невеликої площі є можливість отримати значну генеровану електричну потужність і за рахунок цього зменшити собівартість виробленої енергії.

### 6.1.1 Сонячні елементи на основі гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} - \text{GaAs}$

Як зазначалося вище, арсенід галію є майже ідеальним напівпровідниковим матеріалом з точки зору можливості досягнення граничної ефективності перетворення сонячного спектру в порівнянні з іншими матеріалами, що використовуються для створення сонячних елементів з одним p-n- переходом.

В ФЕП на основі гетероструктур  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} - \text{GaAs}$ , як і в кремнієвих сонячних елементах, використовується один p-n- перехід, що формується в монокристалічному арсеніді галію епітаксійним нарощуванням емітерного р- шару на підкладці з електронним типом провідності або дифузією акцепторної домішки, наприклад, цинку, в базу n-GaAs. Шар твердого розчину  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  з великою шириною забороненої зони є верхнім шаром, що покриває p-n- структуру для суттєвого зменшення рекомбінації носіїв заряду на поверхні емітера. Його прийнято називати *широкозонне вікно* (ШВ), оскільки цей шар є практично прозорим для сонячного випромінювання в спектральному діапазоні чутливості арсенід галієвого ФЕП. Схематичне зображення структури класичного сонячного елемента  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} - \text{GaAs}$  поряд з його зонною діаграмою представлено на рис. 6.1.

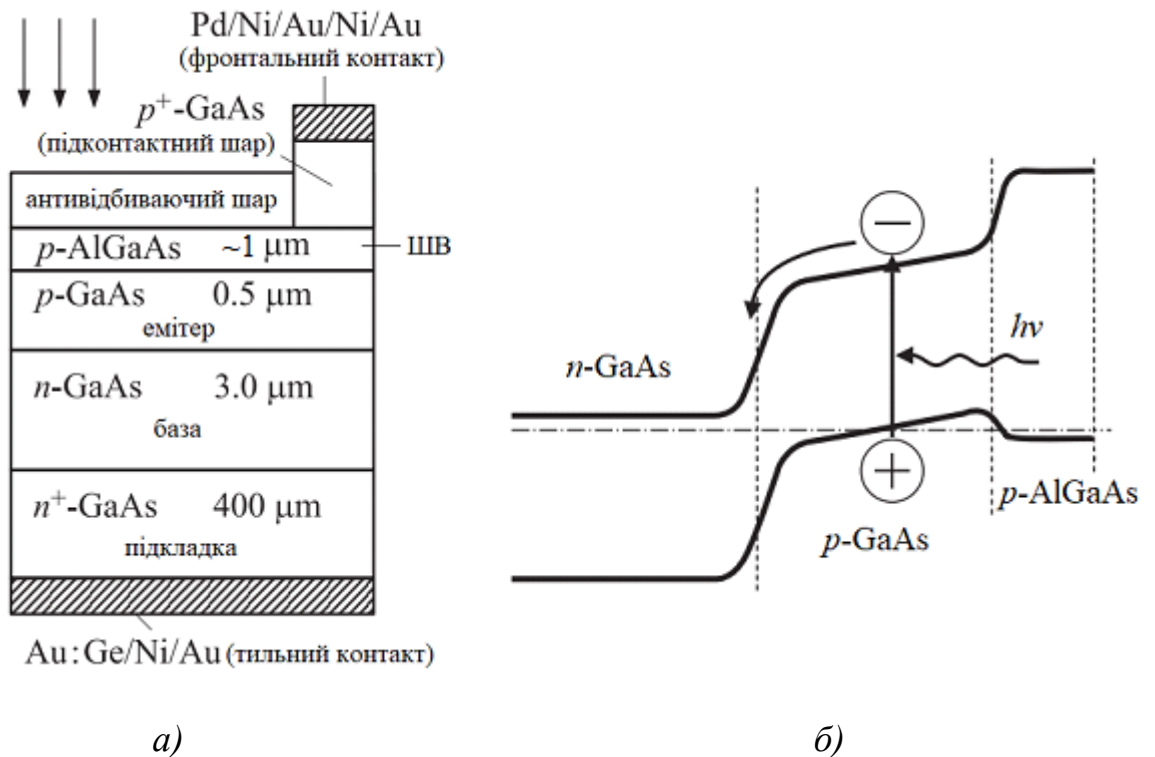


Рисунок 6.1 – Конструкція (а) та енергетична діаграма (б) класичного одноперехідного сонячного елемента на основі гетероструктури  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} - \text{GaAs}$

В структурі, зображеній на рис. 6.1, сонячне випромінювання з енергією фотонів  $h\nu \geq E_{g \text{ GaAs}}$  практично без поглинання проходить крізь шар ШВ, виконаного з твердого розчину  $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  з високим вмістом  $\text{AlAs}$ , поглинаючись в емітерному шарі  $p\text{-GaAs}$ . Коефіцієнт поглинання світла в арсеніді галію є значно вищим, ніж в кремнії, тому сонячне випромінювання розповсюджується в  $\text{GaAs}$  на незначну глибину, що становить всього кілька мікрометрів, і основна частина фотонів поглинається в емітерному шарі, ОПЗ та області бази, що безпосередньо прилягає до  $p\text{-}n$ - переходу. Електронно-діркові пари, утворені в результаті фотоактивного поглинання фотонів, просторово розділяються полем  $p\text{-}n$ - переходу, що і призводить до виникнення фото-ЕРС, аналогічно тому, як це відбувається в кремнієвих сонячних елементах.

Вдосконалені конструкції сонячних елементів на основі гетероструктур  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} - \text{GaAs}$  представлені на рис. 6.2.

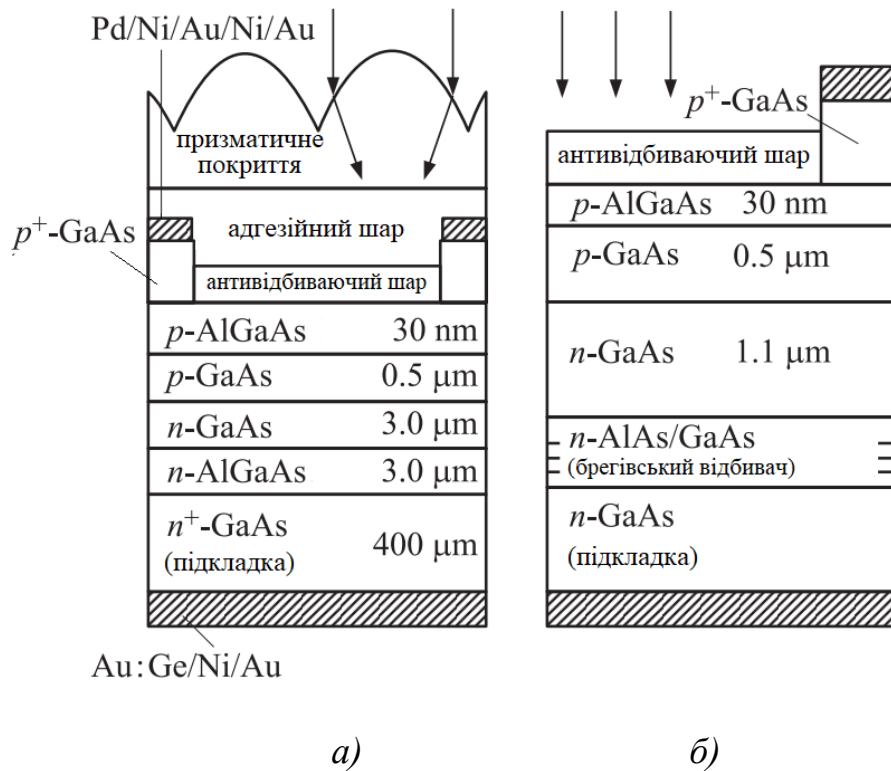


Рисунок 6.2 – Конструкції сонячних елементів з тильним потенціальним бар'єром (а) та з вбудованим брегівським відбивачем (б)

Конструкція ФЕП, представлена на рис. 6.2, а, на відміну від класичного сонячного елемента (рис. 6.1), має ультратонке вікно, товщина якого складає всього 30 нм, що робить ШВ прозорим навіть для високочастотного сонячного випромінювання, а також шар твердого розчину  $n\text{-AlGaAs}$  поблизу тильної поверхні, який виконує роль тильного потенціального бар'єра для зменшення рекомбінаційних втрат носіїв заряду в базі. Призматичне покриття, що кріпиться на поверхні сонячного елемента за допомогою оптично прозорого адгезійного шару, виконує роль концентратора сонячного випромінювання. Така структура продемонструвала рекордну ефективність перетворення космічного сонячного спектру AM0 на рівні 24,6% при 100-кратній концентрації світлового потоку.

В структурі на рис. 6.2, б базову область виконано потоншеною і для компенсації зменшення її товщини сформовано тильний брегівський відбивач з 12 пар ультратонких шарів AlAs (72 нм) та GaAs (59 нм), що чергуються.

Параметри брегівського відбивача підбрані так, щоб ефективно відбивати світло з довжиною хвилі 850 нм, яка є близькою до краю основної полоси поглинання арсеніду галію. Коефіцієнт відбивання цього світла брегівським відбивачем становить 96%. Завдяки ефективному відбиванню довгохвильове світло, яке не поглинулось в базі за перший прохід, поглинається під час другого проходу бази. Потоншений шар бази надав можливість підвищити радіаційну стійкість таких сонячних елементів щодо опромінення високоенергетичними частинками, що є важливим моментом для уповільнення деградації ФЕП космічного базування. Широкозонні шари AlAs, що входять до структури брегівського відбивача, одночасно виконують і роль тильного потенціального бар'єра, зменшуючи рекомбінаційні втрати в базі.

З використанням структур, представлених на рис. 6.2, свого часу було досягнуто рекордної ефективності перетворення концентрованого сонячного випромінювання одноперехідними ФЕП, що становила 27,6% (спектр AM1,5). Такі гетероструктури на даний час отримують, головним чином, газофазною епітаксією з парів металоорганічних сполук (MOCVD). Втім, можуть застосовуватись і методи епітаксії з рідкої фази (LPE), а також молекулярно-променева епітаксія (MBE).

### **6.1.2 Каскадні сонячні елементи**

Подальший розвиток епітаксійних технологій дозволив отримувати досконалі шари арсеніду галію і його твердих розчинів на підкладках інших напівпровідників, таких як германій. Головна перевага германію в порівнянні з підкладками GaAs полягає в тому, що він має кращі механічні властивості, ніж арсенід галію, а отже, для формування епітаксійних гетероструктур AlGaAs – GaAs можна використовувати більш тонкі та легші германієві підкладки. Це дозволило вирішити важливу проблему космічної фотовольтаїки – створити модулі сонячних елементів, які за ваговими характеристиками і міцністю не поступалися б кремнієвим модулям, а за ефективністю і радіаційною стійкістю

перевершували б їх. Інший напрямок, що отримав поштовх з розвитком технології гетероструктур AlGaAs – GaAs на германієвих підкладках – це створення монолітних каскадних ФЕП.

Розробкою та дослідженням каскадних сонячних елементів почали інтенсивно займатися наприкінці 1980-х років. Спочатку прогресу у підвищенні ефективності перетворення сонячного випромінювання було досягнуто за рахунок створення *механічно стикованих каскадів*, що являли собою два або більше окремих сонячних елементів, які розташовувались один під іншим. Втім, механічно стиковані каскадні ФЕП мали суттєву проблему – підвищені оптичні втрати, пов'язані з відбиванням випромінювання від границь розділу між середовищами при його передачі від верхнього елемента каскаду до нижнього. Розв'язати цю проблему вдалося з появою технологічної можливості послідовного нарощування досконалих епітаксійних шарів сполук  $A^{III}B^V$  на підкладках напівпровідників з малою шириною забороненої зони, таких як германій ( $E_{g\text{ Ge}} = 0,67$  еВ при 300 К), та подальшим створенням на основі таких епітаксійних структур *багатоперехідних монолітних каскадних ФЕП*.

Першими, хто досяг суттєвого прогресу у створенні монолітних каскадних ФЕП, були дослідники з NREL (США). З використанням методу MOCVD вони виготовили на германієвій підкладці гетероструктуру, в якій верхній сонячний елемент формувався p-n- переходом у шарі твердого розчину  $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P}$ , а нижній – p-n- переходом в арсеніді галію. Послідовне з'єднання верхнього і нижнього елементів каскаду здійснювалось тунельними p-n- переходами, що спеціально формувались між цими елементами. В подальшому до цих двох елементів каскаду було додано ще й третій, сформований p-n- переходом в германієвій підкладці (рис. 6.3).

Такі трьохкаскадні сонячні елементи переважно застосовуються при створенні модулів ФЕП для космічних апаратів. Однак, є доволі обнадійливі перспективи ширшого використання каскадних ФЕП, зокрема, для перетворення наземного спектру сонячного випромінювання за умови його концентрування.

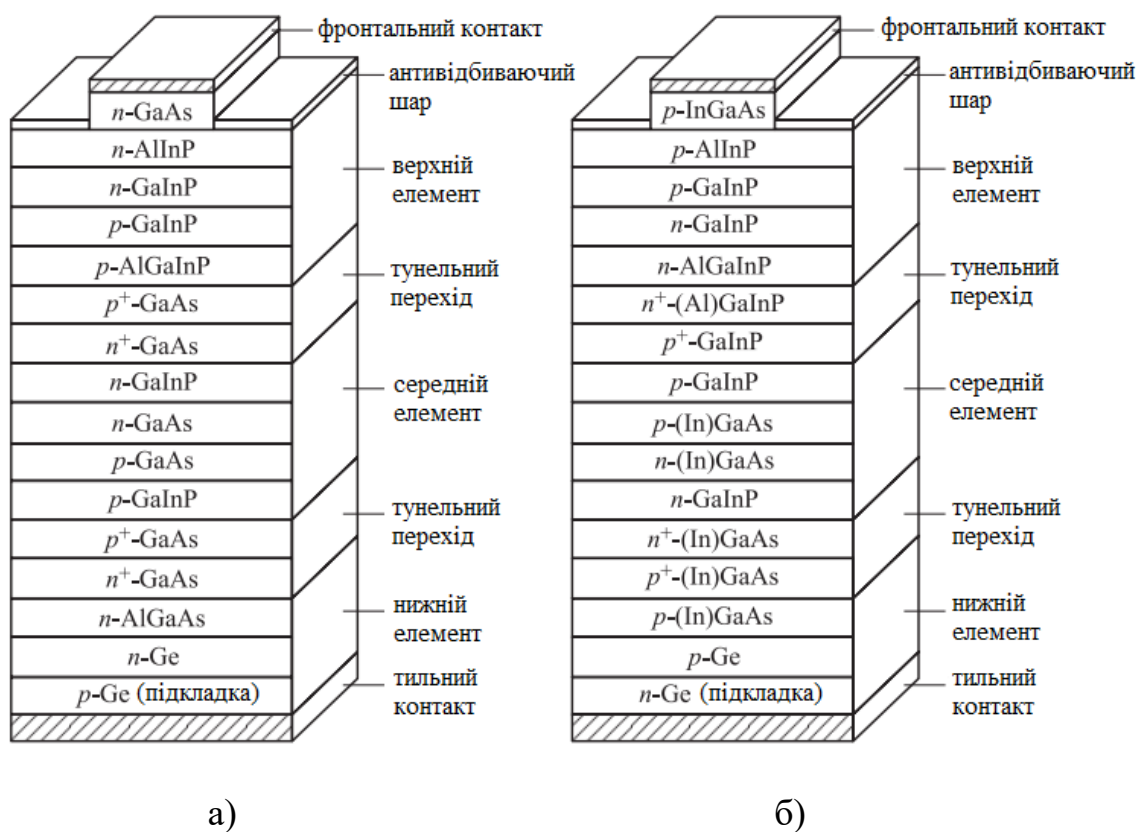


Рисунок 6.3 – Будова монолітних каскадних ФЕП, сформованих на германієвих підкладках з провідністю р-типу (а) та n-типу (б)

На даний час проводяться експериментальні дослідження з чотирьох-, п'яти- та навіть шестиперехідними каскадними сонячними елементами. Абсолютний рекорд з ефективності перетворення сонячного випромінювання в 47,1% встановлено саме шестиперехідним сонячним елементом від NREL (рис. 2.11).

Головною ж перепоною на шляху широкого використання таких високоефективних сонячних елементів в наземних фотовольтаїчних системах є їх висока вартість. Втім, досліджуються шляхи зменшення цієї вартості, зокрема, розробляються технології отримання досконалих епітаксійних шарів сполук  $A^{III}B^V$  на дешевших підкладках, як-то кремнієві пластини, і в цьому напрямі вже є певні зрушення.

### 6.1.3 Особливості перетворення концентрованого випромінювання сонячними елементами на основі сполук $A^{III}B^V$

Як зазначалося вище, гетероперехідні ФЕП на основі арсеніду галію мають доволі високу температурну стабільність, що, на відміну від кремнієвих перетворювачів, дозволяє їм працювати до температур близько 200 °С. Ця особливість зумовила їх використання для перетворення світлових потоків високої інтенсивності, що формуються шляхом концентрування сонячного випромінювання такими оптичними елементами, як фокліни, фокони, дзеркала та лінзи (рис. 6.4).

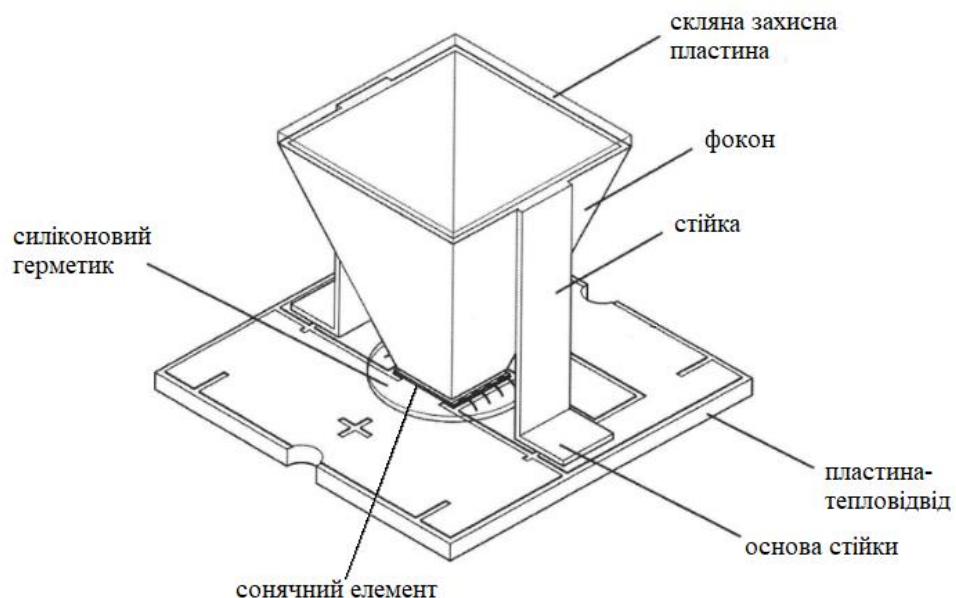


Рисунок 6.4 – Сонячний елемент з фоконом у якості концентратора випромінювання

Головним рушієм щодо використання концентрованого сонячного випромінювання є можливість зменшення питомої витрати напівпровідникового матеріалу, оскільки сонячний елемент генерує електричну потужність, що збільшується пропорційно кратності концентрації світлового потоку. В результаті цього ФЕП невеликої площі здатен генерувати значну корисну потужність. Зважаючи на те, що оптичні елементи виготовляють з

порівняно недорогих матеріалів, внесок ФЕП у вартість сонячного модуля стає незначним, а отже, з'являються передумови до економічно обґрунтованого наземного застосування вискоефективних, хоча і значно дорожчих за звичайні кремнієві, сонячних елементів на основі сполук  $A^{III}B^V$ .

Одним з головних питань, якому потрібно приділяти першочергову увагу при конструюванні концентраторних ФЕП – це мінімізація внутрішнього послідовного опору. Справа в тому, що фотострум сонячного елемента зростає пропорційно інтенсивності світлового потоку, що надходить до його приймальної поверхні, а це, в свою чергу, викликає збільшення електричних втрат на внутрішньому послідовному опорі і, як наслідок, зменшує ККД, що особливо стає відчутним при досягненні високих концентрацій випромінювання (рис. 6.5).

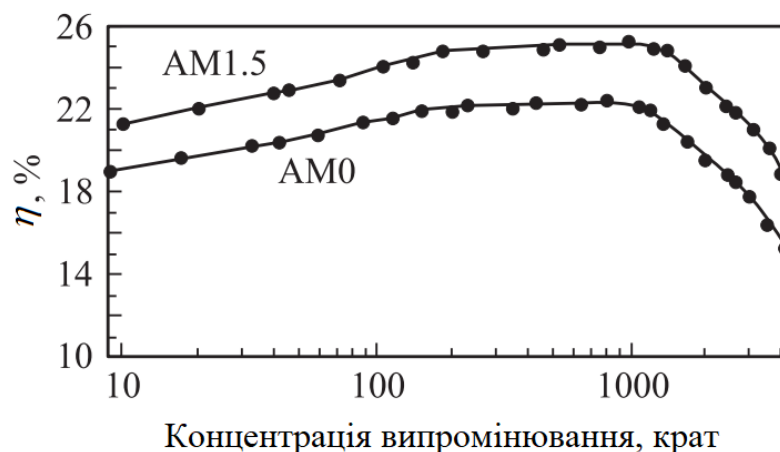


Рисунок 6.5 – Залежність ефективності одноперехідного сонячного елемента на основі гетероструктури AlGaAs – GaAs від кратності концентрації світлового потоку для космічного (AM0) та наземного (AM1,5) спектрів

Для мінімізації омичних втрат в концентраторних ФЕП використовують більш густі, в порівнянні зі звичайними елементами, фронтальні контактні сітки (рис. 6.6), а самі контакти виготовляють багат шаровими: перший шар, що безпосередньо контактує з напівпровідником, наприклад, паладій, забезпечує низький контактний опір та високі адгезійні властивості контакту, а



наступні, такі як золото, – високу провідність контактних доріжок та змочуваність припоями для приєднання зовнішніх контактів. Контактні метали мають бути стійкими щодо хімічного впливу з боку оточуючого середовища, а також не відшаровуватись внаслідок періодичної зміни температури сонячного елемента, пов'язаної з флуктуаціями світлового потоку.

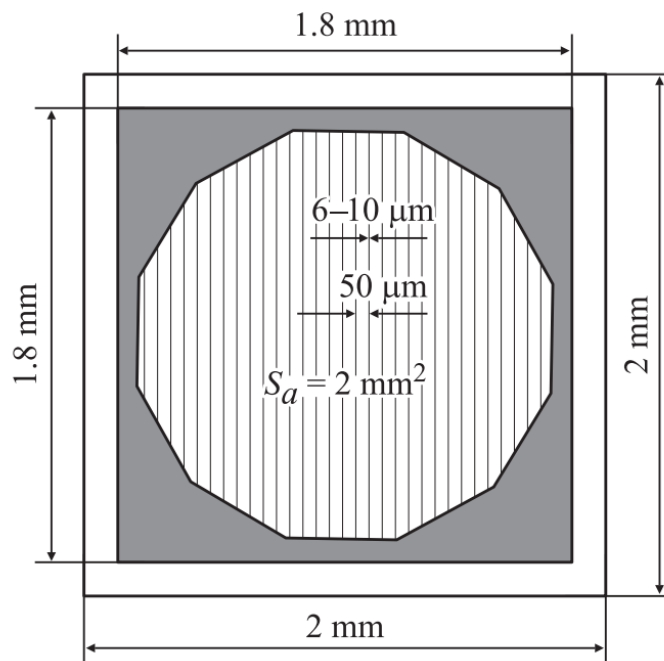


Рисунок 6.6 – Геометрія контактної сітки концентраторного сонячного елемента

Опір базової області мінімізують за рахунок зменшення її товщини, а для нарощування епітаксійних шарів обирають сильнолеговані підкладки з високою електропровідністю.

Проблему впливу внутрішнього послідовного опору ФЕП на ефективність перетворення концентрованого сонячного випромінювання можна пом'якшити, застосовуючи елементи, що генерують порівняно малий струм, але високу напругу. Реалізації такого підходу сприяє конструкція багатоперехідних каскадних сонячних елементів: за рахунок послідовного з'єднання ФЕП у каскаді загальна напруга є сумою напруг, що генерують окремі елементи, через які протікає однаковий порівняно невеликий струм.

Завдяки цьому зменшуються омичні втрати, і для багатоперехідних ФЕП високі значення ККД зберігаються до більших концентрацій світлового потоку.

Ще один підхід до зменшення абсолютного значення струму сонячних елементів – це використання мініатюрних ФЕП з площею приймальної поверхні  $S_a$  декілька квадратних міліметрів (рис. 6.6). Окрім зменшення омичних втрат, такі мініатюрні сонячні елементи потребують менш потужних систем відведення теплоти, що дозволяє заощадити на матеріалах при виготовленні фотоелектричного модуля. В якості концентруючих оптичних елементів для таких ФЕП використовуються малорозмірні короткофокусні лінзи Френеля (рис. 6.7, а), що часто працюють в парі з вторинними мінілінзами (рис. 6.7, б) для збільшення кратності концентрації світлового потоку до 1000 і більше.

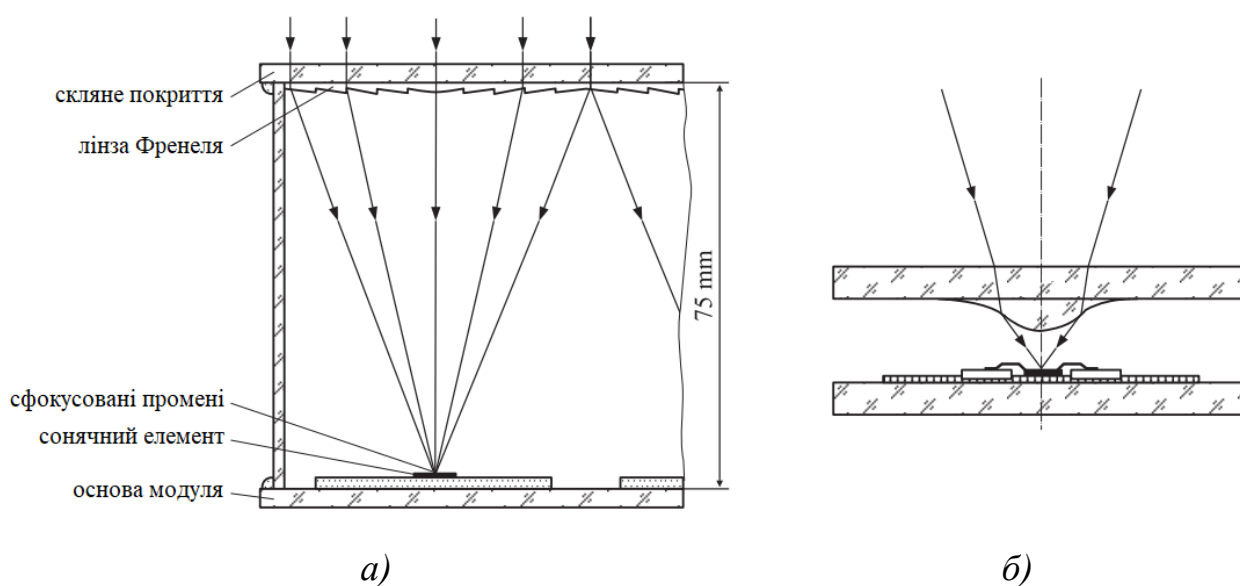


Рисунок 6.7 – Концентрування світлового потоку лінзами Френеля (а) та система з вторинними мінілінзами (б)

## 6.2 Сонячні елементи на основі телуриду кадмію

Телурид кадмію ( $\text{CdTe}$ ) є унікальним матеріалом серед сполук групи  $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ , оскільки має ширину забороненої зони 1,5 eV (при 300 K), що знаходиться в околиці максимуму на кривій граничної ефективності (рис. 3.25).

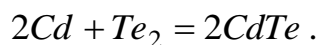
Окрім того, CdTe має високий коефіцієнт поглинання випромінювання у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні сонячного спектру, що дозволяє його використання у вигляді плівок з товщиною всього декілька мікрометрів. ФЕП на основі плівок телуриду кадмію мають доволі низький температурний коефіцієнт потужності, який становить близько  $-0,17\%/^{\circ}\text{C}$ , що дозволяє їм зберігати стабільні значення ефективності перетворення сонячного випромінювання в більш широкому температурному діапазоні, аніж у популярних на сьогодні елементів на основі кристалічного кремнію. Телурид кадмієві ФЕП ефективно генерують струм при низькому рівні освітленості і в умовах розсіяного потоку сонячного випромінювання. Важливим моментом також є те, що технологія виготовлення сонячних елементів на основі CdTe є більш простою і менш витратною в порівнянні з кристалічними кремнієвими ФЕП.

Втім, поряд із зазначеними перевагами у таких сонячних елементів є і низка недоліків: нижчі, ніж у кристалічних кремнієвих елементів, ККД промислових зразків; менша стійкість до ультрафіолетового випромінювання, дія якого прискорює деградацію цих елементів; кадмій, що входить до складу CdTe, є токсичним, і тому такі фотоелектричні модулі потребують повної утилізації по завершенню свого терміну експлуатації; хімічні елементи, що використовуються для синтезу плівок телуриду кадмію, а саме, кадмій і телур, є розсіяними у природному середовищі і видобуваються в доволі малих обсягах.

Типові значення ефективності промислових телурид кадмієвих ФЕП не перевищують 17% при рекорді у 22,1%, який лише нещодавно було встановлено фахівцями з компанії First Solar на лабораторних зразках.

В сонячних елементах використовують полікристалічні плівки CdTe, які отримують на скляній, металевій або полімерній підкладці такими методами, як вакуумне нанесення, піролітичне осадження із розчинів, осадження з парової фази у замкненому об'ємі (CSVT), електроосадження, тощо. Процес синтезу полікристалічних плівок телуриду кадмію для сонячних елементів може здійснюватись в доволі широкому температурному діапазоні від  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  до

600 °C і відбувається згідно реакції:



Головними умовами для досягнення високих ефективностей телурид кадмієвих сонячних елементів є висока хімічна чистота синтезованих плівок, оптимальна їх товщина, а також пасивація границь зерен для збільшення часу життя носіїв заряду. Високоякісні полікристалічні плівки CdTe, що мають чистоту, достатню для їх використання в сонячних елементах, можуть бути отримані при низьких температурах з використанням як фізичних, так і хімічних методів осадження. Отримана плівка повинна мати товщину, достатню для забезпечення повноти поглинання світла, але не бути занадто товстою, щоб не погіршити ефективність збирання носіїв заряду, генерованих в результаті цього поглинання, та не збільшувати внутрішній послідовний опір сонячного елемента. Збільшення ефективності збирання носіїв та підвищення провідності плівки забезпечується пасивацією станів на границях зерен, яку здійснюють хлоридним методом, що полягає у нанесенні шару CdCl<sub>2</sub> з наступною термічною обробкою.

Типова структура ФЕП на основі полікристалічної плівки CdTe показана на рис. 6.8. В якості бар'єру, що розділяє носії заряду, використовується анізотипний гетероперехід CdS/CdTe. Шар CdS з електронним типом провідності виконує роль широкозонного оптичного вікна, а поглинання сонячного світла відбувається в плівці CdTe, що має провідність р-типу. Фронтальним контактом і одночасно антивідбиваючим шаром найчастіше є плівки SnO<sub>2</sub>:F, ITO, Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> або ZnO:Al з шириною забороненої зони близько 4 еВ, які є прозорими для видимого світла і мають високу електропровідність. Тильний контакт виконується зі сплаву міді та золота, що наноситься на поверхню плівки CdTe вакуумним випаровуванням. Втім, такий контакт має недолік, пов'язаний з дифузією міді в напівпровідникові шари, що прискорює деградацію сонячного елемента. В якості альтернативних металів для тильного

контакту можуть застосовуватись шари молібдену або нікелю.

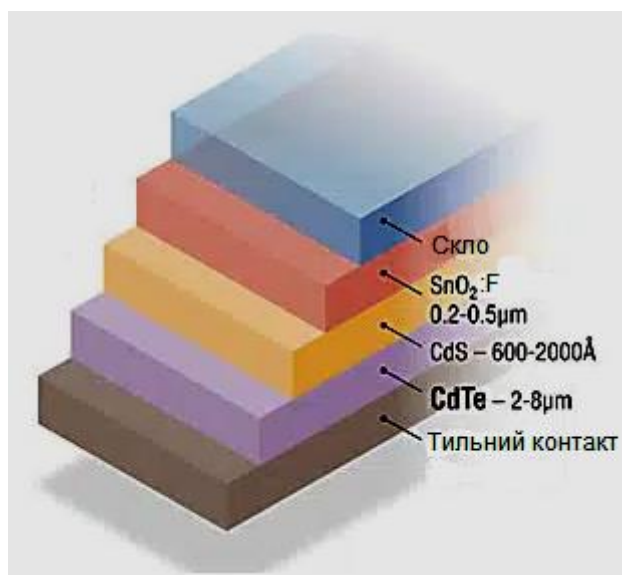


Рисунок 6.8 – Структура сонячного елемента на основі CdTe

Вибір методів нанесення плівок залежить від очікуваних властивостей сонячного елемента та матеріалу підкладки. Так, у випадку створення гнучкого ФЕП на полімерній підкладці потрібно обирати низькотемпературні методи формування шарів, такі як вакуумне нанесення або електроосадження, а при застосуванні металевої підкладки, наприклад, з нержавіючої сталі, допустимими є й методи, що реалізуються при підвищених температурах. В той же час, при розробці технології для масового виробництва необхідно враховувати і такі параметри процесу, як продуктивність того чи іншого методу, його енергоємність та вартість сировини й допоміжних матеріалів, що безпосередньо впливає на собівартість готової продукції.

Незважаючи на те, що доля сонячних елементів з телуриду кадмію на ринку фотовольтаїки зараз не перевищує 5%, вони є доволі перспективними щодо подальшого свого комерційного просування. Завдяки низькій витраті напівпровідникового матеріалу та достатньо простій технології виготовлення вартість одиниці потужності тонкопліткових модулів на основі CdTe становить 0,45 \$/Вт, що на 30% менше, ніж для кристалічних кремнієвих ФЕП. Такі модулі є легшими за класичні з кристалічного кремнію, у гнучкому варіанті

можуть бути змонтовані на поверхнях складної форми, легко інтегруються в конструкції будівель, що надає перспективи розширення їх застосування в галузі будівельної фотовольтаїки.

### 6.3 Сонячні елементи на основі плівок $\text{CuInSe}_2$ та $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$

Напівпровідникові плівки діселеніду міді – індію  $\text{CuInSe}_2$  (CIS) та діселеніду міді – індію – галію  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$  (CIGS) мають доволі широке застосування для створення ефективних тонкопліткових сонячних елементів, що за своїми характеристиками конкурують з телурид кадмієвими ФЕП. Як і у випадку з сонячними елементами на основі  $\text{CdTe}$ , використання тонкопліткової технології, що реалізується на дешевих підкладках, дозволяє суттєво зменшити витрати напівпровідникового матеріалу, понизити температуру технологічного процесу, одразу виготовляти модулі великої площі без необхідності їх компонування з окремих елементів, кардинально підвищити продуктивність виробничого процесу за рахунок впровадження автоматизованих конвеєрних ліній. Ці фактори, безумовно, сприяють зменшенню вартості одиниці потужності таких модулів та розширенню їх долі на ринку фотовольтаїки. Втім, зважаючи на токсичність кадмію і побоювання щодо екологічних наслідків масштабного використання телурид кадмієвих модулів, розвиток технологій CIS та CIGS виглядає більш перспективним.

Як і  $\text{CdTe}$ , CIS та CIGS мають значний коефіцієнт поглинання, що дозволяє їх застосування у вигляді тонких плівок, а часткова заміна індію галієм при переході від  $\text{CuInSe}_2$  до  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$  надає можливість плавно регулювати ширину забороненої зони напівпровідника в межах від 1,02 eV до 1,68 eV (при температурі 300 K), а отже, підібрати таке її значення, що відповідає максимуму на кривій граничної ефективності. Хоча середні значення ККД перетворення сонячного випромінювання для серійних ФЕП на основі плівок CIS та CIGS знаходяться в діапазоні від 12% до 15%, нещодавно компанією Solar Frontier (Німеччина) було продемонстровано ефективність

сонячного елемента CIGS на рівні 23,4%, що відповідає кращим зразкам ФЕП з монокристалічного кремнію.

На рис. 6.8 представлено типову структуру сонячного елемента на основі плівки CIGS, а також зовнішній вигляд модуля, виготовленого на гнучкій підкладці.

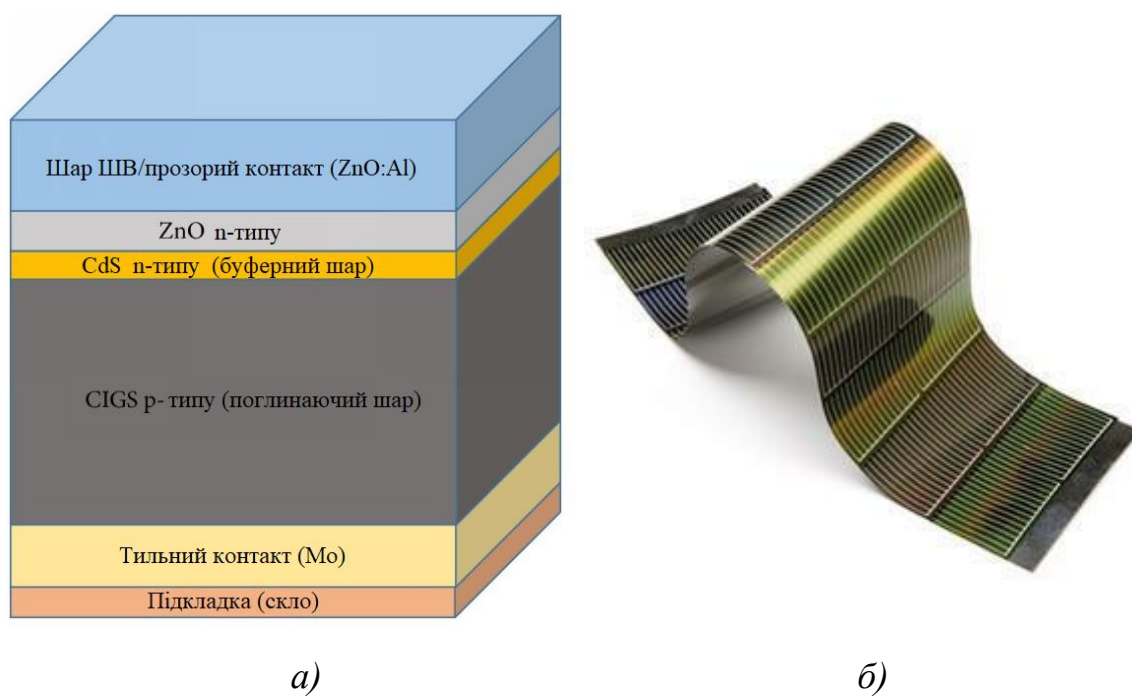


Рисунок 6.9 – Структура сонячного елемента на основі плівки  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$  (а) та зовнішній вигляд модуля, виготовленого на гнучкій підкладці (б) [36]

Поглинаючий шар CIS або CIGS наносять на підкладку зі скла, металу або поліамідну плівку. Якщо підкладка є діелектричною, то на її поверхні перед нанесенням поглинаючого шару формують металеву плівку, наприклад, з молібдену, що виконує роль тильного контакту.

Бар'єром, що просторово розділяє генеровані світлом носії заряду, є гетероперехід  $n\text{-CdS}/p\text{-CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$  (або  $n\text{-CdS}/p\text{-CuInSe}_2$  в сонячних елементах CIS). Дослідження показали, що характеристики ФЕП значно покращуються, якщо шар  $n\text{-CdS}$  формувати в два етапи: спочатку на поверхню плівки CIGS (або CIS) нанести буферний шар нелегованого CdS, а потім шар

CdS з високою електропровідністю, легований індієм або галієм. Втім, шар сильнолегованого CdS суттєво обмежує пропускання світла до активної області CIGS (або CIS) внаслідок власного поглинання сонячного випромінювання з довжиною хвиль  $\lambda < 0,52$  мкм. Тому в подальшому його було замінено на шар ZnO, що має більшу ширину забороненої зони, а отже, є прозорішим для видимого діапазону сонячного спектру. Одночасно зменшили і товщину нелегованого буферного шару n-CdS до 30-50 нм, що дозволило мінімізувати поглинання світла поза областю CIGS (або CIS).

Фронтальний контакт виконують переважно у вигляді прозорої плівки. Роль такого контакту може відігравати сильно легований шар ZnO, який в такому разі одночасно є і шаром ШВ (рис. 6.9), або ж плівка ITO.

Полікристалічні шари CIGS можуть бути отримані різними методами. Найбільшого поширення в технології сонячних елементів знайшли два з них: вакуумне нанесення на підігріту підкладку міді, індію, галію та селену з одночасним синтезом сполуки або нанесення міді, індію і галію на холодну підкладку з наступним процесом селенізації – обробкою в середовищі  $H_2Se$  при температурі від 400 °C до 500 °C. Втім, розробляються та впроваджуються і новітні більш продуктивні методи, такі як друк плівок на алюмінієвій фользі з використанням спеціальних рідин, що містять часточки напівпровідникового матеріалу.

Хоча на даний момент вартість одиниці потужності модулів CIGS є вищою за телурид кадмієві модулі, очікується, що завдяки впровадженню у виробництво нових прогресивних технологій найближчим часом вдасться суттєво зменшити їх вартість і наблизитись до позначки 0,4 \$/Вт.

#### **6.4 Питання для самоперевірки**

1. Охарактеризуйте арсенід галію як матеріал для виготовлення сонячних елементів.
2. Опишіть конструкцію класичного одноперехідного сонячного



- елемента на основі гетероструктури  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} - \text{GaAs}$ . Яку роль виконує шар широкозонного оптичного вікна в такому ФЕП?
3. Вкажіть особливості конструкції одноперехідних ФЕП з тильним потенціальним бар'єром та брегівським відбивачем в порівнянні з класичним сонячним елементом на основі гетероструктури  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} - \text{GaAs}$ .
  4. Яких значень ефективностей перетворення сонячного випромінювання досягнуто при використанні одноперехідних ФЕП на основі гетероструктур  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} - \text{GaAs}$ ?
  5. Назвіть відомі вам методи отримання гетероструктур  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} - \text{GaAs}$ . Які з них найчастіше застосовують для виготовлення ФЕП?
  6. Опишіть фізичну сутність, покладену в основу каскадних сонячних елементів.
  7. В чому полягають головні переваги монолітних каскадних сонячних елементів над механічно стикованими?
  8. Опишіть будову трьохперехідних каскадних сонячних елементів на основі епітаксійних шарів сполук  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ .
  9. Яких значень ефективності перетворення сонячного випромінювання каскадними ФЕП досягнуто на сьогоднішній день?
  10. В чому полягає головна причина низької долі каскадних ФЕП в наземній фотовольтаїці?
  11. Вкажіть основні переваги сонячних елементів на основі арсеніду галію, що дозволяють ефективно їх використання для перетворення концентрованого випромінювання.
  12. Які оптичні елементи використовуються у фотовольтаїці для концентрування світлового потоку?
  13. Чому залежність ефективності ФЕП від кратності концентрації світлового потоку має вигляд кривої з максимумом?
  14. Назвіть заходи, що застосовуються для мінімізації внутрішнього послідовного опору концентраторних ФЕП.

15. В чому полягає перевага використання каскадних та мініатюрних ФЕП для перетворення концентрованого сонячного випромінювання?
16. Вкажіть головні переваги та недоліки телуриду кадмію як матеріалу для виготовлення сонячних елементів.
17. Опишіть типову конструкцію тонкоплівкового сонячного елемента на основі телуриду кадмію. Яку роль відіграє кожен із шарів такого ФЕП?
18. Які ефективності перетворення сонячного випромінювання демонструють телурид кадмієві ФЕП?
19. Опишіть технологію виготовлення сонячних елементів на основі телуриду кадмію.
20. Вкажіть переваги та недоліки сонячних елементів на основі телуриду кадмію в порівнянні з кристалічними кремнієвими ФЕП.
21. В чому полягають головні переваги та недоліки ФЕП на основі тонких плівок CIS та CIGS?
22. Які значення ефективності перетворення сонячного випромінювання демонструють ФЕП на основі плівок CIS та CIGS?
23. Опишіть типову будову та принцип дії сонячного елемента на основі плівок CIGS.
24. Які методи отримання полікристалічних плівок CIGS вам відомі?
25. Вкажіть подальші перспективи застосування сонячних елементів на основі плівок CIS та CIGS.

**Рекомендована література [2, 4, 12, 13, 24-26, 34-36]**

## 7 СОНЯЧНІ ЕЛЕМЕНТИ НА ОСНОВІ АМОРФНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЛІВОК

Застосування плівок аморфних напівпровідників є ще одним напрямком на шляху здешевлення модулів сонячних елементів. Хоча аморфний стан є притаманним для низки напівпровідників, найбільшого поширення в якості матеріалу для виготовлення ФЕП на даний час знайшли плівки аморфного кремнію.

### 7.1 Особливості аморфних напівпровідників

Головною особливістю структури аморфних напівпровідників є те, що вони, на відміну від кристалів, є неупорядкованими системами. Розташування структурних одиниць в аморфних тілах характеризується лише ближнім порядком, а дальній порядок відсутній. Іншими словами, впорядковане взаємне розташування структурних одиниць в аморфних твердих тілах спостерігається лише на відстанях, порівняних з відстанями між сусідніми атомами, а на більших – суттєво порушується (рис. 7.1).

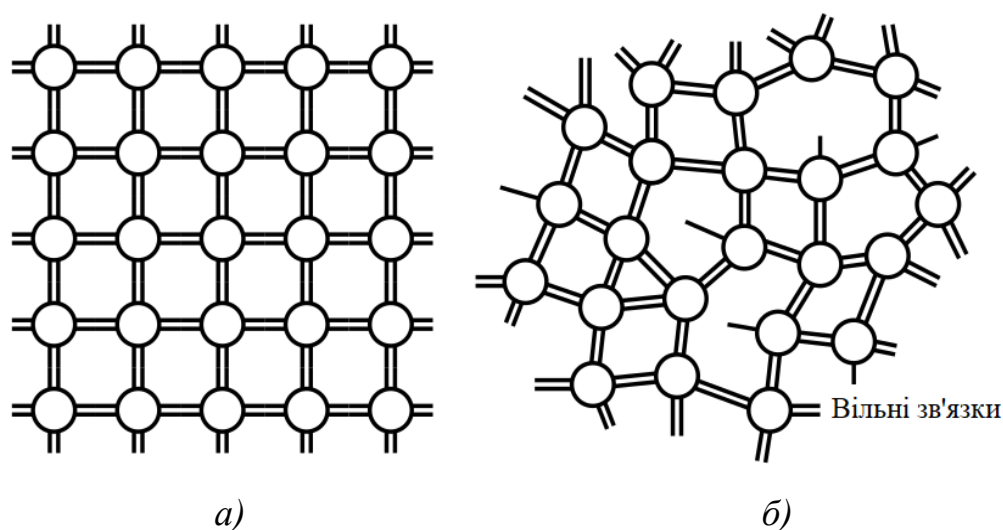


Рисунок 7.1 – Структура кристалічного (а) та аморфного (б) твердого тіла

Внаслідок неупорядкованої структури аморфних твердих тіл низка атомів в них мають вільні зв'язки, які з точки зору кристалографії є дефектами, що негативно впливають на рух вільних носіїв заряду, а отже, і на електропровідність аморфних тіл. Окрім цього, розупорядкованість в розташуванні структурних одиниць призводить до того, що замість чітко окресленої ширини забороненої зони, характерної для кристалічних тіл, в аморфних напівпровідниках краї зони заборонених енергій розмиті: вище вершини валентної зони і нижче дна зони провідності містяться локалізовані електронні стани, які поширюються в зону заборонених енергій на декілька десятків електрон-вольт. Такий аналог забороненої зони в аморфних напівпровідниках, який містить локалізовані електронні стани, прийнято називати *щільною рухливістю*. Наявність локалізованих станів всередині зони заборонених енергій суттєво змінює оптичні властивості аморфних напівпровідників в порівнянні з кристалічними, зокрема, значно впливає на спектр їх поглинання.

Велика кількість вільних зв'язків в аморфних твердих тілах призводить до того, що їх властивості практично не змінюються внаслідок легування домішками. Це пояснюється високою ймовірністю задіяння всіх валентних електронів домішки в утворенні хімічних зв'язків з атомами основної речовини, що містять вільні зв'язки. Втім, проблему легування аморфних напівпровідників можна вирішити шляхом попереднього задіяння цих вільних зв'язків у хімічних з'єднаннях з іншими атомами, наприклад, водородом (рис. 7.2). Такий підхід застосовується, зокрема, при створенні плівок аморфного водороденованого кремнію  $\alpha$ -Si:H, на основі яких і виготовляють сонячні елементи. За рахунок заповнення вільних зв'язків кремнію атомами водороду з'являється можливість не лише керувати електропровідністю, але й змінювати тип провідності плівки шляхом легування донорними або акцепторними домішками, як і у випадку кристалічного кремнію.

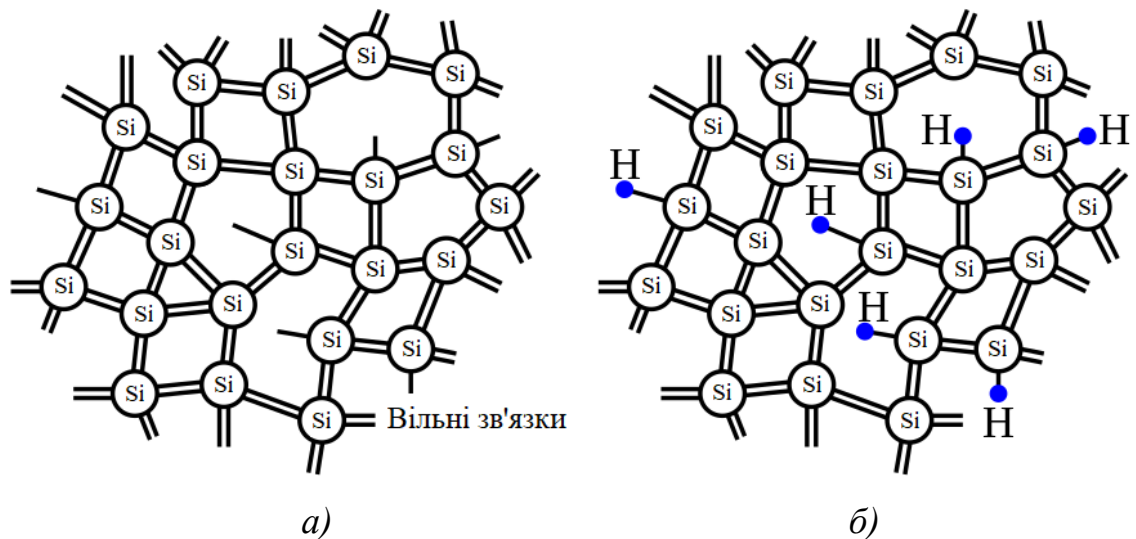


Рисунок 7.2 – Структура аморфного (а) та аморфного гідрогенізованого (б) кремнію

## 7.2 Властивості аморфного гідрогенізованого кремнію та методи його отримання

Аморфний гідрогенізований кремній має дещо меншу густину, ніж кристалічний кремній ( $2,29 \text{ г/см}^3$  проти  $2,33 \text{ г/см}^3$  при  $300 \text{ К}$ ). В поєднанні зі значно більшим коефіцієнтом поглинання світла, що дозволяє застосування  $\alpha\text{-Si:H}$  у вигляді плівок товщиною близько  $1 \text{ мкм}$ , це надає можливість створення значно легших фотоелектричних модулів, ніж з використанням класичних ФЕП на основі кристалічного кремнію. Енергія, що відповідає щільності рухливості  $\alpha\text{-Si:H}$ , становить  $1,7 - 1,75 \text{ eV}$  і залежить від методів та технологічних режимів нанесення плівки.

Головним недоліком аморфного гідрогенізованого кремнію в якості матеріалу для сонячних елементів є його поступова деградація, пов'язана з ефектом Стаблера – Вронського. Цей ефект полягає в тому, що під дією сонячного світла концентрація дефектів в об'ємі  $\alpha\text{-Si:H}$  з часом збільшується, підвищуючи рекомбінаційні втрати ФЕП та зменшуючи його ефективність. У відповідності до однієї з сучасних теорій цього ефекту, концентрація дефектів в аморфному гідрогенізованому кремнії зростає внаслідок стимульованого

світлом розриву хімічних зв'язків Si – H. Втім, через певний проміжок часу концентрація таких дефектів досягає рівноважного значення, і фотоелектричні властивості плівки стабілізуються.

Плівки аморфного гідрогенізованого кремнію можуть отримуватись як з використанням фізичних методів, пов'язаних з розпиленням кремнієвого джерела у вакуумі з наступною пасивацією шару  $\alpha$ -Si в атмосфері водню, так і хімічними методами, наприклад, розкладанням силану  $\text{SiH}_4$ . Найбільш поширеним у виробництві сонячних елементів методом, що дозволяє отримувати плівки  $\alpha$ -Si:H на підкладках великої площі при низьких температурах близько  $75\text{ }^\circ\text{C}$ , є хімічне осадження з газової фази у плазмі (PECVD). Застосування цього методу не потребує окремої технологічної операції з пасивації плівки, оскільки процес її нанесення проводиться в присутності водню, що виникає при розкладанні силану у високочастотному плазмовому розряді. Завдяки низькій температурі підкладки в процесі PECVD, плівки аморфного гідрогенізованого кремнію площею понад  $1\text{ м}^2$  можна отримувати не лише на металевих або скляних підкладках, а й на поверхнях полімерних матеріалів, наприклад, поліетилену (рис. 7.3).



Рисунок 7.3 – Рулонна фотоелектрична панель на основі плівки аморфного гідрогенізованого кремнію

### 7.3 Конструкції сонячних елементів на основі плівок аморфного гідрогенізованого кремнію

Основні конструкції сонячних елементів на основі аморфного гідрогенізованого кремнію представлені на рис. 7.4.

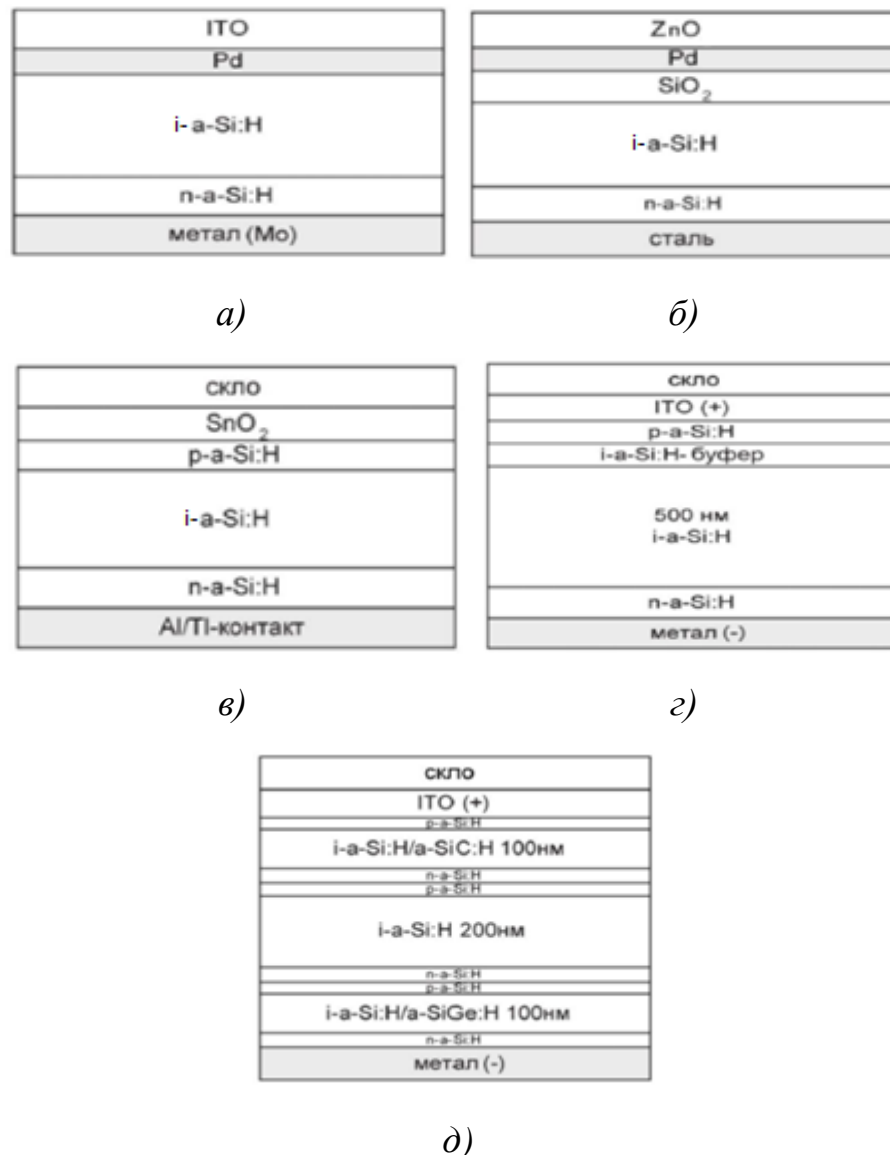


Рисунок 7.4 – Конструкції сонячних елементів на основі плівок аморфного гідрогенізованого кремнію

В якості бар'єру в таких ФЕП можуть використовуватись контакт метал-напівпровідник (рис. 7.4, а), структура МДН (рис. 7.4, б) або р-і-п- структура

(рис. 7.4, в-д). Сонячні елементи формуються шляхом послідовного нанесення відповідних шарів аморфного гідрогенізованого кремнію на підкладки з молібдену або нержавіючої сталі, зі скла високого ступеня очищення, керамічні підкладки або з рулонного полімерного матеріалу.

Найвищу ефективність демонструють сонячні елементи на основі р-і-n-структур, оскільки саме в них реалізується найбільш ефективно розділення генерованих світлом носіїв заряду за рахунок їх дрейфу у вбудованому електричному полі, що зосереджене в нелегованому і-шарі, розташованому поміж р- та n- областями (рис. 7.5). Використання ж класичного р-n- переходу з полем ОПЗ, локалізованим безпосередньо в його околицях, у випадку аморфного кремнію виявляється неефективним внаслідок дуже малої дифузійної довжини носіїв заряду, яка становить близько 100 нм. Таким чином, головний внесок у фотострум роблять носії заряду, що генеровані в результаті поглинання світла в і- області, де присутнє вбудоване поле, а фотоактивне поглинання в легованих р- та n- областях р-і-n- структури не призводить до суттєвого збільшення величини фотоструму.

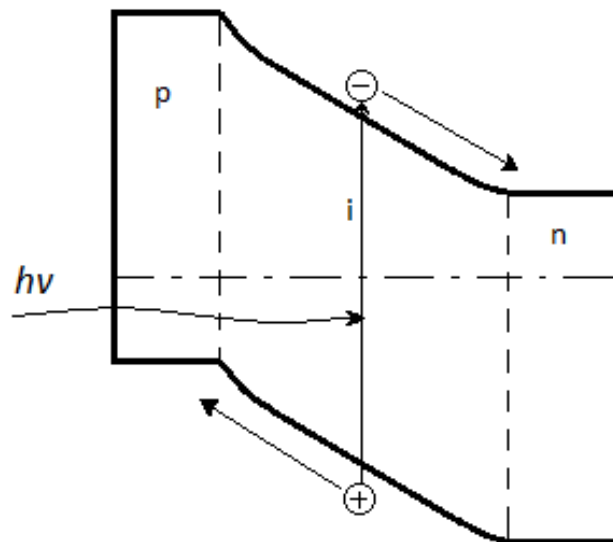


Рисунок 7.5 – Процес просторового розподілу генерованих світлом носіїв заряду під дією вбудованого поля в і- області

Для ефективного поглинання сонячного випромінювання цілком



достатньо, щоб товщина активного шару і-  $\alpha$ -Si:H становила порядку 500 нм. При цьому негативний вплив ефекту Стаблера – Вронського на стабільність параметрів таких сонячних елементів нівелюється з потоншенням активного і- шару, що пояснюється зменшенням впливу індукованих світлом дефектів на ефективність збирання нерівноважних носіїв заряду з активної області зменшеної товщини. В той же час, повнота поглинання сонячного випромінювання в шарах і-  $\alpha$ -Si:H при зменшенні їх товщини може суттєво погіршитись. Отже, має місце протиріччя між ефективністю збирання носіїв заряду та повнотою поглинання випромінювання в потоншених активних областях, розв'язання якого полягає у реалізації пакетних структур з послідовно включеними р-і-п- переходами з порівняно тонкими активними і- шарами (рис. 7.6).

Скло
SnO <sub>2</sub> : F
р-а-Si: H
і-а-Si: H
п-а-Si: H
р-а-Si: H
і-а-Si: H
п-а-Si: H
ZnO або Ag
Al або Ag

Рисунок 7.6 – Пакетна структура сонячного елемента на основі плівок аморфного кремнію

Товщина активних і- областей в пакетних структурах не перевищує 250 нм, і ефект Стаблера – Вронського в них стає незначним, оскільки ефективна довжина дифузії нерівноважних носіїв заряду, що підсилена дрейфом у вбудованому полі, стає більшою за товщину активної області. Втім, головною проблемою в таких ФЕП є забезпечення низького внутрішнього

послідовного опору, обумовленого внутрішніми р-п- переходами між сусідніми послідовно з'єднаними р-і-п- структурами, що потребує підвищення рівня легування відповідних р- та п- шарів та зменшення їх товщини до 10 – 30 нм, щоб забезпечити тунельний механізм переносу носіїв заряду.

Подальше збільшення ефективності перетворення сонячного випромінювання в ФЕП на основі аморфних плівок досягається шляхом реалізації концепції каскадних сонячних елементів (рис. 7.4, д). Верхній елемент такого каскадного ФЕП виконується на основі плівки  $\alpha$ -SiC:H, що має величину щілини рухливості понад 1,8 еВ. Середній елемент має в якості активної області плівку  $\alpha$ -Si:H з енергетичною щілиною близько 1,7 еВ, а нижній виконано на основі шару  $\alpha$ -SiGe:H з найменшим значенням щілини рухливості – від 1,4 еВ до 1,6 еВ в залежності від вмісту германію. Саме в сонячних елементах каскадної конструкції досягнуто рекордний на сьогоднішній день ККД для ФЕП на основі аморфних напівпровідників, стабілізоване значення якого становить 14% (рис. 2.11).

Роль прозорого фронтального контакту в сонячних елементах на основі аморфного гідрогенізованого кремнію відіграють тонкі шари SnO<sub>2</sub>, леговані фтором, плівки ZnO, леговані бором або алюмінієм, а також шари ІТО. Ці плівки одночасно виконують і роль антивідбиваючого покриття.

#### **7.4 Переваги та недоліки сонячних елементів на основі аморфних плівок**

Головними перевагами ФЕП на основі аморфного кремнію у порівнянні з кристалічними аналогами є наступні:

- низький температурний коефіцієнт, який приблизно у 2 рази менший, ніж у кристалічних аналогів, завдяки чому сонячні елементи на основі аморфного кремнію менш схильні до зниження електричної потужності при нагріванні і здатні ефективно працювати в умовах спекотного клімату;

- висока поглинаюча здатність щодо спектрального складу сонячного випромінювання, що дозволяє використовувати тонкі напівпровідникові шари, значно заощаджуючи на матеріалах та забезпечуючи доволі низьку вартість одиниці електричної потужності;
- здатність ефективно перетворювати розсіяне випромінювання слабкої інтенсивності, що забезпечує генерацію електричної енергії при густині потужності світлового потоку  $100 \text{ Вт/м}^2$  і менше, в той час як для кристалічних кремнієвих ФЕП генерація енергії практично припиняється при густині потужності розсіяного випромінювання у  $150 \text{ Вт/м}^2$ ;
- порівняно мала вага панелей на основі аморфних плівок, що можуть бути в 40 разів легшими за кристалічні кремнієві панелі, завдяки чому їх можна монтувати на фасадах та дахах будинків, конструкції яких не дозволяють розміщення важких кристалічних батарей;
- гнучка конструкція дозволяє застосовувати аморфні панелі на поверхнях зі складним рельєфом, як-то дахи транспортних засобів, одяг, тощо;
- панелі на основі аморфного кремнію можуть бути виконані напівпрозорими, що дозволяє їх використання в якості світлопрозорих огорожуючих конструкцій будівель.

Поряд із зазначеними перевагами існують і суттєві недоліки ФЕП на основі плівок аморфного гідрогенізованого кремнію, головними з яких є:

- низький ККД перетворення, який становить близько 7% для переважної більшості серійних зразків, що обумовлює більшу необхідну площу для монтажу в порівнянні з кристалічними панелями тієї ж номінальної потужності;
- швидка деградація параметрів в процесі експлуатації, пов'язана з ефектом Стаблера – Вронського, що скорочує термін служби таких панелей до 10 років проти 25 – 30 років у кристалічних ФЕП.

Втім, дослідження в напрямку підвищення ефективності та стабільності

параметрів сонячних елементів на основі плівок  $\alpha$ -Si:H не припиняються, і подальші перспективи пов'язуються, зокрема, з вдосконаленням існуючих конструкцій каскадних перетворювачів та комбінуванням шарів аморфного на мікрокристалічного кремнію.

### 7.5 Питання для самоперевірки

1. Вкажіть особливості будови аморфних твердих тіл в порівнянні з кристалічними.
2. Поясніть механізм впливу атомів водню на властивості аморфного кремнію.
3. Вкажіть основні властивості аморфного водневого кремнію.
4. Розкрийте сутність ефекту Стаблера – Вронського.
5. Опишіть методи отримання плівок аморфного водневого кремнію.
6. Які типи бар'єрних структур можуть використовуватись в конструкціях сонячних елементів на основі плівок  $\alpha$ -Si:H?
7. Опишіть будову та принцип дії елементів з р-і-n- структурою в якості бар'єру.
8. Які підходи застосовуються в сонячних елементах на основі плівок  $\alpha$ -Si:H для зменшення негативного впливу ефекту Стаблера – Вронського?
9. Вкажіть типові значення товщини активних областей в сонячних елементах на основі аморфного водневого кремнію?
10. Опишіть типову конструкцію каскадного сонячного елемента на основі аморфних напівпровідникових плівок.
11. Вкажіть типове та рекордне значення стабілізованої ефективності сонячних елементів на основі плівок аморфного водневого кремнію.
12. Які матеріали виконують роль прозорого фронтального електроду

в сонячних елементах на основі плівок  $\alpha$ -Si:H?

13. Назвіть матеріали, що виконують роль підкладки при формуванні сонячних елементів з аморфного гідрогенізованого кремнію.
14. Назвіть головні переваги та недоліки ФЕП на основі аморфного гідрогенізованого кремнію в порівнянні з їх кристалічними аналогами.
15. Які перспективи подальшого збільшення долі тонкоплівкових ФЕП на основі аморфного кремнію в загальному обсязі виробництва сонячних елементів?

**Рекомендована література [2, 4, 10, 37]**

## 8 ПЕРСПЕКТИВНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Останнім часом увагу дослідників привертає можливість створення сонячних елементів на основі низки матеріалів, що відрізняються за своїми властивостями від класичних напівпровідників. Такими новітніми матеріалами для ФЕП є, зокрема, плівки органічних полімерів, перовскітів, барвники, а також квантово-розмірні структури.

### 8.1 Сонячні елементи на основі органічних матеріалів

Сонячні елементи на основі органічних плівок мають низку позитивних властивостей, завдяки яким вони можуть скласти реальну конкуренцію неорганічним елементам. До таких властивостей відносяться: малі витрати і низька вартість матеріалів, їх екологічна безпека і легкість утилізації, низька вартість виробництва, гнучкість модулів і пов'язана з нею зручність транспортування і монтажу. Втім, головним недоліком ФЕП на основі органічних матеріалів є проблема стабільності властивостей, притаманна зв'язаним полімерам, що призводить до часової деградації параметрів.

Як і у випадку сонячних елементів на основі неорганічних напівпровідників, в ФЕП на основі органічних плівок також реалізується просторове розділення вільних носіїв заряду – електронів та дірок, що генеруються внаслідок поглинання світла. Втім, є значна різниця в механізмі генерації електронно-діркових пар, пов'язана з більшою енергією зв'язку між електроном і діркою в органічних твердих тілах, що мають молекулярну будову. Так, на першому етапі внаслідок поглинання фотону електрон переходить з основного стану (стан НОМО – Highest Occupied Molecular Orbital), на збуджений енергетичний рівень молекули (стан ЛУМО – Lowest Unoccupied Molecular Orbital), утворюючи зв'язану електронно-діркову пару – екситон (рис. 8.1, а). Доволі високі енергії зв'язку екситону, що становлять порядку 0,3 - 0,5 еВ, унеможливають його дисоціацію з утворенням вільного

електрона і дірки лише за рахунок теплової енергії. Дисоціації екситону можна досягти на границі поділу з ще одним полімерним шаром, який має зміщені рівні енергії на величину, більшу за енергію зв'язку екситону. Отже, для утворення вільних просторово розділених електронно-діркових пар потрібно два шари органічних плівок: перший, *донорний шар*, в якому відбувається генерація екситонів при поглинанні світла з наступною віддачею електронів внаслідок дисоціації до іншого шару, який називають *акцепторним шаром* (рис. 8.1, б).

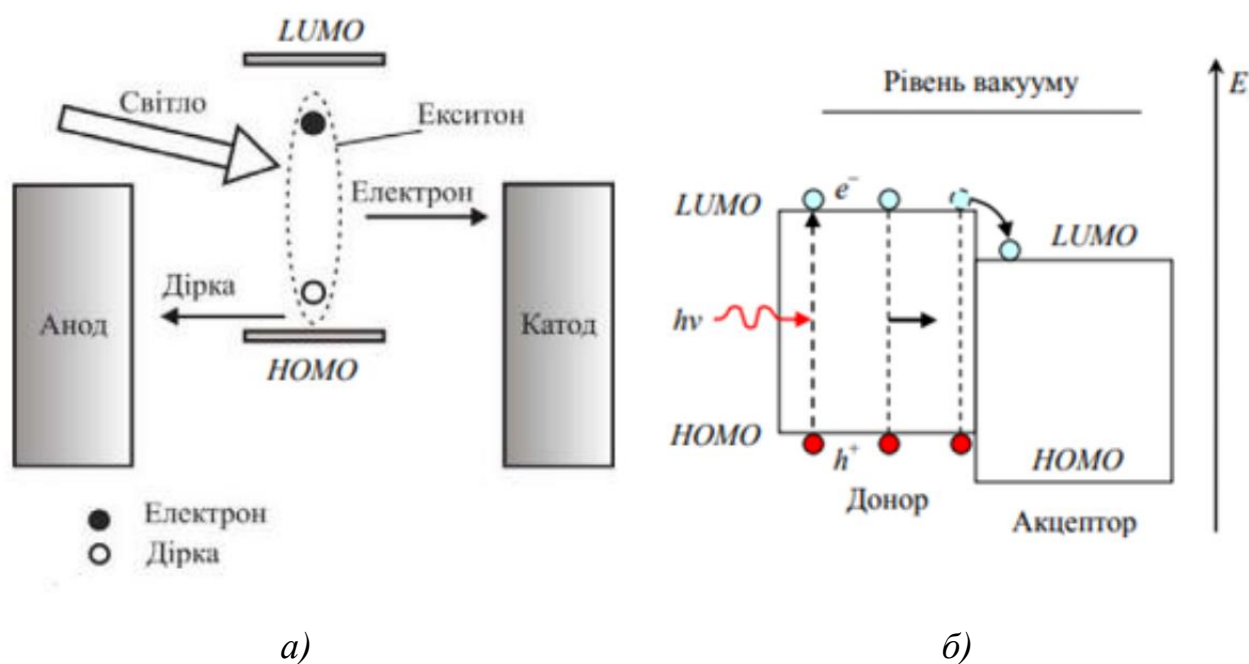


Рисунок 8.1 – Схема утворення зв'язаного екситону (а) та його дисоціація на межі донорного та акцепторного шарів з утворенням просторово розділених вільних електрона та дірки (б)

В якості матеріалів для створення активних шарів використовують плівки на основі вуглецю, наприклад, полі(3-гексилтіофен) (РЗНТ), метиловий ефір [6,6]-феніл-С60-масляної кислоти (РС60ВМ), полі(3,4-етилендіокситіофен) полістиролсульфонат (PEDOT:PSS), тощо. Донорний та акцепторний шари наносять послідовно методом струменевого друку на поверхню прозорої підкладки з наперед сформованою плівкою анодного електроду, в якості якого

використовують, зазвичай, ІТО (рис. 8.2). Для зразків невеликої площі може бути застосований метод центрифугування.

Катод формують у вигляді металевих смужок, що наносяться, зазвичай, вакуумним осадженням. В якості металу для формування катодних електродів найчастіше застосовують алюміній.

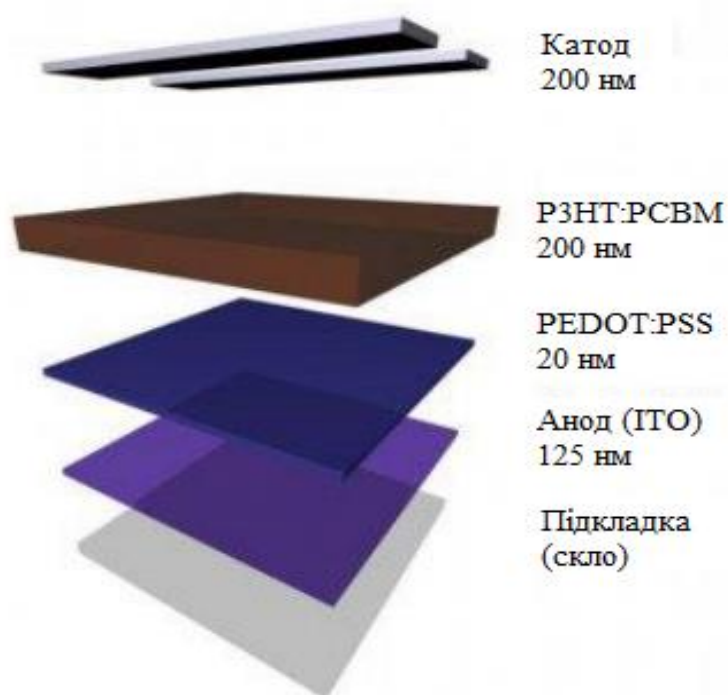


Рисунок 8.2 – Структура сонячного елемента на основі органічних плівок

Зазвичай ефективність таких сонячних елементів не перевищує 10 – 12%, а рекордне значення на сьогодні становить 17,5%. Втім, нерозв’язана остаточно проблема стабільності параметрів, порівняно вузький діапазон спектру поглинання сонячного випромінювання органічними плівками не дозволяють поки що вести мову про успішну комерціалізацію цієї технології.

## 8.2 Сонячні елементи на барвниках

Перетворювачі сонячного випромінювання, що використовують сенсibilізовані барвники, є тонкоплівковими елементами, що вперше були



запропоновані у 1991 р. швейцарським вченим Гретцелем (Grätzel), тому часто в літературі їх називають елементами Гретцеля. Такий елемент складається зі скляної підкладки з шаром прозорого електропровідного оксиду, на якій сформовано анодний шар у вигляді плівки високопористого нанокристалічного діоксиду титану товщиною порядку 10 мкм, вкритої мономолекулярним шаром барвника (рис. 8.3). Пористий анод просочено рідким йодним електролітом. В якості катоду використовується шар платини.

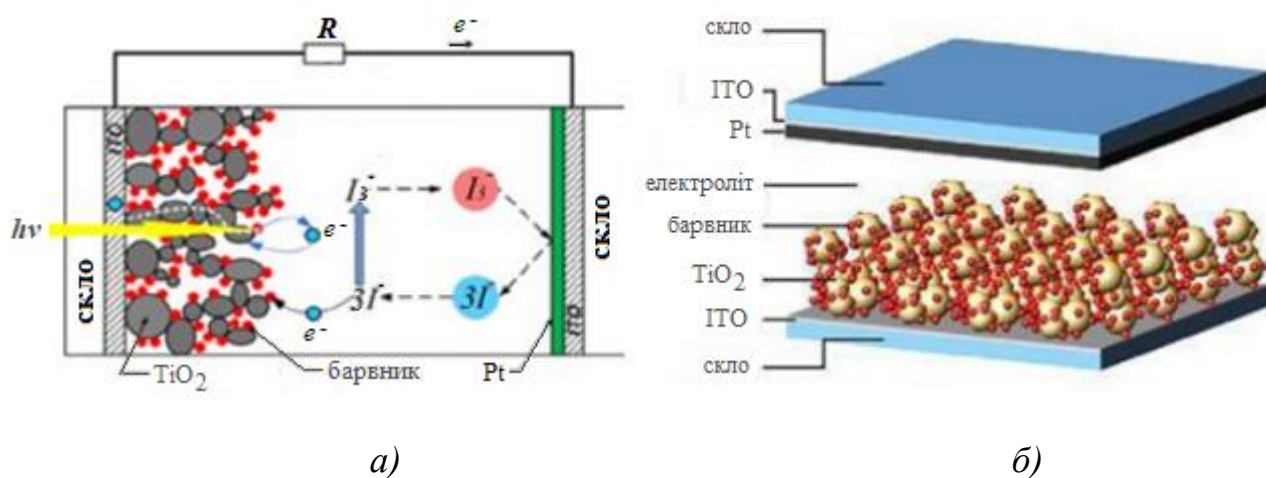


Рисунок 8.3 – Принцип дії (а) та конструкція (б) сонячного елемента на основі барвника

Сонячне випромінювання потрапляє крізь прозорий електрод і поглинається барвником. В результаті такого поглинання електрон в молекулі барвника переходить з основного у збуджений стан, тобто, відбувається фотозбудження барвника. Збуджений електрон передається від молекули барвника в зону провідності діоксиду титану та дифундує крізь плівку  $\text{TiO}_2$  до прозорого електродного шару ІТО, переходить у зовнішнє коло та досягає протилежного електроду з платини (рис. 8.3, а).

Молекула барвника, втративши фотозбуджений електрон, стає окисленою і для повернення у вихідний стан їй потрібно відновитися, отримавши електрон ззовні. Таке відновлення барвника відбувається за рахунок отримання електрону від йодид-іону електроліту, який в результаті передачі

барвнику електрону відновлюється до молекули, дифундує до платиного електроду, де, отримуючи новий електрон, знову перетворюється на йодид-іон. Такі процеси окислення-відновлення барвника, що відбуваються під дією світла та за участі іонів електроліту, забезпечують протікання струму в сонячному елементі.

Основними недоліками елементу Гретцеля є висока корозійна активність електроліту і висока вартість платини. Однак ці проблеми можна вирішити, застосувавши замість Pt електроди на основі вуглецю або CoS, а також менш агресивні органічні електроліти. Значно стримують практичне використання сонячних елементів на барвниках і проблеми деградації їх властивостей під дією ультрафіолетового випромінювання, необхідність надійної герметизації елементів, що містять рідкий електроліт, значний вплив температури на властивості електроліту та ряд інших.

Втім, пошук рішень зазначених проблем продовжується. Розробляються нові електроліти та барвники, що відрізняються більш стабільними щодо впливу радіаційних та температурних чинників властивостями. На сьогоднішній день рекордне значення ефективності, що досягнуте в лабораторних умовах, становить 12,3% і наявні перспективи щодо подальшого підвищення ККД таких ФЕП.

### **8.3 Фотоелектричні перетворювачі на основі перовскітів**

*Перовскіти* – це група кристалічних матеріалів, що об'єднані формулою  $ABX_3$  та мають кристалічну структуру, подібну до природного мінералу перовскіту – титанату кальцію ( $CaTiO_3$ ).

Найбільш широко в даний час для створення сонячних елементів використовують складні сполуки, що містять в якості елемента А в загальній формулі перовскітів органічний катіон метиламоній ( $CH_3NH_3^+$ ) або формаидин ( $NH_2CHNH_2^+$ ), елементом В є неорганічний катіон, зазвичай, свинець ( $Pb^{2+}$ ), а аніоном Х - хлор ( $Cl^-$ ) або йод ( $I^-$ ). Комбінуючи ці складові,

вдається ефективно керувати властивостями плівок перовскітів, зокрема шириною забороненої зони, спектром поглинання, електрофізичними параметрами. Так, плівки на основі перовскітів, що містять в якості елемента В катіон свинцю, відрізняються високим коефіцієнтом поглинання у видимому діапазоні сонячного спектру, мають доволі значні дифузійні довжини носіїв заряду. Окрім того, технологія виготовлення таких плівок доволі проста і може бути реалізована при низьких температурах.

Структура сучасних сонячних елементів на основі цих матеріалів в переважній більшості є планарною, близькою до тієї, що застосовується в ФЕП на основі органічних плівок (рис. 8.2). Втім, перші успішні сонячні елементи, що використовували фотоактивну область з перовскітів, про які було заявлено у 2012 році, хоча й були твердотільними, проте базувались на використанні пористого шару діоксиду титану, подібно до ФЕП на барвниках (рис. 8.3). Надалі в деяких конструкціях пористий шар  $\text{TiO}_2$  замінювали на  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Однак, в обох цих випадках головним недоліком є те, що формування шарів  $\text{TiO}_2$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3$  потребує доволі високих температур. Ультрафіолетова нестабільність діоксиду титану також стала стимулом щодо переходу від конструкцій з пористими шарами до планарних перовскітових сонячних елементів, які не передбачають формування цих шарів. Хоча на початковому етапі планарні ФЕП дещо програвали в ефективності перовскітовим елементам з пористими шарами, втім доволі швидко наздогнали їх за цим параметром.

Плівки перовскітів можуть отримуватись як вакуумним нанесенням, так і з розчинів. Вакуумне нанесення перовскітів вимагає спільного випаровування органічної метиламмонієвої складової одночасно з неорганічними компонентами (галогенідами свинцю), що потребує розробки спеціалізованих випарних камер. На фоні цього, формування плівок з розчинів виглядає більш привабливо, а сучасні технології отримання перовскітів з розчинів дозволяють формувати плівки, які за властивостями не поступаються тим, що отримані вакуумним нанесенням. Розробляються також методи отримання плівок перовскітів шляхом їх друку на гнучкій основі з використанням

спеціалізованих перовскітових фарб, що дозволить створити продуктивну низькотемпературну технологію для масового виготовлення цих сонячних елементів.

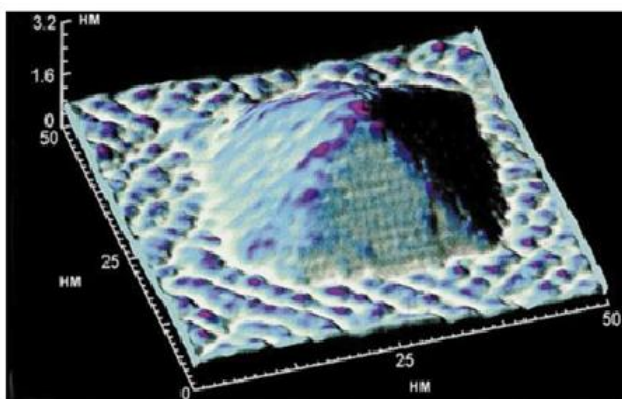
Незважаючи на те, що ефективність сонячних елементів на основі перовскітів впритул наблизилась до ефективності монокристалічних кремнієвих ФЕП і наразі перевищила для лабораторних зразків 25% (рис. 2.11), до кінця не вирішеною все ще залишається проблема часової стабільності та відтворюваності параметрів перовскітових елементів. Прогнозується, що майбутній прогрес цієї технології буде пов'язаний з вдосконаленням хімічного складу та якості плівок, а також комерціалізацією тандемних структур, зокрема, в системі перовскіт – монокристалічний кремній, де останнім часом вдалося досягти значних успіхів.

#### **8.4 Сонячні елементи з квантовими точками**

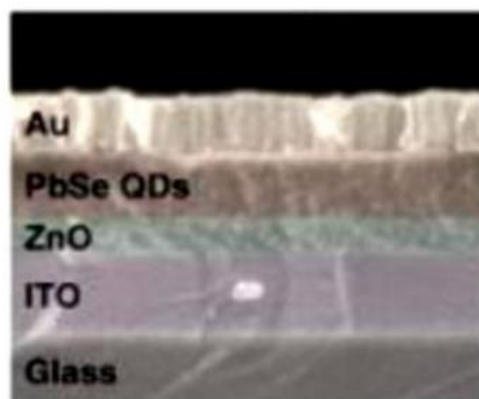
Використання квантових точок є ще одним напрямком на шляху дослідження нових можливостей підвищення ефективності перетворення сонячного випромінювання.

Квантова точка – це кристал, що має у всіх трьох вимірах розміри порядку декількох нанометрів (рис. 8.4, а). Особливістю квантових точок є те, що їх розмір суттєво впливає на спектр електронних станів, а отже, і на оптичні та електричні властивості матеріалу. Квазібезперервні електронні стани в зоні провідності та валентній зоні, притаманні об'ємному кристалу, зі зменшенням його розмірів до нанометрових, перетворюються на суто дискретні, подібні до спектру енергетичних рівнів окремих атомів, а відстань між найвищим заповненим та найнижчим вільним рівнями енергій стає більшою за ширину забороненої зони матеріалу  $E_g$  (рис. 8.4, б). Чим менші геометричні розміри квантової точки, тим суттєвішою стає ця відмінність від об'ємних матеріалів. Отже, варіюючи розмір квантових точок, можна не змінюючи матеріал керувати спектром електронних станів в кристалі, і таким чином впливати на

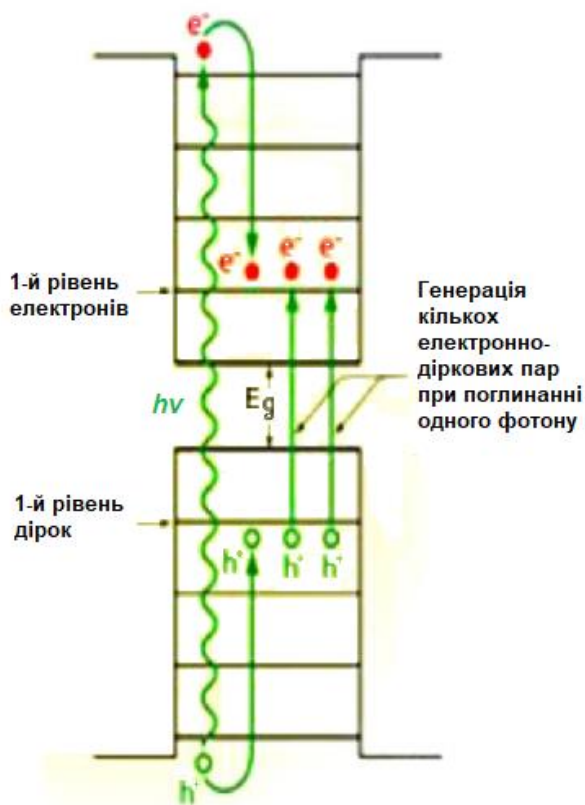
його оптичні та електричні властивості, зокрема, і на спектр поглинання, підлаштовуючись під спектральний розподіл сонячного випромінювання.



a)



в)



б)

Рисунок 8.4 – Зовнішній вигляд квантової точки (а), схема її електронних рівнів (б) та поперечний розріз сонячного елемента з масивом квантових точок на основі PbSe (в)

Перерозподіл електронних станів в квантових точках здатен впливати й

на внутрішню квантову ефективність, що являє собою кількість електронно-діркових пар, утворених при поглинанні одного фотону з енергією  $h\nu$ . Так, в квантових точках високоїмовірним є процес виникнення відразу декількох пар носіїв заряду при поглинанні лише одного фотону (рис. 8.4, б). Вперше на діючому зразку сонячного елемента це було експериментально доведено дослідниками з NREL з використанням структури ФЕП, показаної на рис. 8.4, в. Зразок сформований на скляній підкладці з шаром ІТО в якості прозорого контакту. Наступним наносився наноструктурований шар ZnO та масив квантових точок селеніду свинцю з добавкою етандітіолу та гідразину. В якості верхнього контакту використовувався тонкий шар золота. Такий сонячний елемент продемонстрував значення внутрішньої квантової ефективності на рівні 130%, а отже кожен поглинутий фотон генерував в середньому 1,3 електрони.

На даний час проводиться розробка та дослідження різних конструкцій та технологій сонячних елементів з квантовими точками, зокрема й з використанням фарби, що містить нанорозмірні кристали. Така фарба або паста може бути нанесена на підкладку з провідним шаром для формування структури сонячного елемента. Рекордне значення ефективності зразків сонячних елементів з квантовими точками становить на сьогодні трохи більше 16%.

### **8.5 Питання для самоперевірки**

1. Перелічіть відомі вам новітні матеріали для сонячних елементів.
2. Вкажіть головні властивості плівок органічних матеріалів, що обумовлюють перспективу їх використання в сонячних елементах.
3. Опишіть особливості механізму генерації вільних носіїв заряду в органічних твердих тілах.
4. В чому полягає функція донорного та акцепторного шарів органічних сонячних елементів?

5. Опишіть типову структуру та технологію виготовлення сонячного елемента на основі плівок органічних матеріалів.
6. Вкажіть типове та рекордне значення ефективності перетворення сонячного випромінювання органічними елементами.
7. Які проблеми перешкоджають успішній комерціалізації органічних сонячних елементів?
8. Опишіть будову та принцип дії сонячних елементів на сенсibilізованих барвниках.
9. Назвіть основні переваги та недоліки сонячних елементів на барвниках.
10. Які значення ефективності досягнуто в сонячних елементах на сенсibilізованих барвниках на сьогоднішній день?
11. Дайте визначення перовскітів.
12. Які властивості перовскітів обумовлюють перспективу їх використання в сонячній фотовольтаїці?
13. Опишіть відомі вам конструкції сонячних елементів на перовскітах.
14. Які технології можуть бути застосовані для формування плівок перовскітів?
15. Вкажіть значення ефективності перовскітових сонячних елементів, досягнуті на сьогоднішній день.
16. Які проблеми існують на шляху масового застосування сонячних елементів з перовскітів?
17. Що являють собою квантові точки? Які особливості їх спектру електронних станів у порівнянні з об'ємними кристалами?
18. Як впливають розміри квантових точок на спектр електронних станів?
19. Які саме явища в квантових точках забезпечують перспективу їх використання для створення високоефективних сонячних елементів?
20. Опишіть будову та характеристики сонячного елемента з

квантовими точками, запропоновану дослідниками з NREL.

21. Які значення ефективності сонячних елементів з квантовими точками досягнуті на сьогоднішній день?
22. Вкажіть перспективи подальшого розвитку технологій сонячних елементів з квантовими точками.

**Рекомендована література [39 – 43]**



## 9 ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ МОДУЛІ

### 9.1 Класифікація фотоелектричних модулів

*Модулем сонячних елементів або фотоелектричною панеллю* називають групу ФЕП, що електрично з'єднані між собою та скомпоновані у спільному корпусі.

Модулі ФЕП можуть бути класифіковані за низкою ознак, а саме: за інтенсивністю сонячного випромінювання, що перетворюється; за кристалічною структурою напівпровідникового матеріалу ФЕП; за спектром перетворюваного сонячного випромінювання; за хімічним складом напівпровідника; за товщиною активного напівпровідникового шару; за кількістю бар'єрних структур, що приймають участь у фотовольтаїчному ефекті, тощо.

Так, в залежності від *інтенсивності випромінювання*, що надходить на приймальну поверхню ФЕП, фотоелектричні модулі поділяють на модулі неконцентрованого та концентрованого сонячного випромінювання. Перша група модулів перетворює як пряму, так і дифузну компоненту сонячного випромінювання і не містить у своєму складі оптичних елементів, що збільшують густину світлового потоку (рис. 9.1, а).



а)



б)

Рисунок 9.1 – Модулі неконцентрованого (а) та концентрованого (б) сонячного випромінювання у складі фотоелектричної станції [44]

Друга ж група модулів працює сумісно з оптичними концентраторами, в якості яких використовуються фокліни, фокони, лінзи та інші оптичні елементи, що збільшують інтенсивність сонячного випромінювання, яке спрямовується на приймальну поверхню ФЕП (рис. 9.1, б). Такі модулі перетворюють пряму складову випромінювання, оскільки саме чітко спрямовані сонячні промені здатні бути сконцентрованими оптичними елементами.

За *кристалічною структурою* модулі сонячних елементів поділяють на монокристалічні, полікристалічні та панелі на основі плівок аморфних напівпровідників.

В залежності від *спектрального складу сонячного випромінювання*, що перетворюється сонячними елементами, модулі поділяють на такі, що призначені для перетворення космічного сонячного спектру, та наземні фотоелектричні панелі. Космічні модулі мають низку особливостей в порівнянні з наземними фотоелектричними панелями, причому однією з головних є підвищена стійкість щодо опромінення ФЕП високоенергетичними частинками, а також висока фоточутливість в короткохвильовій ділянці сонячного спектру.

За *хімічним складом* напівпровідникового матеріалу розрізняють кремнієві фотоелектричні модулі, модулі на основі арсеніду галію, телуриду кадмію, діселеніду міді – індію, тощо. Така класифікація отримала найбільше поширення у практичному застосуванні.

В залежності від *товщини шару* напівпровідникового матеріалу розрізняють тонкоплівкові модулі та панелі на основі об'ємних напівпровідників. До останніх переважно відносяться модулі, що виготовляються із застосуванням пластин моно- та мультикристалічного кремнію, а також арсенід галієві сонячні панелі.

За *кількістю бар'єрних структур* в ФЕП модулі сонячних елементів поділяють на такі, що побудовані на моноперехідних та багатоперехідних

сонячних елементах. До останніх відносяться, зокрема, модулі монолітних каскадних ФЕП, що одночасно є і концентраторними, а також низка конструкцій тонкоплівкових панелей, наприклад, на основі шарів аморфного гідрогенізованого кремнію.

## **9.2 Конструкції фотоелектричних модулів**

Конструкція фотоелектричного модуля значною мірою визначається типом сонячних елементів, з яких він виготовлений. Так, у випадку ФЕП на основі кристалічних напівпровідникових пластин модуль виготовляється у вигляді жорстких панелей, в той час як при застосуванні сонячних елементів на основі тонких плівок, наприклад, з аморфного гідрогенізованого кремнію, фотоелектрична панель може бути виготовлена і на гнучкій основі, приміром, металевій фользі чи полімерній плівці.

Особливості конструкції модуля можуть диктуватися і його призначенням. Приміром, модулі, що використовуються у так званій будівельній фотовольтаїці (BIPV - системи), виконуються або у вигляді жорстких панелей при їх застосуванні в якості віконних чи фасадних блоків (рис. 9.2), або мають гнучку основу, якщо вони слугують матеріалом для облаштування покрівель (рис. 9.3). В останньому випадку в якості активного шару найчастіше використовують тонкі напівпровідникові плівки з аморфного гідрогенізованого кремнію, телуриду кадмію або діселеніду міді – індію – галію.

Незважаючи на широке різноманіття конструкцій, найбільш поширеними при будівництві фотоелектричних станцій на даний час є жорсткі панелі на основі моно- та мультикристалічного кремнію, оскільки вони мають найпривабливіше співвідношення між вартістю, терміном експлуатації та енергетичними показниками. Типова будова такої панелі наведена на рис. 9.4.



Рисунок 9.2 – Застосування фотоелектричних панелей в якості світлопрозорих конструкцій будівлі



Рисунок 9.3 – Гнучкі сонячні панелі на даху будинку, що виконують роль покрівельного матеріалу

У типовій панелі на основі кристалічного кремнію ФЕП електрично з'єднують між собою за допомогою струмопровідних стрічок, формуючи ланцюги сонячних елементів. Як правило, застосовують послідовне електричне з'єднання елементів між собою, втім на ринку зустрічаються і зразки, в яких

реалізовано змішане, послідовно-паралельне, з'єднання ФЕП. Кількість паралельних ланцюгів при цьому, зазвичай, не перевищує двох і зустрічається, головним чином в малопотужних панелях, зібраних з сонячних елементів порівняно невеликої площі.



Рисунок 9.4 – Будова сонячної панелі на основі кристалічних кремнієвих ФЕП

Якщо фотоелектричний модуль складається з  $K$  однакових стрічок, що з'єднані між собою паралельно, причому кожна стрічка містить  $N$  послідовно з'єднаних ФЕП (рис. 9.5), то струм та напруга модуля будуть визначатися у відповідності до виразів:

$$I = \sum_{i=1}^K I_i \quad ; \quad (9.1)$$

$$U = \sum_{i=1}^N U_i \quad . \quad (9.2)$$

У припущенні, що всі ФЕП у складі модуля є однаковими, струм та напруга панелі запишуться у вигляді:

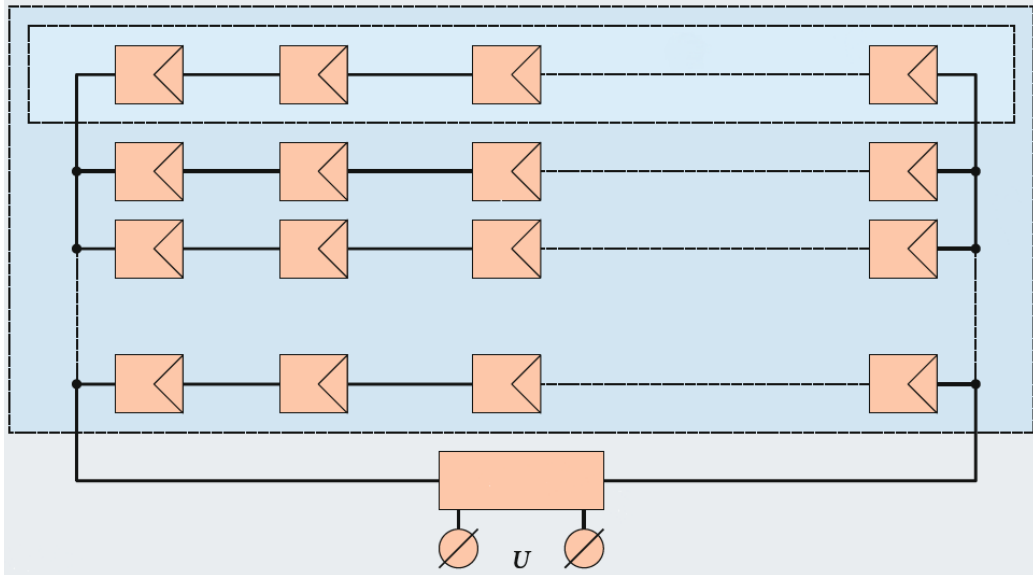


Рисунок 9.5 – Сонячна панель зі змішаною комутацією ФЕП

$$I = I_{cell}K, \quad (9.3)$$

де  $I$  – результуючий струм модуля;  $I_{cell}$  – величина струму, що генерує ФЕП;  $K$  – кількість паралельно з'єднаних стрічок в модулі.

$$U = U_{cell}N, \quad (9.4)$$

де  $U$  – напруга, що генерується модулем;  $U_{cell}$  – величина напруги, що генерується одним ФЕП;  $N$  – кількість послідовно з'єднаних ФЕП у кожній стрічці.

Як слідує з виразів (9.3) та (9.4), параметри фотоелектричного модуля повністю визначаються параметрами ФЕП, що його складають.

Для захисту модуля від дії оточуючого середовища його розміщують між двома шарами прозорої полімерної плівки з етилвенілацетату (EVA) і піддають ламінації (*інкапсуляції*). Інкапсульований фотоелектричний модуль розташовують між верхнім загартованим склом та нижньою полімерною, рідше металеву, підкладкою. Отриману конструкцію фіксують з боків за допомогою алюмінієвого профілю. З тильної сторони розміщують розподільчу коробку, куди заводять кінці струмопровідної стрічки від модуля ФЕП.

Ефективність фотоелектричних модулів дещо менша за ККД сонячних елементів, з яких вони побудовані. Це пов'язано з додатковими втратами при розміщенні ФЕП у панелі: мають місце додаткові оптичні втрати, обумовлені відбиванням світла від покривного скла; електричні втрати на опорі струмопровідної стрічки, наявність ділянок панелі, не покритих сонячними елементами, тощо. Так, сучасні панелі на основі монокристалічного кремнію в умовах STC мають ефективність від 17% до понад 20%, а модулі з мультикристалічних кремнієвих ФЕП демонструють ККД на рівні від 15% до 18%.

Що стосується серійних тонкоплівкових модулів на основі аморфного кремнію, системи CdS/CdTe, селеніду міді-індію-галію, то типові значення їх ефективності нижчі і знаходяться в межах від 7% до 13%. Окрім доволі невисокої ефективності, вони мають і менший строк служби – до 15-20 років замість 25-30 років для кристалічних панелей. Тому, доля тонкоплівкових модулів на ринку на сьогодні не перевищує 8%.

Найбільший сегмент ринку фотоелектричних панелей (близько 80%) на сьогоднішній день займають кристалічні кремнієві модулі, що обумовлено доволі високими їх електричними параметрами поряд з прийнятною вартістю. Втім, протягом останнього десятиріччя активно розробляються новітні сонячні панелі на основі органічних та полімерних матеріалів, що мають суттєво нижчу вартість в порівнянні з модулями на основі класичних напівпровідників. На сьогоднішній день досягнуто ККД таких панелей на рівні 10 - 15%, однак продовжуються дослідження з метою стабілізувати склад фотоактивного шару, що деградує під дією сонячного випромінювання.

### **9.3 Параметри фотоелектричних панелей**

До головних електричних параметрів, що описують роботу фотоелектричної панелі незалежно від її типу, відносять наступні: струм короткого замикання  $I_{SC}$ , напруга холостого ходу  $U_{OC}$ , номінальна потужність



$P_{mpp}$ , струм в точці максимальної потужності  $I_{mpp}$ , напруга в точці максимальної потужності  $U_{mpp}$  та ефективність перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію (рис. 9.6).

#### Mechanical Properties

Cells	6 x 10
Cell vendor	LG
Cell type	Monocrystalline
Cell dimensions	156 x 156 mm <sup>2</sup> / 6 x 6 in <sup>2</sup>
# of busbar	3
Dimensions (L x W x H)	1640 x 1000 x 35 mm 64.57 x 39.37 x 1.38 in
Static snow load	5400 Pa / 113 psf
Static wind load	2400 Pa / 50 psf
Weight	16.8 ± 0.5 kg / 36.96 ± 1.1 lb
Connector type	MC4 connector IP 67
Junction box	IP 67 with 3 bypass diodes
Length of cables	2 x 1000 mm / 2 x 39.37 in
Frame	Anodized aluminum

#### Certifications and Warranty

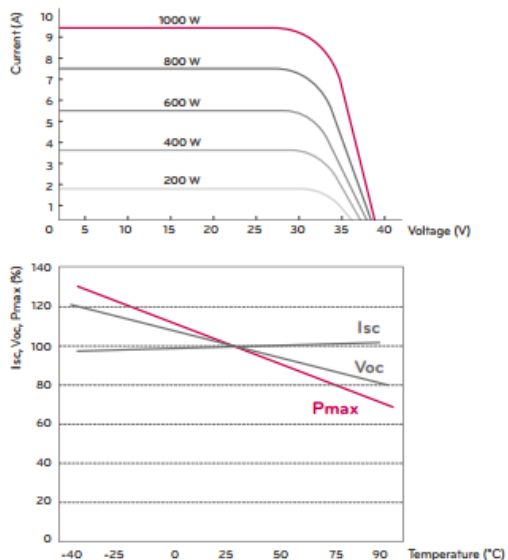
Certifications	IEC 61215, IEC 61730-1/-2, UL 1703, ISO 9001, IEC 61701(In progress), DLG-Fokus Test "Ammonia Resistance" (In progress)
Product warranty	10 years
Output warranty of Pmax (measurement Tolerance ± 3%)	Linear warranty*

\* 1) 1st year: 97%, 2) After 2nd year: 0.7% annual degradation, 3) 80.2% for 25 years

#### Temperature Coefficients

NOCT	45 ± 2 °C
Pmpp	-0.42 %/K
Voc	-0.31 %/K
Isc	0.03 %/K

#### Characteristic Curves



#### Electrical Properties (STC\*)

Power (Pmp)	290 W
MPP voltage (Vmpp)	31.8
MPP current (Impp)	9.19
Open circuit voltage (Voc)	39.2
Short circuit current (Isc)	9.80
Module efficiency (%)	17.7
Operating temperature (°C)	-40 ~ +90
Maximum system voltage (V)	600(UL), 1000(IEC)
Maximum series fuse rating (A)	15
Power tolerance (%)	0 ~ +3

\* STC (Standard Test Condition): Irradiance 1000 W/m<sup>2</sup>, module temperature 25 °C, AM 1.5

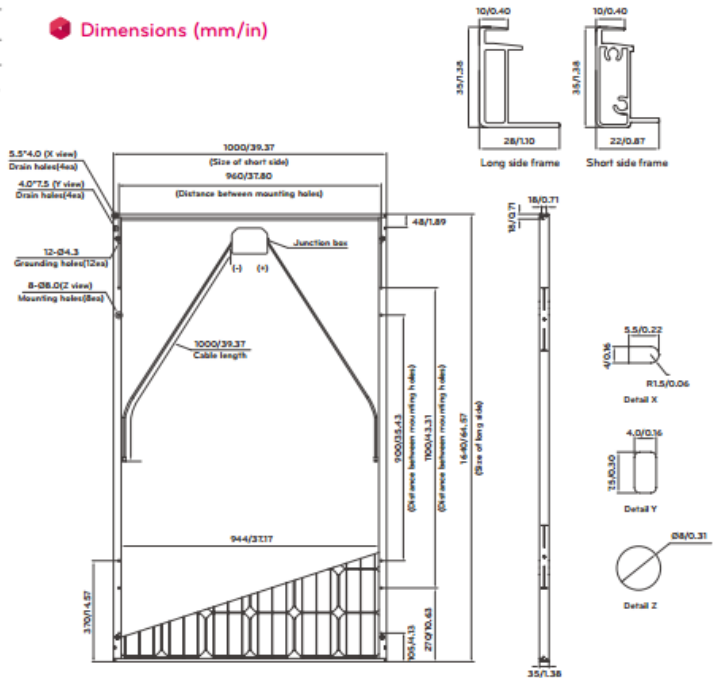
\* The nameplate power output is measured and determined by LG Electronics at its sole and absolute discretion.

#### Electrical Properties (NOCT\*)

Power (Pmp)	290 W
Maximum power (Pmpp)	213
MPP voltage (Vmpp)	29.1
MPP current (Impp)	7.33
Open circuit voltage (Voc)	36.2
Short circuit current (Isc)	7.89
Efficiency reduction (from 1000 W/m <sup>2</sup> to 200 W/m <sup>2</sup> )	< 4.5 %

\* NOCT (Nominal Operating Cell Temperature): Irradiance 800 W/m<sup>2</sup>, ambient temperature 20 °C, wind speed 1 m/s

#### Dimensions (mm/in)



\* The distance between the center of the mounting/grounding holes

Рисунок 9.6 – Характеристики та параметри панелі LG290N1C [45]

Окрім електричних параметрів, що зазначаються, зазвичай, для умов STC та NOCT, в технічному паспорті модуля також вказують його механічні



параметри (кількість сонячних елементів, їх тип та розмір, габаритні розміри панелі, маса, допустиме снігове та вітрове навантаження, тощо), дані щодо сертифікації панелі, гарантійні зобов'язання виробника, температурні параметри (температура панелі в умовах NOCT, температурні коефіцієнти потужності, напруги і струму), а також наводять світлові ВАХ при різних рівнях освітленості та, в деяких випадках, при різних температурах. Низка виробників надає креслення панелі із зазначенням характерних розмірів, що спрощує інженерні розрахунки під час проектування системи монтажу сонячних модулів.

На даний момент на українському ринку фотоелектричної продукції представлені, головним чином, модулі на основі кристалічного кремнію з широким спектром номінальної потужності від кількох десятків до сотень ват. Втім, присутня й доволі обмежена пропозиція щодо тонкоплівкових модулів на основі аморфного кремнію, CdS/CdTe, CIS та CIGS.

Щодо параметрів сонячних панелей з кристалічного кремнію, то найбільша доля на вітчизняному ринку припадає на модулі з номінальною потужністю від 270 Вт до 370 Вт, що широко застосовуються при будівництві індивідуальних дахових фотоелектричних систем. Втім пропонуються і модулі потужністю 50 – 120 Вт, якими, зазвичай, комплектуються мобільні автономні сонячні станції для потреб туризму та військового застосування. Щодо модулів з номінальною потужністю понад 500 Вт, що також присутні на ринку, то їх використання є доцільним при реалізації масштабних проектів з будівництва централізованих фотоелектричних станцій, що працюють в загальній електромережі, коли в силу наявності значних вільних площ не постає гостро проблема затінення панелі оточуючими об'єктами.

Основною тенденцією, що простежується останніми роками, є збільшення генерованої модулями напруги при практично незмінній силі струму, яка становить близько 10 А. Це досягається послідовним з'єднанням більшої кількості сонячних елементів у модулі задля уникнення зростання втрат потужності на електричному опорі системи, що мало б місце у разі

підвищення потужності панелей за рахунок збільшення генерованого ними струму.

#### 9.4 Особливості роботи сонячних панелей в умовах часткового затінення приймальної поверхні

Затінення приймальної поверхні фотоелектричних модулів трапляється, головним чином зранку та у вечірні часи, коли кут висоти сонця є незначним і оточуючі об'єкти перешкоджають вільному надходженню сонячного випромінювання до панелі. Зважаючи на послідовну комутацію сонячних елементів у модулі, потрапляння тіні навіть на один ФЕП буде призводити до різкого зменшення фотоструму не лише цього затіненого елемента, а й до обмеження результуючого струму, що генерується всім ланцюгом послідовно з'єднаних елементів, і електрична потужність панелі суттєво знизиться.

На рис. 9.7 схематично представлено вплив затінення одного з ФЕП на світлову ВАХ всього модуля, що складається з послідовно з'єднаних сонячних елементів.

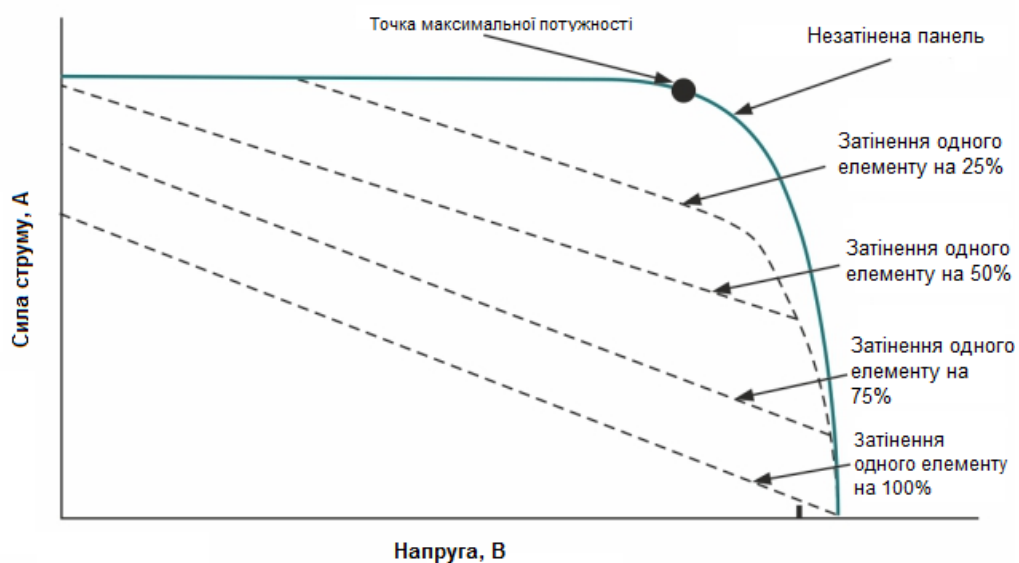


Рисунок 9.7 – Вплив затінення на вольт-амперну характеристику сонячної панелі [46]

Як видно з рис. 9.7, затінення ФЕП суттєво погіршує форму світлової ВАХ панелі від близької до прямокутної без затінення до лінійної при стовідсотковому затіненні навіть одного сонячного елемента. Наслідком цього є зміщення точки максимальної потужності в область менших струмів та напруг і, як результат, максимальна електрична потужність, що генерується панеллю, суттєво зменшується.

Більше того, затінений ФЕП у послідовному ланцюзі має суттєво вищий опір, ніж освітлені, а протікання струму крізь нього супроводжується підвищеним виділенням теплової енергії, внаслідок чого затінений елемент суттєво розігрівається. Поява таких «гарячих плям» (hot spots) – перегрітих сонячних елементів – може призвести до скорочення строку служби панелі і навіть виходу її з ладу.

Зменшити негативний вплив затінення на електричну потужність панелі та запобігти виникненню «гарячих плям» дозволяє застосування *байпас-діодів*, що перенаправляють струм, генерований освітленими елементами, повз затінений ФЕП (рис. 9.8).

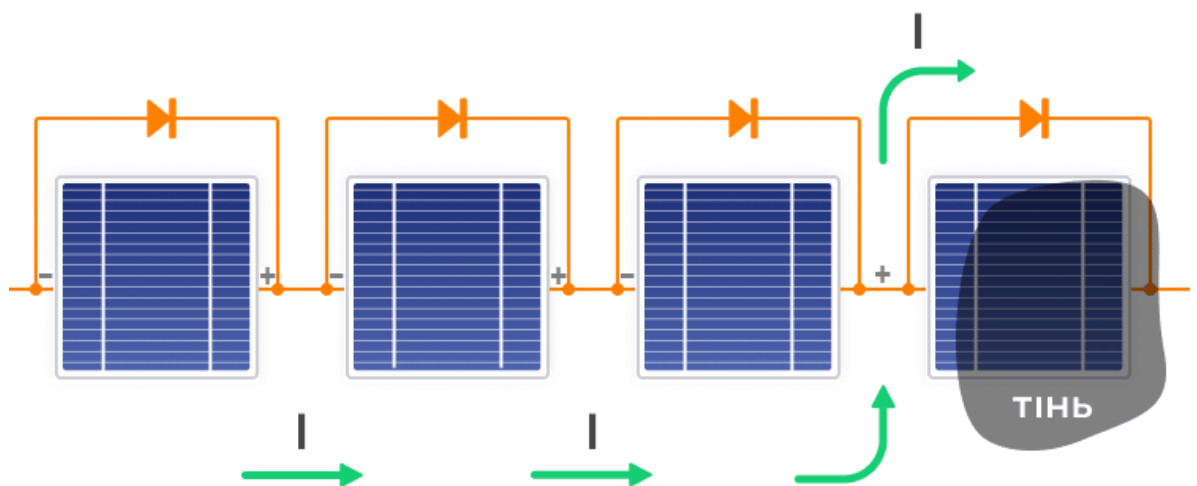
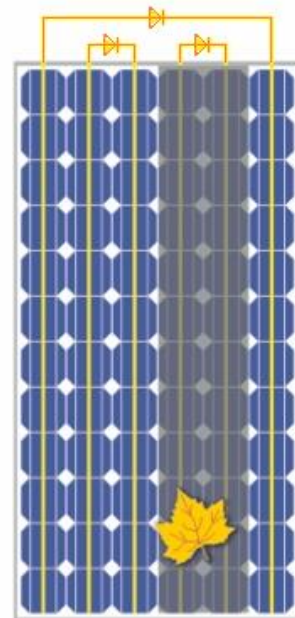


Рисунок 9.8 – Принцип дії системи з байпас-діодами [46]

При освітленні сонячного елемента байпас-діод є підпертим напругою зворотної полярності, що генерує ФЕП, і струм крізь цей діод практично

нульовий. У випадку ж затінення ФЕП діод опиняється у прямому зміщенні завдяки напрузі від сусідніх незатінених елементів, і діод пропускає генерований ними струм повз затінений елемент, уникаючи таким чином блокування.

В переважній більшості сучасних конструкцій сонячних панелей байпас-діоди шунтують не окремі ФЕП, а групу послідовно з'єднаних сонячних елементів і розташовуються в розподільчій коробці (рис. 9.9, а). Як правило, в панелі шунтуються до трьох груп послідовно з'єднаних елементів, що у випадку появи локального затінення забезпечує зменшення генерованої потужності лише на 33% (рис. 9.9, б).



падіння потужності на 33%

а)

б)

Рисунок 9.9 – Розташування байпас-діодів (а) та їх дія у випадку часткового затінення панелі (б) [46]

Ще одним підходом до зменшення впливу затінення є використання модулів, виготовлених за технологією *Half Cell* (рис. 9.10, а). В таких сонячних панелях ФЕП розрізаються навпіл і кількість «половинок» цих елементів, що формують панель, збільшується удвічі.

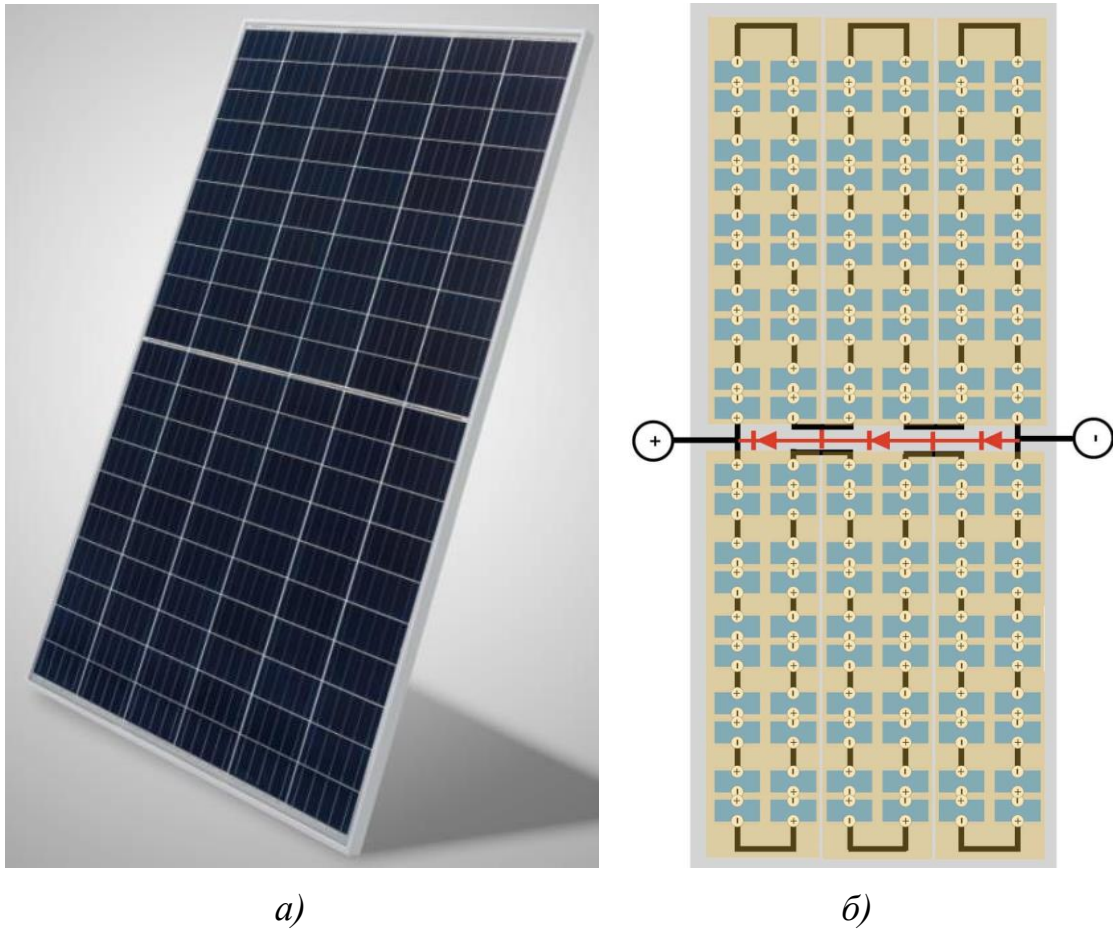


Рисунок 9.10 – Зовнішній вигляд сонячної панелі Half Cell (а) та схема її побудови (б)

В панелі Half Cell стрічки послідовно з'єднаних сонячних елементів розбито на дві групи, що з'єднані між собою паралельно (рис. 9.10, б). Зважаючи на вдвічі меншу площу приймальної поверхні сонячного елемента, кожна група генерує вдвічі менший струм, аніж модуль класичної конструкції. Окрім того, довжина струмопровідних шин, якими ФЕП з'єднуються послідовно в межах кожної групи, також є приблизно вдвічі меншою. Все це в сукупності дозволяє знизити електричні втрати такої панелі, і як наслідок, збільшити потужність на декілька ват у порівнянні з класичним модулем аналогічної площі. Менший струм також знижує ймовірність виникнення перегрівання затінених сонячних елементів, що підвищує надійність сонячної панелі.

Паралельне ж з'єднання двох груп сонячних елементів, реалізоване в панелі Half Cell, дозволяє зменшити вплив затінення на її продуктивність: навіть без наявності байпас-діодів затінення однієї з таких груп не призведе до повного блокування струму панелі, хоча її потужність і зменшиться приблизно на 50%. Втім, додаткове застосування байпас-діодів, показаних на рис. 9.10, б, дозволяє зменшити падіння продуктивності до 8% у випадку виникнення локальних затінь.

### **9.5 Типова технологія виготовлення модулів на основі кристалічних сонячних елементів**

Типова технологія виробництва панелей на основі сонячних елементів з кристалічного кремнію включає в себе наступні технологічні операції:

- пайка фотоелектричних перетворювачів у відповідності до заданої схеми електричної комутації;
- герметизація з'єднаних ФЕП;
- монтаж рами і комутаційної коробки;
- тестування модуля.

Як і будь-яке виробництво, виготовлення сонячних панелей починається з *вхідного контролю та підготовки вихідних матеріалів і комплектуючих*. Окрім власне сонячних елементів для виробництва модулів застосовуються: скло, мідні шини, флюси, захисні і клейові плівки, дроти, контактні роз'єми, комутаційні коробки, байпас-діоди, алюмінієві профілі та інші матеріали.

Відсортовані за параметрами та механічною цілісністю ФЕП надходять на операцію *збирання*. З використанням табберів/стрингерів (рис. 9.11) спочатку відбувається припаювання луджених мідних шин до лицьових або тильних контактів ФЕП, а потім здійснюється послідовне з'єднання елементів в ланцюги (strings) необхідної довжини.

Наступна операція – *з'єднання раніше підготовлених ланцюгів ФЕП в матрицю* (наприклад, розміром 6×10 елементів). Після цього *формується*



«сандвіч», що складається зі скла, попередньо порізаної плівки герметизуючого матеріалу (EVA), власне сонячних елементів, другого шару герметизуючого матеріалу і тильної підкладки модуля (рис. 9.12).

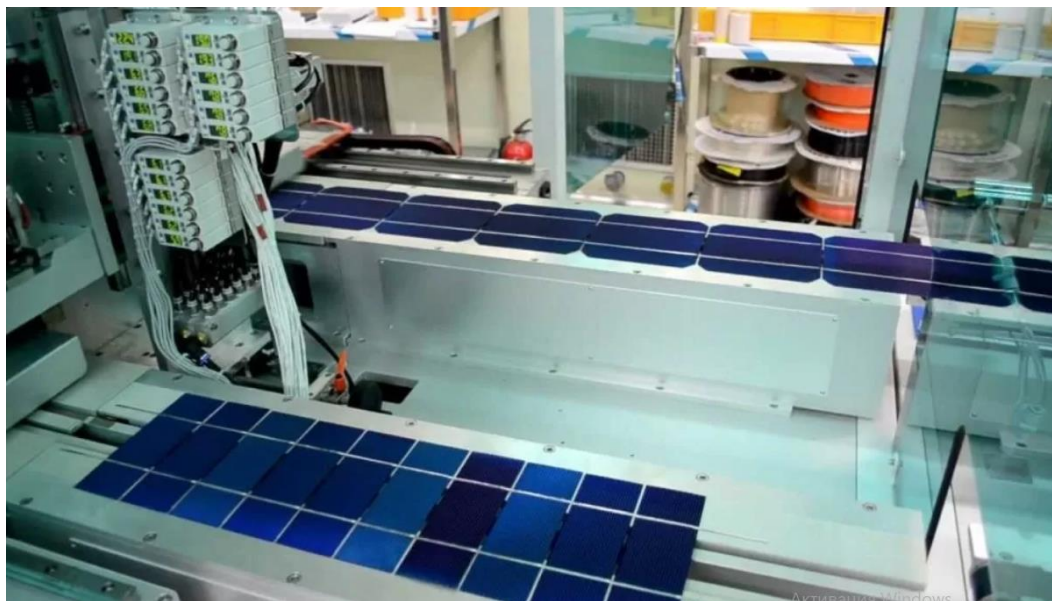


Рисунок 9.11 – Стрингер



Рисунок 9.12 – Установка для формування «сандвіча»

Після тестування отриманого «сандвіча» на відсутність розривів

електричного кола він надходить на *герметизацію* при високій температурі і надлишковому тиску (рис. 9.13). Цю операцію назують *ламінування*, а напівфабрикат, що отримують в результаті – *ламінатом*.



Рисунок 9.13 – Ламінатор сонячних панелей

На завершальному етапі виробництва по периметру сонячного модуля *встановлюється рама* і з боку тильної поверхні *монтується комутаційна коробка*. Ці операції можуть здійснюватися як вручну, так за допомогою спеціальних роботизованих установок (рис. 9.14).



Рисунок 9.14 – Роботизована установка для монтажу комутаційної коробки



Повністю готову сонячну панель тестують з метою *визначення електричних параметрів*. Для тестування можуть використовуватись як компактні тестери (рис. 4.1), так і спеціалізовані приміщення, в яких встановлено надточні імітатори сонячного випромінювання.

Після тестування готові сонячні модулі, які упорядковано за класами продукції, *упаковуються* і надходять на склад.

Сучасна індустрія з виробництва сонячних панелей сфокусована на створені потужних автоматизованих підприємств з річним обсягом випуску готової продукції від десятків до сотень мегават та сертифікацією на відповідність міжнародним стандартам якості. Такі потужні виробництва, зокрема і відомих європейських брендів, зосереджені, головним чином, в країнах Азії.

## **9.6 Питання для самоперевірки**

1. Дайте визначення модуля сонячних елементів.
2. Перелічіть ознаки, за якими здійснюється класифікація фотоелектричних модулів.
3. Наведіть класифікацію модулів сонячних елементів за різними ознаками.
4. Опишіть можливі конструкції фотоелектричних модулів.
5. Вкажіть складові, з яких побудовано сонячні панелі на основі кристалічних кремнієвих ФЕП.
6. Опишіть можливі варіанти електричної комутації ФЕП в сонячній панелі.
7. Наведіть вирази для знаходження струму та напруги панелі, виходячи з параметрів окремих ФЕП та їх комутації.
8. Вкажіть типові значення ефективності сонячних модулів, виготовлених на основі різних напівпровідникових матеріалів.
9. Охарактеризуйте сучасний стан та перспективи ринку сонячних

панелей.

10. Назвіть основні параметри та характеристики, що вказуються в технічному паспорті фотоелектричної панелі.
11. Опишіть, як впливає затінення приймальної поверхні на світлову ВАХ сонячної панелі.
12. Розкрийте фізичну сутність ефекту виникнення «гарячих плям» в модулі сонячних елементів.
13. Назвіть найбільш поширені способи зменшення впливу часткового затінення на продуктивність сонячної панелі.
14. Опишіть принцип дії системи з байпас-діодами.
15. Вкажіть головні особливості фотоелектричної панелі, виготовленої за технологією Half Cell.
16. Назвіть та коротко опишіть основні стадії типової технології виготовлення панелі на основі кристалічних сонячних елементів.
17. Які вихідні матеріали та комплектуючі використовуються у виробництві кристалічних сонячних панелей?

**Рекомендована література [1, 2, 4, 12, 13, 22, 29, 44 – 47]**

## 10 СОНЯЧНІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ

### 10.1 Типи фотоелектричних систем та їх особливості

Під *фотоелектричною системою* або *сонячною фотоелектричною станцією* (ФЕС) в широкому сенсі розуміють установку, що призначена для перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію з метою продажу в загальну електричну мережу або забезпечення власного споживання.

Склад основного обладнання ФЕС суттєво залежить від типу станції у відповідності до класифікації, що здійснюється за низкою ознак, зокрема, за споживачем виробленої енергії, за місцем розташування, спектром сонячного випромінювання та його інтенсивністю, мобільністю, орієнтацією на Сонце, тощо.

Так, *в залежності від споживача виробленої енергії* всі ФЕС можна поділити на:

- мережеві, що генерують електричну енергію в об'єднану енергосистему;
- автономні, призначені для забезпечення електрикою ізольованих від електричних мереж споживачів;
- гібридні, що здатні генерувати електричну енергію як в об'єднану енергосистему, так і працювати в автономному режимі.

*За місцем розташування* ФЕС поділяють на дахові, фасадні та розташовані на ґрунті.

*За спектром перетворюваного сонячного випромінювання* розрізняють наземні та космічні ФЕС.

*За інтенсивністю перетворюваного випромінювання* виділяють ФЕС неконцентрованого та концентрованого випромінювання.

*За мобільністю* всі ФЕС можна поділити на переносні, пересувні та стаціонарні.

*За орієнтацією на положення Сонця* на небосхилі розрізняють ФЕС без

системи стеження, з одновісною та двовісною системами стеження.

Наведений перелік ознак не є вичерпним, існують й інші ознаки, за якими здійснюється класифікація ФЕС, наприклад, за матеріалом сонячної панелі, інтеграцією в конструкції будівель, тощо. Втім найбільш вживаною класифікацією, яку використовують на даний час, є класифікація за споживачем виробленої електричної енергії. Ця класифікація фактично побудована на особливостях споживання енергії, виробленої ФЕС, та взаємодії такої станції із об'єднаною енергосистемою.

Головною особливістю всіх мережевих ФЕС є те, що їх встановлена потужність суттєво менша за пікову потужність об'єднаної енергосистеми, тобто  $P_{ФЕС} \ll P_{C \max}$ . Зважаючи на таке співвідношення потужностей, мережева ФЕС в масштабах енергосистеми може розглядатися як дубльоване джерело з нульовою гарантованою потужністю, головне призначення якого – це максимальна економія викопного палива на традиційних теплових електростанціях, і як наслідок, зменшення викидів в атмосферу.

На відміну від мережевих ФЕС, автономні станції не взаємодіють з об'єднаною енергосистемою. Їх головне призначення – забезпечити електричною енергією споживачів, що не підключені до електромереж. Особливістю автономних ФЕС є порівняне значення їх встановленої потужності з піковою споживаною потужністю всієї локальної енергосистеми, тобто, має виконуватись співвідношення  $P_{ФЕС} \approx P_{C \max}$ . Оскільки ФЕС мають нульову гарантовану потужність, то для безперебійного електрозабезпечення споживачів вони обов'язково повинні поєднуватися з системами акумуляування енергії та/або традиційними резервними енергоустановками, наприклад, електричними генераторами на рідкому паливі. Потужність резервного джерела живлення також має бути порівняною з піковою споживаною потужністю всієї системи або, принаймні, з піковою потужністю першочергових споживачів. В цьому випадку автономні ФЕС здатні забезпечити як надійну роботу всієї локальної енергосистеми, так і економію викопного палива.

Щодо гібридних ФЕС, то в залежності від режиму – робота з мережею

чи автономно – їм будуть притаманні особливості або мережевих, або автономних станцій. Втім, незалежно від режиму роботи гібридні ФЕС забезпечуватимуть економію викопного палива та зменшуватимуть шкідливі викиди у атмосферу.

## 10.2 Мережеві фотоелектричні станції

Мережеві сонячні електростанції підключаються до загальної електромережі і призначені для заміщення мережевої енергії, що споживається об'єктом, електроенергією, яка генерується внаслідок перетворення сонячного випромінювання, а також для продажу надлишку виробленої електроенергії в мережу за «зеленим» тарифом. Структура типової мережевої ФЕС представлена на рис. 10.1.

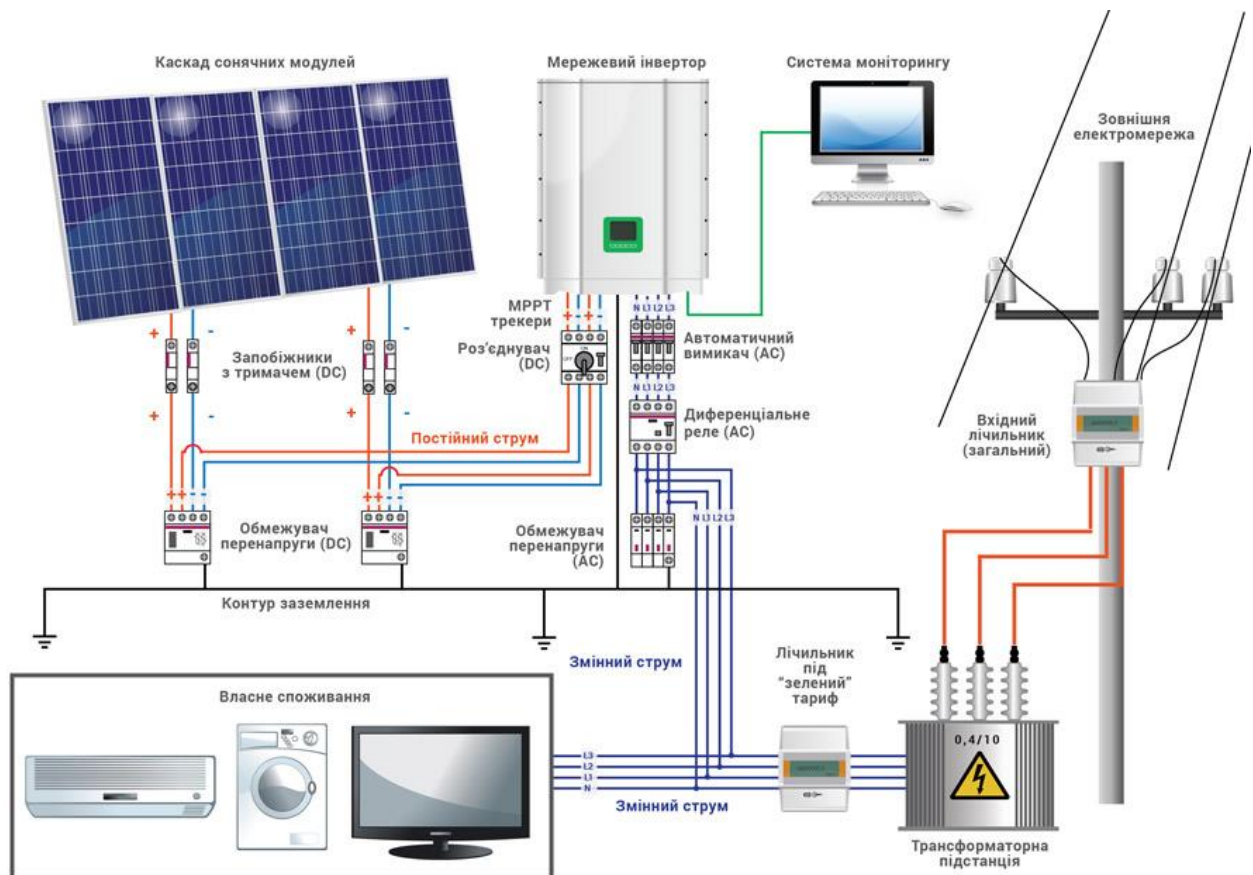


Рисунок 10.1 – Структура мережевої фотоелектричної станції [48]

До складу мережевої ФЕС входять: масив сонячних панелей, мережевий інвертор, система моніторингу стану обладнання та вироблення енергії, пристрої захисту. Станція підключається до загальної електромережі через двонаправлений лічильник та трансформаторну підстанцію, що забезпечує зв'язок із зовнішньою лінією електропередач певної напруги, найчастіше, 10 кВ.

Генерована електроенергія постійного струму від масиву сонячних панелей, що зазвичай розташовуються на даху будівлі або наземних конструкціях, надходить до мережевого інвертора, де відбувається перетворення постійного струму у змінний з напругою 220/380 В та частотою 50 Гц. Інвертор є синхронізованим з мережею, в результаті чого параметри змінної напруги, що генерується ФЕС, відповідають тим, що задаються мережею. Отже, змінна напруга на виході мережевого інвертора в будь-який момент часу співпадає за частотою і фазою з параметрами мережі.

Після інвертора генерована електрична енергія в першу чергу витрачається на живлення наявних на об'єкті електроприладів, тобто, забезпечується власне енергоспоживання об'єкту. Коли ж енергії, отриманої від сонячного випромінювання, є недостатньо, то ця нестача покривається за рахунок надходження мережевої електрики. Якщо не брати до уваги нічний час, то такий брак виробленої електрики може мати місце внаслідок понаднормового збільшення власного споживання, нестачі сонячної інсоляції при значній хмарності, тощо. У випадку ж, коли власне споживання об'єкту точно дорівнює виробленій енергії від ФЕС, надходження електрики з мережі не відбувається, і споживання мережевої енергії стає нульовим. В той же час, коли вироблення енергії починає перевищувати власне споживання об'єкту, напруга на виході інвертора стає вищою на декілька вольт за напругу зовнішньої мережі, і завдяки цій різниці потенціалів відбувається перетік струму з віддачею надлишку виробленої енергії до мережі. Саме цей надлишок виробленої енергії може бути реалізованим за «зеленим» тарифом.

Більшість мережевих ФЕС будуються на даний час з підключенням за «зеленим» тарифом, який дозволяє отримувати дохід від продажу надлишку

виробленої енергії до загальної мережі й окупити будівництво станції протягом 4 – 6 років. В Україні «зелений» тариф діє з 2009 року як для юридичних, так і для фізичних осіб. Він встановлюється та вводиться в дію постановами Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) [49]. Так, наприклад, з 1 жовтня 2023 року Постановою НКРЕКП № 1767 встановлено наступні тарифи на електроенергію, вироблену з енергії сонячного випромінювання генеруючими установками приватних домогосподарств, встановлена потужність яких не перевищує 30 кВт та які введені в експлуатацію в такі періоди:

- з 01 квітня 2013 року по 31 грудня 2014 року – 1406,11 коп/кВт·год (без ПДВ);
- з 01 січня 2015 року по 30 червня 2015 року – 1264,65 коп/кВт·год (без ПДВ);
- з 01 липня 2015 року по 31 грудня 2015 року – 785,39 коп/кВт·год (без ПДВ);
- з 01 січня 2016 року по 31 грудня 2016 року – 745,28 коп/кВт·год (без ПДВ);
- з 01 січня 2017 року по 31 грудня 2019 року – 709,39 коп/кВт·год (без ПДВ);
- з 01 січня 2020 року по 31 грудня 2023 року – 637,60 коп/кВт·год (без ПДВ).

Для обліку електроенергії, що продається в мережу за «зеленим» тарифом, ФЕС має бути укомплектована двонаправленим лічильником, який фіксує обсяг спожитої та відданої в мережу електроенергії, а також передає ці дані по GSM-каналі на сервер енергокомпанії, де й проводиться розрахунок різниці і у випадку позитивного енергетичного балансу об'єкту станом на кінець місяця відбувається нарахування коштів за продану в мережу енергію.

Як і будь-яка інша електроустановка, мережева ФЕС комплектується захисною автоматикою, куди входять роз'єднувачі, запобіжники і обмежувачі перенапруги, що монтуються в розподільчому щиті.

При проектуванні мережевої ФЕС для приватного будинку (рис. 10.2) враховуються такі чинники як власне споживання об'єкту, площа даху або фасаду, де можуть бути встановлені сонячні панелі, потужності підведеної до об'єкту лінії електромережі, договірна потужність об'єкту. Важливо, що для приватних осіб потужність мережевих станцій обмежена і складає максимум 30 кВт. Станції більшої потужності відносять до промислових і їх будівництво оформлюється юридичними особами.



Рисунок 10.2 – Приклад реалізації мережевої ФЕС для приватного будинку [48]

Важливим моментом, на який також потрібно звертати увагу при проектуванні ФЕС, є врахування умов сонячної інсоляції масиву панелей. Якщо має місце часткове затінення певних груп панелей і уникнути цього не є можливим, то варто обирати моделі інверторів з декількома входами по стороні постійного струму з окремими контролерами точки максимальної потужності на кожному з них, і підключати групи затінених та незатінених панелей до окремих входів інвертора. Це дозволить здійснювати незалежний та коректний пошук точки максимальної потужності для кожної групи і досягти таким чином



максимальної генерації електричної енергії.

Головними перевагами мережевих ФЕС є швидка їх окупність за умов підключення за «зеленим» тарифом, значний термін служби, що становить 20-25 років і лімітується лише надійністю електронного обладнання, не вимагають складного обслуговування, мають суттєво меншу вартість у порівнянні з автономними або гібридними ФЕС аналогічної встановленої потужності.

Втім мережеві ФЕС мають один суттєвий недолік – вони не здатні працювати під час відсутності напруги в мережі, оскільки інвертори цих станцій сконструйовані таким чином, що їх транзисторні або тиристорні електронні ключі, що власне і перетворюють постійну напругу панелей на змінну, керуються саме напругою мережі. Це зроблено навмисно, щоб запобігти виникненню, так званої, острівної генерації при втраті фізичного зв'язку з об'єднаною енергосистемою внаслідок аварій на лініях електропостачання, а також убезпечити персонал ремонтних бригад від враження електричним струмом під час ліквідації цих аварій.

### **10.3 Автономні фотоелектричні станції**

На відміну від мережевих ФЕС, автономні станції не взаємодіють з об'єднаною енергосистемою, а отже, не потребують керування з боку мережі і можуть застосовуватись для енергозабезпечення об'єктів, віддалених від електричних мереж, або у якості резервного джерела живлення на випадок аварій в централізованій системі.

В сегменті автономних ФЕС можна виділити два види станцій – це достатньо потужні (від 1 кВт і вище) стаціонарні системи, що зазвичай використовуються для забезпечення електропостачання віддалених від електромереж об'єктів (рис. 10.3), та менш потужні (від десятків до сотень ват) пересувні або переносні станції, які застосовують для живлення окремих малопотужних споживачів, наприклад, для організації освітлення та зарядки електронних мобільних пристроїв у польових умовах (рис. 10.4).

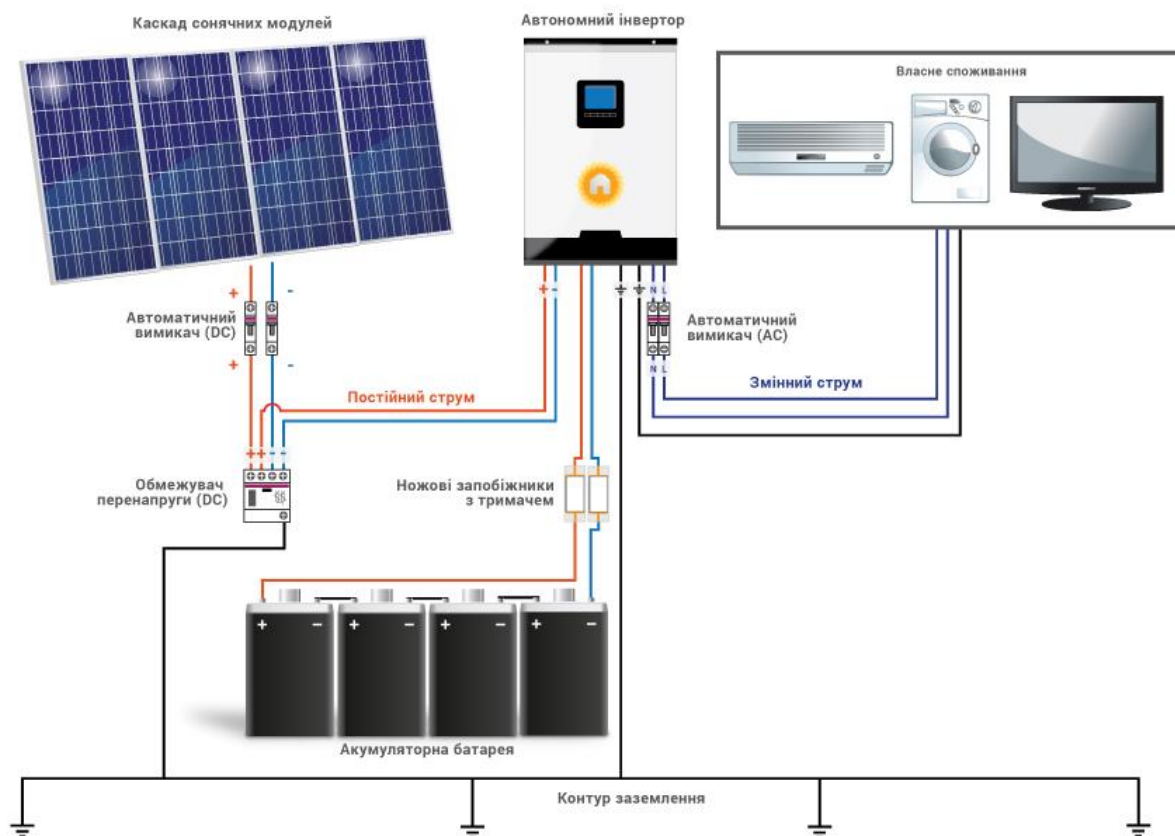


Рисунок 10.3 – Структура стаціонарної автономної фотоелектричної станції [48]

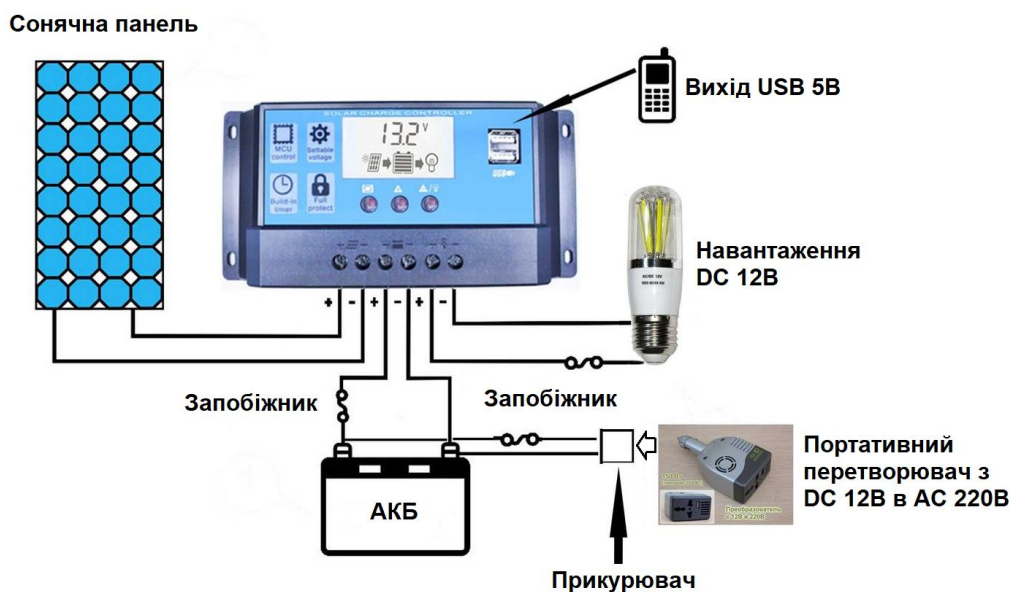


Рисунок 10.4 – Структура переносної автономної фотоелектричної станції [50]

*Стационарні автономні ФЕС* (рис. 10.3) складаються з масиву сонячних панелей, потужного сонячного автономного інвертора з вбудованим контролером точки максимальної потужності та контролером заряду акумуляторних батарей (АКБ), блоку АКБ, що забезпечує живлення об'єкту в періоди недостатньої сонячної інсоляції або її відсутності, та пристроїв захисту. На виході такої ФЕС, як правило, маємо змінну напругу промислової частоти для живлення побутових приладів. Деякі системи передбачають автоматичне введення резерву від стороннього джерела, наприклад, генератора на рідкому паливі, що підключається у випадку вичерпання запасу енергії, накопиченого в АКБ.

В стаціонарних автономних ФЕС, як і в мережевих, масив фотоелектричних модулів розташовують, як правило, на даху будівлі або на наземних опорних конструкціях. Генерована масивом панелей електрична енергія надходить до контролера заряду АКБ, головна функція якого полягає в управлінні режимами заряджання/розряджання акумуляторів, зокрема, в запобіганні їх надмірного заряджання та розряджання нижче допустимого рівня. Режими роботи контролера заряду налаштовуються вручну або встановлюються автоматично і залежать від типу АКБ, що використовується в системі.

Для перетворення постійного струму, що надходить від сонячних панелей і запасастся в АКБ, у змінний стандартної напруги та частоти, який є необхідним для живлення більшості сучасних побутових приладів, застосовується інвертор. На відміну від мережевого інвертора, що керується зовнішньою мережею, автономний інвертор має вбудовану схему управління ключами, а також фільтри, які забезпечують на виході сигнал близький до синусоїдального. Варто зазначити, що більшість сучасних електронних приладів є не надто вибагливими до форми напруги живлення, втім, якщо мова йде про обладнання, яке використовує електродвигуни, потрібно обирати автономний інвертор, що забезпечує чисту синусоїду.

Переважає більшість автономних сонячних інверторів потужністю

понад 1 кВт виконані у вигляді єдиного блоку, що містить окрім власне інвертора вбудований контролер заряду АКБ. Окрім того, деякі моделі інверторів мають і контролери точки максимальної потужності сонячних панелей, аналогічні до тих, що застосовуються в мережевих інверторах. Це сприяє збільшенню генерації електричної енергії автономною ФЕС та скороченню середньої тривалості циклу заряджання АКБ.

При виборі номінальної потужності автономного інвертора потрібно орієнтуватись на пікову споживану потужність об'єкту, і обирати інвертор із певним запасом за потужністю, щоб запобігти спрацюванню системи захисту. Враховуючи високі значення пускових струмів, характерних для деяких типів побутового обладнання, наприклад, холодильників, варто приймати значення коефіцієнту запасу в діапазоні 1,2 – 1,3 від пікової споживаної потужності об'єкту.

Враховуючи періодичність надходження та випадковий характер сонячної інсоляції, АКБ стає невід'ємною складовою будь-якої автономної ФЕС, забезпечуючи безперервність електропостачання об'єкту. Для застосування в сонячних системах рекомендуються декілька типів АКБ, а саме: *літій-іонні (Li-ion)*, *свинцево-кислотні AGM* та *гелеві (Gel)* акумулятори. Можуть також застосовуватись *заливні тягові акумулятори (OPzS)*, що відрізняються високою безпекою щодо вибуху у випадку перезаряду та великою кількістю циклів заряд-розряд.

Не варто застосовувати в сонячних системах неспеціалізовані акумулятори, наприклад, стартерні АКБ, оскільки вони є нестійкими щодо глибокого розряду і у зв'язку з цим швидко втрачають свої початкові характеристики.

*Літій-іонні АКБ* (рис. 10.5) мають суттєві переваги щодо їх використання в автономних ФЕС. Вони перевершують акумулятори свинцево-кислотної системи практично за всіма параметрами і відрізняються значною питомою ємністю, тривалим терміном служби, високою ефективністю циклу заряд-розряд. Найбільш поширеними електрохімічними системами, що

застосовуються в акумуляторах цього типу, є літій-залізо-фосфатні, кобальт-літійові, літій-марганцеві системи.



Рисунок 10.5 – Літій-залізо-фосфатна акумуляторна батарея ємністю 100 А·год та номінальною напругою 48 В [48]

Головними перевагами літій-іонних АКБ, що обумовлюють їх використання в автономних ФЕС, є низькі темпи саморозряду (порядку 20% на рік); відсутність ефекту пам'яті, що допускає неповне заряджання такої батареї у випадку припинення сонячної інсоляції; широкий температурний діапазон експлуатації від  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ , що дозволяє їх встановлення в неопалювальних приміщеннях будівлі; не потребують обслуговування; велика кількість циклів заряд-розряд, що забезпечує довготривалу експлуатацію батареї в середньому від 10 до 20 років без необхідності заміни.

До недоліків літій-іонних батарей слід віднести їх високу вартість, вибухову небезпеку у разі механічних ушкоджень, а також деградацію характеристик при тривалому зберіганні у стані глибокого розряду нижче 20% від повної ємності.

*Акумулятори AGM* (рис. 10.6) – це ще один тип АКБ, що рекомендуються до застосування в автономних ФЕС. На відміну від класичних свинцево-кислотних батарей в акумуляторах AGM (Absorbent Glass Matt) замість рідкого застосовують абсорбований електроліт, яким просочений скловолокнистий пористий матеріал, що заповнює простір між пластинами.



Рисунок 10.6 – Акумуляторна батарея AGM ємністю 100 А·год та номінальною напругою 12 В [48]

До переваг акумуляторів AGM слід віднести можливість їх встановлення практично в будь-якому положенні, окрім перевернутого (щоб запобігти перекриттю газовипускних клапанів); відсутність необхідності обслуговування; герметичність конструкції, що унеможливорює витікання електроліту; не виділяє під час експлуатації шкідливих речовин, а отже, може встановлюватись у приміщеннях; менший саморозряд, аніж у класичних свинцево-кислотних АКБ; стійкість до глибокого розряду, що допускає використання акумулятора у циклічному режимі (понад 1000 циклів при глибині розряду 30%).

Головними недоліками акумуляторів AGM є недопустимість їх зберігання у розрядженому стані, чутливість до перепадів напруги під час заряджання, більш висока ціна у порівнянні з класичними свинцево-кислотними АКБ.

*Гелеві АКБ* (рис. 10.7) також відносяться до свинцево-кислотних акумуляторів. Втім, в них використовується желеподібний кислотний електроліт, загущений силікагелем.



Рисунок 10.7 – Гелева акумуляторна батарея ємністю 100 А·год та номінальною напругою 12 В [48]

Головними перевагами гелевих АКБ є широкий температурний діапазон їх використання (від  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ ); вища, аніж у AGM, стійкість до глибокого розряду, що дозволяє їх роботу у циклічному режимі (понад 1000 циклів при глибині розряду 50%); не потребують обслуговування; герметичність конструкції; більш тривалий в порівнянні з акумуляторами AGM термін служби при роботі у циклічному режимі.

Втім, гелеві акумулятори дещо дорожчі за свої AGM-аналоги.

АКБ стаціонарних автономних ФЕС мають встановлюватись в окремих нежитлових вентильованих приміщеннях на стелажах.

*Переносні автономні ФЕС* (рис. 10.4) за своєю структурою є подібними до стаціонарних. Однак, мають місце і певні відмінності в комплектації переносних систем, зважаючи на їх призначення. Так, в таких ФЕС часто використовують гнучкі сонячні панелі або такі, що складаються (рис. 10.8). Більш того, зважаючи на можливість під'єднання більшості сучасних мобільних пристроїв до порту USB для їх заряджання, а також організацію системи освітлення з живленням від мережі постійного струму напругою 12 В, відсутня нагальна потреба оснащення переносних станцій інвертором, який може бути включений до комплектації ФЕС у вигляді опції.

Контролери переносних ФЕС є більш простими за своїм функціоналом в

порівнянні зі стаціонарними автономними станціями. В переважній більшості випадків переносні станції не відстежують точку максимальної потужності сонячної панелі, а головні функції контролера зводяться до регулювання широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) струму заряду в залежності від поточної напруги на АКБ, переведення модуля сонячних елементів в режим холостого ходу при повній зарядці батареї, відключенні навантаження від АКБ при досягненні кінцевої розрядної напруги, захисту від короткого замикання, тощо. Для забезпечення ефективного заряджання АКБ вхідна напруга на такому контролері з боку сонячної панелі має бути мінімум на 20% більшою за номінальну напругу акумулятора. Найчастіше в переносних системах застосовуються свинцево-кислотні АКБ з номінальною напругою 12 В, втім можуть використовуватись і літій-іонні батареї.



Рисунок 10.8 – Портативні сонячні панелі, що складаються [51]

У випадку необхідності забезпечення живлення пристроїв змінним струмом з номінальною напругою 220 В та частотою 50 Гц переносна станція може бути укомплектована портативним інвертором, що під'єднується або безпосередньо до клем АКБ (рис. 10.9, а), або ж через стандартний роз'єм, наприклад, через гніздо автомобільного прикурювача (рис. 10.9, б).

Останнім часом на ринку з'явилися і спеціалізовані переносні ФЕС для потреб туризму, які випускаються у вигляді компактного моноблоку, всередині якого змонтовано сонячний ШІМ-контролер, акумуляторну батарею, інвертор, а також панель з різними типами роз'ємів для під'єднання споживачів



постійного та змінного струму (рис. 10.10). Для підключення сонячного модуля в такому моноблоці передбачено вхідний роз'єм. В деяких варіантах переносних ФЕС є можливість заряджання АКБ і від зовнішньої електричної мережі через адаптер.



*a)*

*б)*

Рисунок 10.9 – Портативні інвертори номінальною вихідною потужністю 500 Вт з безпосереднім під'єднанням до клем акумуляторної батареї (а) та через гніздо автомобільного прикурювача (б)



Рисунок 10.10 – Переносна ФЕС для потреб туризму

Отже, основними сферами використання автономних ФЕС є електрозабезпечення віддалених від мереж стаціонарних об'єктів, а також живлення пристроїв у польових умовах. Крім того, автономні фотоелектричні системи можуть бути застосовані при організації вуличного освітлення, підсвічування вказівників та рекламних конструкцій вздовж автобанів, тощо.

#### **10.4 Гібридні фотоелектричні станції**

Гібридні ФЕС поєднують в собі переваги як мережевих, так і автономних систем. Маючи підключення до зовнішньої електричної мережі, така станція надає можливість продажу надлишку виробленої енергії за «зеленим» тарифом, а також здатна працювати в автономному режимі у випадку зникнення напруги в мережі, використовуючи енергію, накопичену в АКБ. До складу такої станції входить масив сонячних панелей, гібридний сонячний інвертор, АКБ та пристрої захисту (рис. 10.11).

Ключовим компонентом гібридної ФЕС є сонячний інвертор. Сучасні моделі гібридних інверторів можуть працювати у різних режимах: виконувати функції як мережевого, так і автономного інвертора, передаючи надлишки генерованої енергії до зовнішньої мережі, або живлячи електричні прилади від АКБ; заряджати АКБ від зовнішньої електричної мережі, виконуючи функції класичного джерела безперебійного живлення; блокувати передачу генерованої панелями електричної енергії до зовнішньої мережі, забезпечуючи лише компенсацію власних потреб об'єкту, тощо. Налаштування гібридного інвертора дозволяють змінювати пріоритети у його роботі, наприклад, здійснювати заряджання АКБ як від сонячних панелей, так і від мережі.

Класичний режим роботи гібридного сонячного інвертора забезпечує в першу чергу витрату генерованої панелями енергії на власні потреби об'єкту та заряджання АКБ. Надлишок генерованої енергії, що залишається після цього, передається до зовнішньої мережі через двонаправлений лічильник аналогічно тому, як це відбувається у мережевій ФЕС. Якщо станцію не підключено до

«зеленого» тарифу, то перетік енергії до мережі блокується в налаштуваннях інвертора, і ФЕС працює лише на забезпечення власних потреб об'єкту.

При недостатній сонячній інсоляції нестача енергії для забезпечення власних потреб об'єкту в залежності від встановлених пріоритетів може покриватися за рахунок АКБ, зовнішньої електромережі або резервного джерела живлення (для моделей інвертора, де його підключення передбачено). Якщо пріоритет встановлено на першочергове живлення від АКБ, а резервного джерела не передбачено, то у разі розряду акумуляторів інвертор автоматично переключить споживачів на живлення від зовнішньої електромережі.

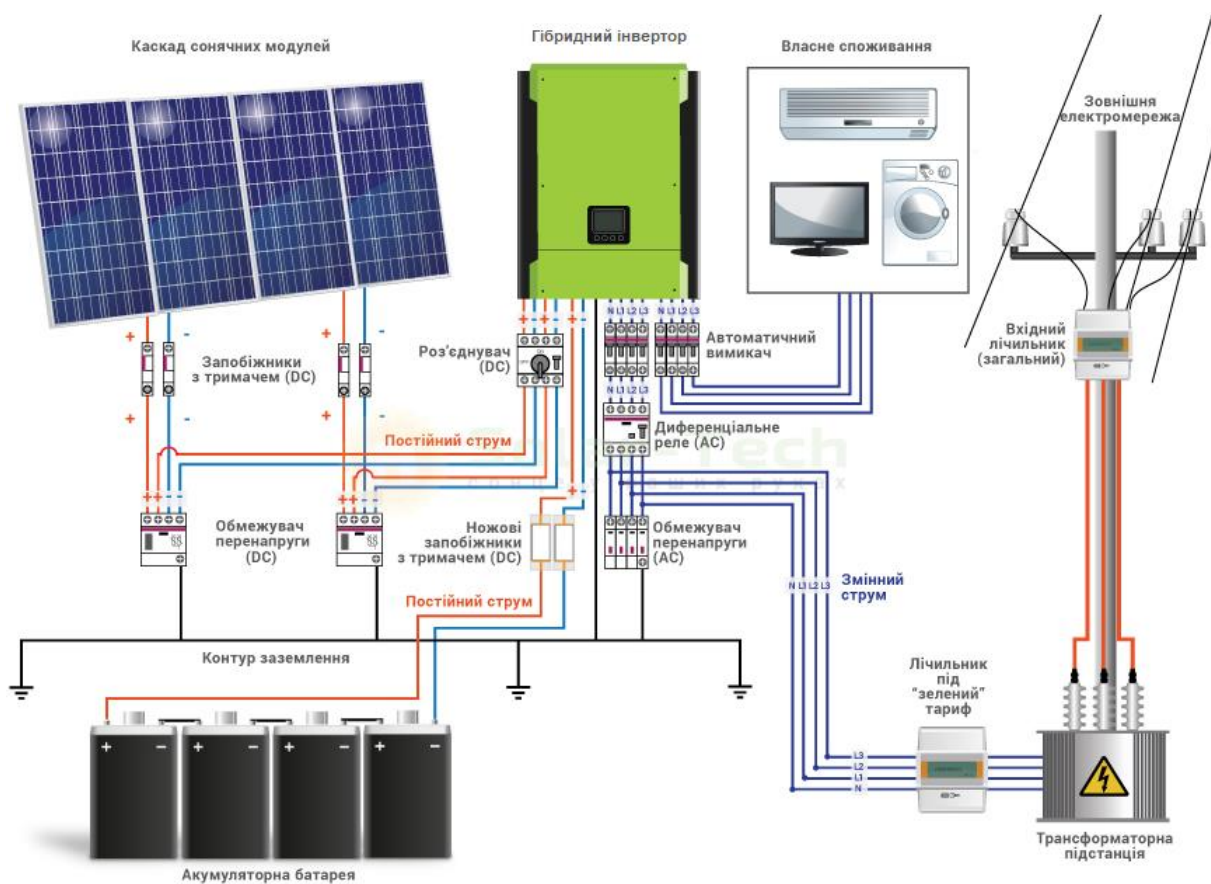


Рисунок 10.11 – Структура гібридної фотоелектричної станції [48]

Більшість сучасних гібридних інверторів можуть працювати як зі свинцево-кислотними, так і з літій-іонними АКБ. Параметри заряду батареї можуть визначатися автоматично або встановлюватись вручну. Передбачається можливість вибору пріоритетного джерела для заряджання АКБ, встановлення

добового режиму заряджання.

Деякі моделі гібридних сонячних інверторів мають додатковий силовий порт для під'єднання резервного джерела живлення, наприклад, генератора, що працює на рідкому паливі. У налаштуваннях інвертора встановлюється потужність генератора, яку можна від нього спожити, а також максимальний час безперервної роботи генератора та час перерв.

Переважає більшість моделей гібридних інверторів, представлених на українському ринку, мають два входи для підключення двох груп сонячних панелей з окремими контролерами точки максимальної потужності на кожному з них. Це забезпечує можливість досягнення ефективної генерації енергії всім масивом сонячних панелей у випадку наявності суттєво різних умов інсоляції для цих двох груп (різний кут нахилу панелей, різна їх азимутальна орієнтація, часткове затінення групи панелей, тощо).

Як і мережеві сонячні інвертори, сучасні моделі гібридних інверторів оснащуються WiFi модулем для підключення до хмарного сервісу моніторингу роботи системи з можливістю переглядати статистику генерації, споживання, продажу енергії за весь час експлуатації гібридної ФЕС та контролювати всі електричні параметри інвертора.

Приклад реалізації гібридної ФЕС на об'єкті, що являє собою приватний будинок, наведено на рис. 10.12. На відміну від мережевої ФЕС гібридна станція потребує облаштування окремого провітрюваного приміщення для розташування АКБ. Ця особливість є спільною зі стаціонарними автономними станціями.

Отже, до основних переваг гібридних ФЕС в порівнянні зі станціями інших типів можна віднести: можливість автономного електрозабезпечення при відсутності енергії в мережі, можливість живлення електричного навантаження від централізованої мережі у випадку недостатньої сонячної інсоляції, гнучкість налаштування пріоритетних джерел живлення.

Головними недоліками гібридних ФЕС у порівнянні з мережевими є: висока вартість з причини наявності АКБ і, як наслідок, значний термін

окупності; наявність у складі гібридної станції акумуляторів призводить до необхідності періодичного їх огляду та заміни, що збільшує експлуатаційні витрати.

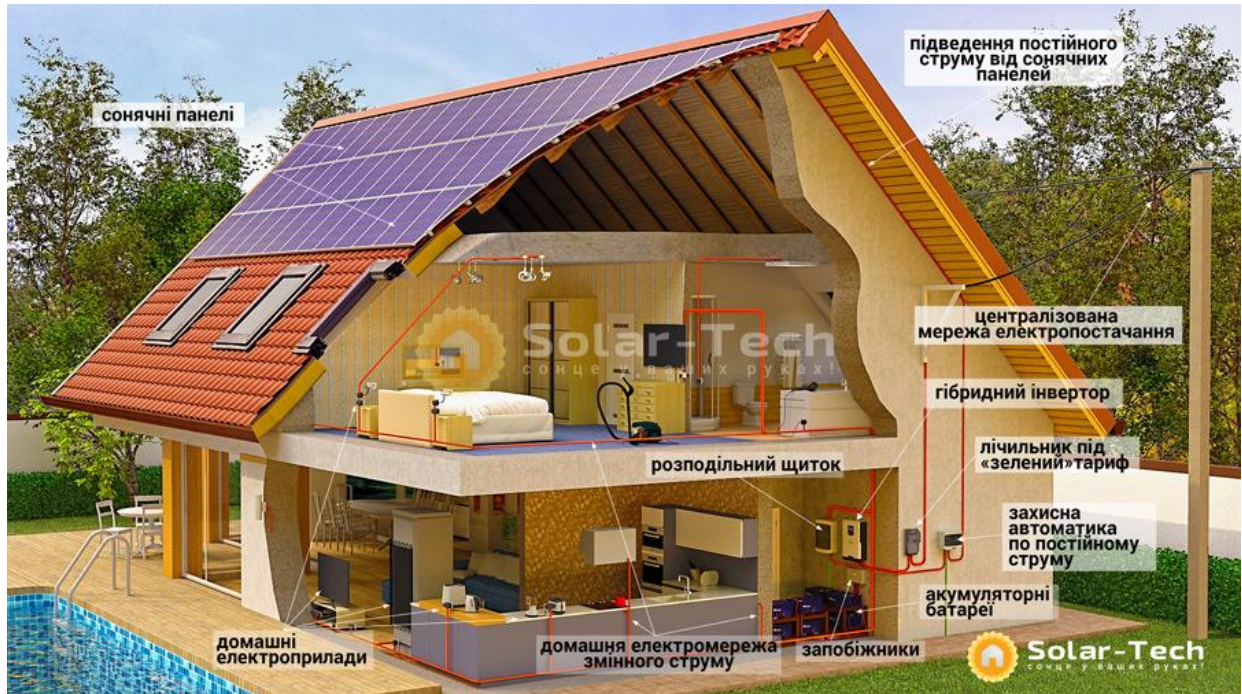


Рисунок 10.12 – Приклад реалізації гібридної ФЕС для приватного будинку [48]

### 10.5 Питання для самоперевірки

1. Що розуміють під терміном «фотоелектрична система»?
2. Наведіть класифікацію фотоелектричних систем за різними ознаками.
3. Вкажіть головні особливості мережевих, автономних та гібридних ФЕС щодо їх місця в загальній енергосистемі.
4. Вкажіть призначення мережевих, автономних та гібридних ФЕС.
5. Опишіть типову структуру, розподіл генерованої енергії в мережевій ФЕС, а також взаємодію цих станцій з централізованою мережею.
6. Що таке «зелений» тариф? Яка державна структура його



встановлює?

7. З'ясуйте, які ставки «зеленого» тарифу діють на поточний момент.
8. Опишіть механізм обліку електроенергії, проданої в мережу за «зеленим» тарифом.
9. Вкажіть основні моменти, на які потрібно звертати увагу при проектуванні мережевих ФЕС.
10. Назвіть головні переваги та недоліки мережевих ФЕС.
11. Які види автономних ФЕС вам відомі?
12. Опишіть типову структуру стаціонарної та переносної автономної ФЕС. В чому полягає відмінність між ними?
13. Охарактеризуйте розподіл енергетичних потоків в автономних ФЕС.
14. Які чинники потрібно враховувати під час вибору інвертора для автономної ФЕС?
15. Назвіть типи акумуляторів, що рекомендуються до використання в автономних ФЕС.
16. Вкажіть основні властивості та особливості застосування літій-іонних акумуляторних батарей в автономних ФЕС.
17. Назвіть переваги та недоліки акумуляторів AGM щодо їх використання в фотоелектричних системах.
18. В чому полягають переваги використання гелевих акумуляторів в автономних ФЕС?
19. Вкажіть особливості обладнання, що застосовується в переносних автономних ФЕС.
20. В чому полягає специфіка функціоналу контролерів заряду переносних автономних ФЕС?
21. Вкажіть переваги та недоліки автономних ФЕС.
22. Які ФЕС називають гібридними?
23. Назвіть основне обладнання, що входить до складу гібридної ФЕС.
24. Опишіть розподіл енергетичних потоків в гібридних ФЕС.

25. Наведіть перелік основного функціоналу, що здатен забезпечити гібридний інвертор.
26. Акумулятори якого типу можуть бути застосовані для комплектації гібридних ФЕС?
27. Вкажіть переваги та недоліки гібридних ФЕС в порівнянні зі станціями інших типів.

**Рекомендована література [1, 2, 4, 5, 48 – 51]**

## 11 ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ

### 11.1 Методика проведення практичних занять

Під час вивчення дисципліни «Основи сонячної електроенергетики» у вищому технічному навчальному закладі велике значення має розвиток умінь та навичок із застосування студентами вивченого матеріалу на практиці, зокрема, вміння самостійно розв'язувати задачі, які потребують розрахунків із застосуванням відповідних фізичних законів, а також формулювання висновків на основі аналізу отриманих результатів.

Практичне заняття – форма навчального заняття, при якому викладач організує детальний розгляд студентами окремих теоретичних положень навчальної дисципліни та формує вміння і навички їх практичного застосування шляхом індивідуального виконання студентом відповідно сформульованих завдань.

Кожне практичне заняття з дисципліни «Основи сонячної електроенергетики» включає наступні етапи:

- проведення попереднього контролю знань, умінь і навичок студентів;
- постановку загальної проблеми викладачем та її обговорення за участю студентів;
- детальний аналіз методики виконання завдання;
- демонстрацію викладачем прикладу розв'язання завдання з обговоренням отриманих результатів;
- самостійне розв'язання студентами індивідуального завдання у відповідності з номером варіанту, перевірку та оцінювання виконаного завдання.

Бали, отримані за виконання практичних завдань, враховуються у загальній кількості балів з поточного контролю досягнень студентів.



## 11.2 Завдання №1. Розрахунок коефіцієнтів поглинання сонячного випромінювання в атмосфері

Сучасні тенденції в світовій енергетиці стимулюють істотне зростання інтересу до альтернативних джерел енергії. Фотоелектричні перетворювачі (ФЕП) або сонячні елементи є найбільш перспективними, екологічно чистими кандидатами на зменшення нафтової залежності світу і, на відміну від органічних і неорганічних джерел енергії, перетворюють сонячне випромінювання безпосередньо в електроенергію.

На  $1 \text{ м}^2$  поверхні Землі, розташованої перпендикулярно сонячним променям, припадає до 1,4 кВт сонячного випромінювання. Однак, щільність потоку і спектр сонячного випромінювання на поверхні Землі залежать від висоти Сонця над обрієм, від висоти місцевості над рівнем моря, від стану атмосфери й оптичних властивостей підстилаючої поверхні.

Висота Сонця над обрієм визначає довжину шляху променів в атмосфері, для визначення якого введена спеціальна величина, що називається оптичною масою атмосфери  $m$ . Одиничній атмосферній масі відповідає шлях, пройдений сонячними променями при вертикальному падінні до рівня моря. Для плоскопаралельної моделі атмосфери оптична маса на рівні моря практично дорівнює косекансу висоти Сонця. Для реальної атмосфери це співвідношення добре виконується, починаючи від кута  $10^\circ$ .

Атмосферним масам (на рівні моря) 1; 1,5; 2; 3; 5 відповідають наступні значення висоти Сонця:  $90^\circ$ ,  $41^\circ 49'$ ,  $30^\circ$ ,  $19^\circ 27'$  і  $11^\circ 32'$ . Атмосферна, або повітряна маса залежить також від висоти місцевості над рівнем моря: зі збільшенням висоти значення атмосферної маси знижується пропорційно тискові повітря. На верхній границі атмосфери маса дорівнює нулю, що зазвичай позначається як умови AM0, у той час як наземним вимірам відповідають умови AM1, AM1,5 і т.д.

Повітряна маса приймається рівній одиниці на Землі на рівні моря при ясному безхмарному небі, коли Сонце знаходиться в зеніті, і його промені

падають перпендикулярно на поверхню вимірюваних елементів (атмосферний тиск у цьому випадку  $p_0=1,013 \cdot 10^5$  Па).

Повітряна маса в будь-якій точці земної поверхні може бути визначена за рівнянням:

$$m = p / (p_0 \sin \theta) = p \cos \theta / p_0, \quad (11.1.1)$$

де  $p$  – тиск повітря в даній точці поверхні Землі;  $\theta$  – кут, що визначає висоту Сонця над лінією обрію.

Склад атмосфери істотно впливає на параметри наземного сонячного випромінювання. Проходячи крізь атмосферу, космічне сонячне випромінювання перетерплює поглинання і розсіювання.

Поглинання обумовлене цілою низкою складових атмосфери: водяною парою, озоном, киснем, вуглекислим газом та ін. В основному поглинання визначається водяною парою. Розсіювання викликається молекулами газів (релеєвське розсіювання) і аерозолями. Аерозольне розсіювання залежить від кількості і розміру часток пилу, зваженого в атмосфері.

Сонячне випромінювання, що пройшло крізь атмосферу, з урахуванням релеєвського розсіювання може бути оцінене як

$$\tau_r = \exp(-0,008735 \lambda^{-4,08} m p / p_0). \quad (11.1.2)$$

Пропускання, зменшене через поглинання водяною парою, характеризується частиною сонячних променів, що пройшли крізь атмосферу в спектральних областях смуг поглинання води:

$$\tau_\omega = \exp(-k_\omega(\lambda)\omega), \quad (11.1.3)$$

де  $k_\omega(\lambda)$  - коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання водяною парою;  $\omega$ — шар осадженої водяної пари в атмосфері.

Слід зазначити, що поглинання водяною парою і постійними складовими атмосфери, такими, як озон, кисень, вуглекислий газ, аміак, є досить селективним. Емпіричні співвідношення для розрахунку поглинання кожною з цих складових атмосфери виведені, але більш наочне уявлення про затримку ними сонячного випромінювання, що надходить на Землю, можна одержати з рис. 11.1.1.

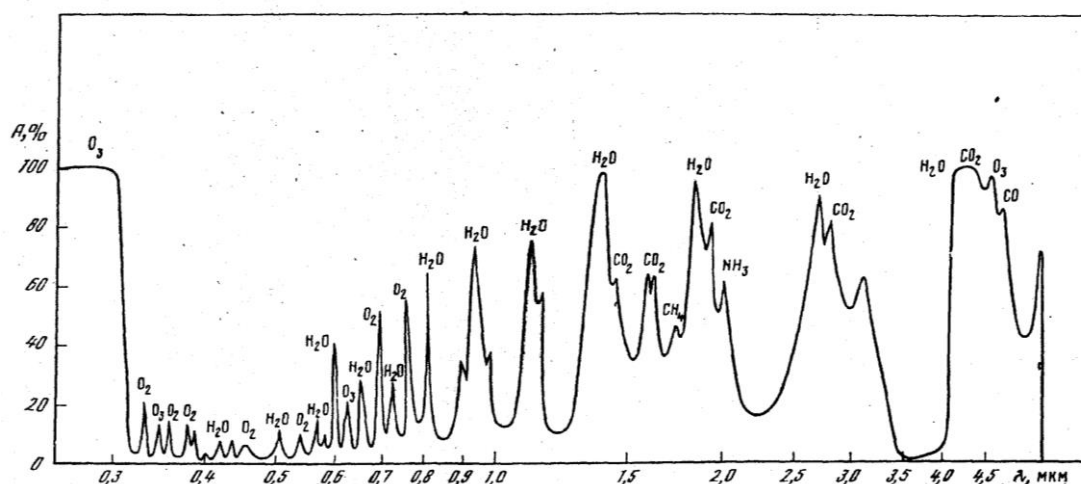


Рисунок 11.1.1 – Селективне спектральне поглинання сонячного випромінювання окремими складовими атмосфери при повітряній масі  $m=1$ , товщині шару осадженої водяної пари 2 см і приведеній товщині шару озону 2 мм (при нормальних температурі і тиску)

Для оцінки аерозольного розсіювання користуються поняттям «мутність атмосфери». Прямий сонячний потік, ослаблений у результаті аерозольного розсіювання, можна визначити за формулою:

$$\tau_{\alpha} = \exp(-\beta\lambda^{-\alpha} m), \quad (11.1.4)$$

де  $\beta$  - коефіцієнт мутності;  $\alpha$  - коефіцієнт, що називають показником селективності.

Коефіцієнт мутності характеризує кількість зважених у повітрі часток,

показник селективності – склад часток за розмірами: чим дрібніші частки, тим вище  $\alpha$  і тим більша частина випромінювання послабляється в ультрафіолетовій і блакитній областях спектра. Припускається, що для різних атмосферних умов коефіцієнт  $\alpha$  змінює своє значення від 0,8 до 2, а коефіцієнт  $\beta$  - від 0,01 до 0,375.

**Завдання.** Розрахувати зменшення інтенсивності світлового потоку сонячного випромінювання  $E$  в діапазоні довжин хвиль  $\lambda = 0,295 \div 3$  мкм за рахунок: релеевського розсіювання, аерозольного розсіювання, а також спільно релеевського й аерозольного розсіювання. За розрахунковими даними, а також за даними табл. 11.1.1 побудувати залежності  $E = f(\lambda)$ . Вихідні дані представлені в табл. 11.1.2. Атмосферний тиск прийняти таким, що дорівнює  $p_0$ .

Таблиця 11.1.1 – Спектр позаатмосферного сонячного випромінювання при АМ0 ( $E=1360$  Вт/м<sup>2</sup>)

$\lambda$ , мкм	$E_{\lambda}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·мкм)	$\lambda$ , мкм	$E_{\lambda}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·мкм)	$\lambda$ , мкм	$E_{\lambda}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·мкм)
1	2	3	4	5	6
0,295	567	0,450	2030	0,720	1410
0,300	530	0,455	2060	0,740	1330
0,305	589	0,460	2070	0,760	1280
0,310	668	0,465	2060	0,780	1220
0,315	732	0,470	2050	0,800	1160
0,320	782	0,475	2080	0,850	1020
0,325	898	0,480	2070	0,900	897
0,330	972	0,485	1990	0,950	823
0,335	959	0,490	1970	1,00	735
0,340	959	0,495	2010	1,05	058
0,345	972	0,500	2000	1,10	595
0,350	1006	0,505	1990	1,15	538
0,355	1006	0,510	1980	1,20	487
0,360	1000	0,520	1900	1,25	441
0,3625	1040	0,530	1930	1,30	393
0,3675	1070	0,540	1900	1,35	366
0,370	1080	0,550	1870	1,40	337
0,375	1060	0,560	1820	1,45	312

Продовження таблиці 11.1.1

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
0,380	1060	0,570	1820	1,50	287
0,385	1020	0,580	1820	1,55	267
0,390	1040	0,590	1790	1,60	244
0,395	1130	0,600	1750	1,65	223
0,400	1430	0,610	1730	1,70	204
0,405	1670	0,620	1690	1,80	168
0,410	1740	0,630	1660	1,90	135
0,415	1770	0,640	1630	2,0	111,5
0,420	1760	0,650	1590	2,2	78,5
0,425	1710	0,660	1560	2,4	57,3
0,430	1650	0,670	1550	2,6	43,0
0,435	1690	0,680	1520	2,8	32,8
0,440	1830	0,690	1500	3,0	25,4
0,445	1940	0,700	1480		

Таблиця 11.1.2 – Варіанти завдань для розрахунку

№ варіанту	$\theta$	$\alpha$	$\beta$
1	90°	0,8	0,01
2	41°49'	0,9	0,05
3	30°	1	0,1
4	19°27'	1,1	0,15
5	11°32'	1,2	0,2
6	90°	1,3	0,25
7	41°49'	1,4	0,3
8	30°	1,5	0,35
9	19°27'	1,6	0,375
10	11°32'	1,7	0,01
11	90°	1,8	0,05
12	41°49'	1,9	0,1
13	30°	2	0,15
14	19°27'	0,8	0,2
15	11°32'	0,9	0,25
16	90°	1	0,3
17	41°49'	1,1	0,35
18	30°	1,2	0,375
19	19°27'	1,3	0,01
20	11°32'	1,4	0,375

### Порядок виконання завдання

- 1) Використовуючи задане значення кута висоти Сонця  $\theta$  (табл. 11.1.2), знаходимо повітряну масу  $m$  за формулою (11.1.1).
- 2) Для кожного значення довжини хвилі сонячного випромінювання  $\lambda$ , зазначеної у табл. 11.1.1, за формулою (11.1.2) знаходимо коефіцієнт пропускання, обумовлений релеевським розсіюванням  $\tau_r$ .
- 3) Для кожного значення довжини хвилі знаходимо інтенсивність сонячного випромінювання з урахуванням впливу релеевського розсіювання  $E_{r\lambda}$  як добуток інтенсивності  $E_\lambda$  (табл. 11.1.1) на відповідний коефіцієнт пропускання  $\tau_r$  при даній довжині хвилі:

$$E_{r\lambda} = E_\lambda \tau_r.$$

- 4) За отриманими даними будуюмо залежність  $E_{r\lambda}$  від довжини хвилі  $\lambda$ .
- 5) За виразом (11.1.4) знаходимо коефіцієнт пропускання, обумовлений аерозольним розсіюванням  $\tau_\alpha$ , для кожного значення довжини хвилі  $\lambda$ , зазначеного в табл. 11.1.1. При розрахунку використовуємо значення  $\alpha$  і  $\beta$ , наведені у табл. 11.1.2.
- 6) Відповідні значення інтенсивності сонячного випромінювання  $E_{\alpha\lambda}$ , обумовленої аерозольним розсіюванням, розраховуємо як добуток інтенсивності  $E_\lambda$  (табл. 11.1.1) на відповідний коефіцієнт пропускання  $\tau_\alpha$  при даній довжині хвилі:

$$E_{\alpha\lambda} = E_\lambda \tau_\alpha.$$

- 7) За отриманими даними будуюмо залежність  $E_{\alpha\lambda}$  від довжини хвилі  $\lambda$ .
- 8) Спільна дія релеевського та аерозольного розсіювання визначається добутком відповідних коефіцієнтів пропускання:

$$\tau_{r\alpha} = \tau_r \tau_\alpha.$$

- 9) Значення інтенсивності сонячного випромінювання з урахуванням спільної дії релеевського та аерозольного розсіювання  $E_{r\alpha\lambda}$  при фіксованій довжині хвилі  $\lambda$  знаходимо як добуток інтенсивності  $E_\lambda$  (табл. 11.1.1) на відповідний коефіцієнт пропускання  $\tau_{r\alpha}$ :

$$E_{ra\lambda} = E_{\lambda} \tau_{ra}$$

10) Будуємо залежність  $E_{ra\lambda}$  від довжини хвилі сонячного випромінювання  $\lambda$ , порівнюємо між собою отримані графічні залежності спектрів пропускання земної атмосфери.

Під час виконання завдання рекомендується скористатися функціоналом середовища MS Excel.

### Питання для самоконтролю

1. Поясніть поняття атмосферної маси.
2. Від чого залежать інтенсивність та спектральний склад сонячного випромінювання на рівні земної поверхні?
3. Вкажіть причини поглинання сонячного випромінювання при проходженні крізь атмосферу Землі.
4. Поясніть причини розсіювання сонячного випромінювання земною атмосферою.
5. Дайте визначення коефіцієнту мутності атмосфери.

### 11.3 Завдання №2. Розрахунок концентратора сонячного випромінювання

Для отримання сильноконцентрованого сонячного випромінювання зі ступенем концентрації світлового потоку понад 100 кратно в фотовольтаїці найчастіше використовують параболоїдні відбивачі.

Геометрію параболоїдного відбивача характеризують двома незалежними параметрами (рис. 11.2.1): діаметром  $D_K = 2r_K$  (або фокусною відстанню  $f_K$ ) та кутом напіврозкриття  $\beta$  (або відношенням  $D_K/f_K$ ). Третій параметр завжди є залежним і визначається з рівняння:

$$D_K = \frac{4f_K \sin \beta}{1 + \cos \beta}. \quad (11.2.1)$$

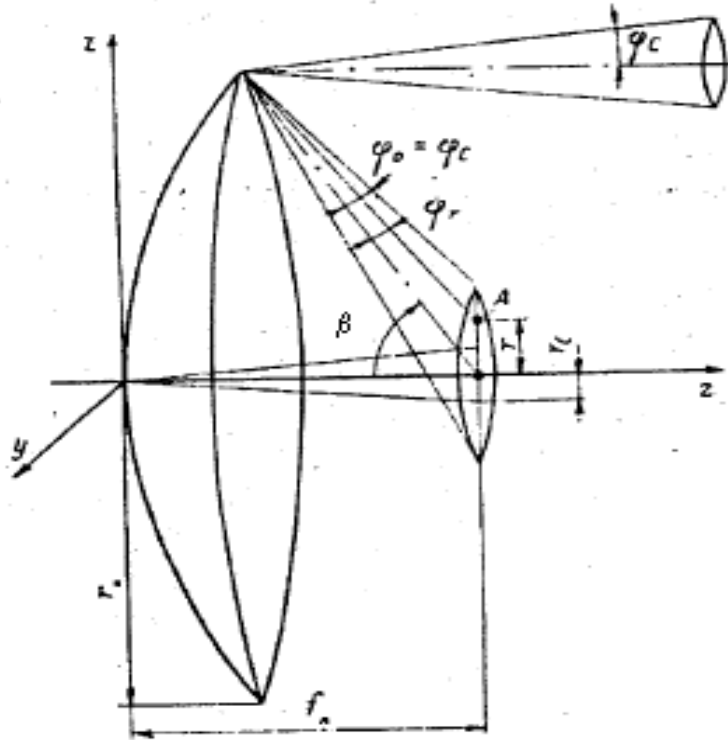


Рисунок 11.2.1 – Схематичне зображення параболоїдного відбивача сонячного випромінювання

Максимальна температура в фокальній плямі параболоїдного концентратора визначається рівнянням:

$$T = 10^2 \sqrt[4]{\frac{E_m}{5,735}}, K; \quad (11.2.2)$$

$$E_m = \frac{3\gamma E_U}{\alpha^2} \sin^2 \beta,$$

де  $\gamma$  - коефіцієнт, що враховує втрату енергії за рахунок розсіювання на недосконалостях поверхні й поглинання в шарі покриття;  $E_U$  - сонячна радіація, що падає на одиницю поверхні в площині, перпендикулярній сонячному променю, яка в середніх широтах складає порядку  $1000 \text{ Вт/м}^2$ ;  $\alpha = 2tg16'$  -



величина, що визначає діаметр сонячного зображення в фокальній площині.

У тому випадку, коли відбитий промінь утворює з оптичною віссю відбивача кут  $\beta$ , в фокальній площині буде виникати еліптична пляма з площею еліпса:

$$S = \frac{\pi \alpha^2 f^2}{(1 + \cos \beta)^2 \cos \beta}. \quad (11.2.3)$$

Важливою характеристикою концентратора сонячної енергії є його ККД –  $\eta_{\text{опт}}$ . Це відношення кількості променистої енергії в фокусі дзеркала  $Q_{\text{фок}}$  до кількості енергії, що падає на поверхню цього дзеркала:

$$\eta_{\text{опт}} \approx \frac{Q_{\text{фок}}}{IF}, \quad (11.2.4)$$

де  $I$  – густина потоку прямих сонячних променів при перпендикулярному падінні на поверхню;  $F$  – проекція відбиваючої поверхні дзеркала на площу, перпендикулярну променю.

**Завдання.** Знайти ККД і максимальну температуру в фокальній плямі параболоїдного концентратора за відомим його радіусом  $r_k$  та кутом напіврозкриття  $\beta$  при падінні сонячних променів паралельно вісі концентратора. Вихідні дані та варіанти завдань для розрахунку наведено в табл. 11.2.1.

Таблиця 11.2.1 – Варіанти завдань для розрахунку

№ вар.	$r_k, м$	$\beta, ^\circ$	$\gamma$	№ вар.	$r, м$	$\beta, ^\circ$	$\gamma$
1	0,4	45	0,80	11	0,4	55	0,84
2	0,45	50	0,81	12	0,45	60	0,85
3	0,5	55	0,82	13	0,5	45	0,80

Продовження таблиці 11.2.1

1	2	3	4	5	6	7	8
4	0,55	60	0,83	14	0,55	50	0,81
5	0,6	45	0,84	15	0,6	55	0,82
6	0,4	50	0,85	16	0,4	60	0,83
7	0,45	55	0,80	17	0,45	45	0,84
8	0,5	60	0,81	18	0,5	50	0,85
9	0,55	45	0,82	19	0,55	55	0,80
10	0,6	50	0,83	20	0,6	60	0,81

**Порядок виконання завдання**

- 1) Використовуючи дані табл. 11.2.1 щодо кута напіврозкриття концентратора  $\beta$  та коефіцієнта втрат  $\gamma$ , визначаємо за виразом (11.2.2) густину променистої енергії  $E_m$  та максимальну температуру в фокальній плямі  $T$ .
- 2) За радіусом концентратора  $r_k$  (табл. 11.2.1) знаходимо його діаметр:

$$D_K = 2r_K.$$

- 3) Знаючи діаметр концентратора та кут напіврозкриття, за формулою (11.2.1) визначаємо фокусну відстань  $f_k$ .
- 4) За формулою (11.2.3) знаходимо площу фокальної плями  $S$ , поклавши  $f = f_k$ .
- 5) Знаходимо величину променистої енергії у фокальній плямі концентратора:

$$Q_{\text{фок}} = E_m S.$$

- 6) Розраховуємо площу  $F$  проекції відбиваючої поверхні концентратора на площину, перпендикулярну сонячним променям, враховуючи, що при падінні сонячних променів паралельно вісі концентратора ця проекція є кругом з діаметром  $D_K$ :

$$F = \pi D_K^2 / 4.$$

- 7) За формулою (11.2.4) розраховуємо ККД концентратора, приймаючи, що густина потоку прямих сонячних променів  $I = E_U$ .

**Питання для самоконтролю**

1. Наведіть класифікацію концентраторів сонячного випромінювання.
2. Назвіть основні параметри параболоїдних концентраторів сонячного

випромінювання.

3. Дайте визначення для ККД сонячного концентратора.

### 11.4 Завдання №3. Побудова світлової ВАХ ідеального сонячного елемента

На рис. 11.3.1 представлено еквівалентну схему ідеального сонячного елемента. Відповідно до даної схеми паралельно до р-п-переходу, який представлено у вигляді діоду, включене джерело струму  $I_{\Phi}$ .

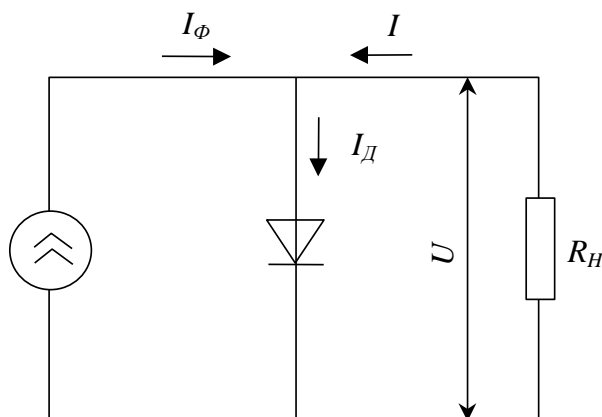


Рисунок 11.3.1 – Еквівалентна схема ідеального сонячного елемента

Струм  $I$ , що протікає через навантаження  $R_H$ , як це видно з рис. 11.3.1, дорівнює:

$$I = I_D - I_{\Phi}, \quad (11.3.1)$$

де  $I_D$  – струм, обумовлений зміною висоти потенціального бар'єра р-п-переходу при освітленні. Цей струм дорівнює темновому струму через напівпровідникову структуру при напрузі  $U$ .

Струм  $I_D$  пов'язаний з напругою на р-п-переході  $U$  наступним виразом:

$$I_D = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eU}{AkT}\right) - 1 \right], \quad (11.3.2)$$

де  $I_0$  – струм насичення діода;  $A$  – параметр ідеальності діода;  $k$  – постійна Больцмана, що дорівнює  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $e$  – елементарний заряд, що дорівнює  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $T$  – абсолютна температура.

Таким чином, світлова вольт-амперна характеристика (ВАХ), тобто залежність струму, що протікає через навантаження, від напруги на клеммах ідеального фотоелектричного перетворювача (ФЕП), має вигляд:

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eU}{AkT}\right) - 1 \right] - I_\Phi. \quad (11.3.3)$$

Оскільки струм  $I$  у колі навантаження залежить від значення навантажувального опору  $R_H$ , то цей вираз визначає форму *навантажувальної* ВАХ при даному значенні  $I_\Phi$ , тобто при заданому рівні потоку сонячного випромінювання, що надходить до поверхні ФЕП.

**Завдання.** Побудувати ВАХ ідеального сонячного елемента, якщо відомі наступні параметри: густина струму насичення  $j_0$ , параметр ідеальності  $A$ , густина фотоструму  $j_\Phi$ , температура  $T$  (табл. 11.3.1). Розрахунок зробити в діапазоні напруг від 0 до 1 В з кроком 0,05 В. Площу сонячного елемента прийняти рівною  $2 \times 1 \text{ см}^2$ . За побудованою ВАХ визначити струм короткого замикання та напругу холостого ходу сонячного елемента.

Таблиця 11.3.1 – Варіанти завдань для розрахунку

№ варіанту	$A$	$j_0, \text{ мА/см}^2$	$j_\Phi, \text{ мА/см}^2$	$T, \text{ }^\circ\text{C}$
1	2	3	4	5
1	1	$1 \cdot 10^{-6}$	30	20
2	1,5	$2 \cdot 10^{-6}$	29	25

Продовження таблиці 11.3.1

1	2	3	4	5
3	2	$3 \cdot 10^{-6}$	28	30
4	1	$4 \cdot 10^{-6}$	27	35
5	1,5	$5 \cdot 10^{-6}$	26	40
6	2	$6 \cdot 10^{-6}$	25	45
7	1	$7 \cdot 10^{-6}$	24	50
8	1,5	$8 \cdot 10^{-6}$	23	20
9	2	$9 \cdot 10^{-6}$	22	25
10	1	$1 \cdot 10^{-5}$	21	30
11	1,5	$1 \cdot 10^{-6}$	20	35
12	2	$2 \cdot 10^{-6}$	30	40
13	1	$3 \cdot 10^{-6}$	29	45
14	1,5	$4 \cdot 10^{-6}$	28	50
15	2	$5 \cdot 10^{-6}$	27	20
16	1	$6 \cdot 10^{-6}$	26	25
17	1,5	$7 \cdot 10^{-6}$	25	30
18	2	$8 \cdot 10^{-6}$	24	35
19	1	$9 \cdot 10^{-6}$	23	40
20	1,5	$1 \cdot 10^{-5}$	22	45

**Порядок виконання завдання**

- 1) Виходячи з даних, наведених у табл. 11.3.1, знаходимо сили струму насичення та фотоструму, помноживши відповідну густину струму  $j$  на площу сонячного елемента  $S$ , виражену у  $\text{см}^2$ :

$$I_0 = j_0 S; I_\phi = j_\phi S.$$

- 2) Переводимо отримані значення струму насичення та фотоструму з міліамперів у амperi.
- 3) Підставляючи значення  $I_0, I_\phi$ , а також інші задані за умовою задачі величини та константи у вираз (11.3.3), отримуємо рівняння світлової ВАХ, що дає можливість для кожного значення напруги на навантаженні  $U$  знайти відповідну силу струму  $I$ .
- 4) За отриманим рівнянням світлової ВАХ визначаємо значення сили струму  $I$  при заданому значенні напруги  $U$ .
- 5) Будуємо графік світлової ВАХ як залежність сили струму від напруги у

діапазоні напруг від 0 до напруги, що забезпечує мінімальне позитивне значення струму сонячного елемента.

- б) За отриманим графіком світлової ВАХ знаходимо значення струму короткого замикання як точку перетину з віссю ординат, а також напругу холостого ходу за перетином графіку з віссю напруг.

### Питання для самоконтролю

1. Яку модель називають моделлю ідеального ФЕП?
2. Зобразіть еквівалентну електричну схему ідеального ФЕП.
3. Виходячи з еквівалентної схеми самостійно отримайте рівняння вольт-амперної характеристики ідеального ФЕП.
4. Які фізичні процеси, що відбуваються в р-п-переході, враховує параметр ідеальності  $A$ ?
5. Проаналізуйте, як впливає температура, збільшення інтенсивності падаючого світлового потоку на ВАХ ідеального ФЕП.

### 11.5 Завдання №4. Побудова світлової ВАХ сонячного елемента з електричними втратами

На відміну від ідеального, для реального сонячного елемента в його еквівалентній схемі враховуються шунтуючий опір  $R_{sh}$ , включений паралельно р-п-переходу, який відображає надбар'єрне проходження струму в ФЕП, і послідовний опір об'єму напівпровідника  $R_s$  (рис. 11.4.1). У цьому випадку струм у навантаженні:

$$I = I_D + I_{sh} - I_\phi, \quad (11.4.1)$$

а вираз для ВАХ приймає вигляд:

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{e(U + IR_s)}{AkT}\right) - 1 \right] + \frac{U + IR_s}{R_{sh}} - I_\phi. \quad (11.4.2)$$

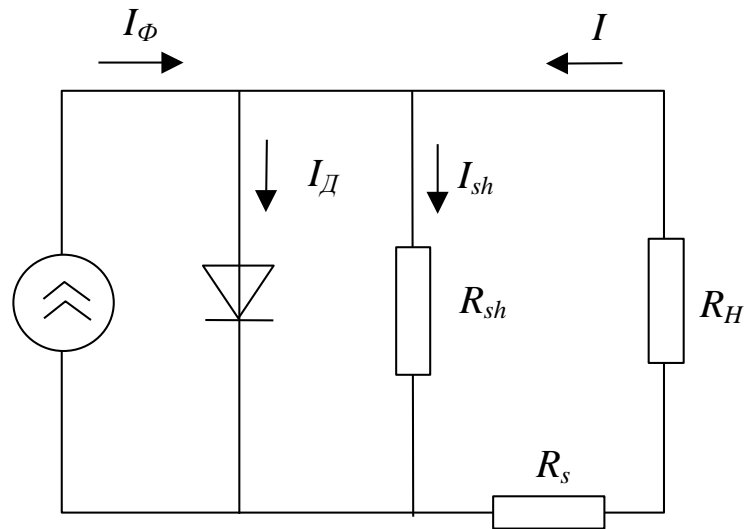


Рисунок 11.4.1 – Еквівалентна схема сонячного елемента з втратами

Рівняння ВАХ (11.4.2) є трансцендентним як відносно струму  $I$ , так і відносно напруги на навантаженні  $U$ , і його розв'язання потребує застосування числових методів.

**Завдання.** Побудувати ВАХ реального сонячного елемента при заданих  $R_{sh}$  і  $R_s$ , якщо відомі наступні його параметри:  $j_0$ ,  $A$ ,  $j_\phi$ ,  $T$  (табл.11.4.1). Розрахунок зробити в діапазоні напруги від 0 до 1 В с кроком 0,1 В. Площу ФЕП прийняти рівною  $2 \times 1 \text{ см}^2$ . Порівняти навантажувальні ВАХ реального та ідеального ФЕП, побудувавши їх на одній координатній площині, та зробити висновки.

Таблиця 11.4.1 – Варіанти завдань для розрахунку

№ варіанту	$A$	$j_0, \text{мА/см}^2$	$j_\phi, \text{мА/см}^2$	$T, ^\circ\text{C}$	$R_s, \text{Ом}$	$R_{sh}, \text{Ом}$
1	2	3	4	5	6	7
1	1	$1 \cdot 10^{-6}$	30	20	1	500
2	1,5	$2 \cdot 10^{-6}$	29	25	1,5	400

Продовження таблиці 11.4.1

1	2	3	4	5	6	7
3	2	$3 \cdot 10^{-6}$	28	30	2	300
4	1	$4 \cdot 10^{-6}$	27	35	2,5	200
5	1,5	$5 \cdot 10^{-6}$	26	40	3	100
6	2	$6 \cdot 10^{-6}$	25	45	3,5	600
7	1	$7 \cdot 10^{-6}$	24	50	4	500
8	1,5	$8 \cdot 10^{-6}$	23	20	4,5	400
9	2	$9 \cdot 10^{-6}$	22	25	5	300
10	1	$1 \cdot 10^{-5}$	21	30	5,5	200
11	1,5	$1 \cdot 10^{-6}$	20	35	6	100
12	2	$2 \cdot 10^{-6}$	30	40	6,5	600
13	1	$3 \cdot 10^{-6}$	29	45	7	500
14	1,5	$4 \cdot 10^{-6}$	28	50	7,5	400
15	2	$5 \cdot 10^{-6}$	27	20	8	300
16	1	$6 \cdot 10^{-6}$	26	25	8,5	200
17	1,5	$7 \cdot 10^{-6}$	25	30	9	100
18	2	$8 \cdot 10^{-6}$	24	35	9,5	600
19	1	$9 \cdot 10^{-6}$	23	40	10	500
20	1,5	$1 \cdot 10^{-5}$	22	45	10,5	400

### Порядок виконання завдання

- 1) Виходячи з даних, наведених у табл. 11.4.1, знаходимо сили струму насичення та фотоструму, помноживши відповідну густину струму  $j$  на площу сонячного елемента  $S$ , виражену у  $\text{см}^2$ :

$$I_0 = j_0 S; I_\phi = j_\phi S.$$

- 2) Переводимо отримані значення струму насичення та фотоструму з міліамперів у амperi.
- 3) Підставляючи значення  $I_0$ ,  $I_\phi$ , а також інші задані за умовою задачі величини та константи у вираз (11.4.2), отримуємо трансцендентне рівняння світлової ВАХ реального сонячного елемента, що виражає залежність між струмом  $I$  та напругою на навантаженні  $U$ . Для розв'язання цього трансцендентного рівняння рекомендується застосовувати ітераційний метод, графічний метод, або ж використовувати спеціалізоване програмне забезпечення, як-то Maple та інші математичні програми.



- 4) За отриманим рівнянням світлової ВАХ визначаємо силу струму  $I$  при заданому значенні напруги  $U$ .
- 5) Будуємо графік світлової ВАХ реального ФЕП як залежність сили струму від напруги у діапазоні напруг від 0 до напруги, що забезпечує мінімальне позитивне значення струму сонячного елемента.
- 6) На цій самій координатній площині будуємо графік світлової ВАХ ідеального сонячного елемента, отриманий під час розв'язання задачі №3, та виконуємо порівняння графіків світлових ВАХ, робимо висновок про вплив послідовного та шунтуючого опору на світлову ВАХ сонячного елемента, на значення напруги холостого ходу та струму короткого замикання.

### Питання для самоконтролю

1. *В чому полягає відмінність еквівалентних схем ідеального та реального ФЕП?*
2. *Які фізичні процеси в в р-п-структурі враховуються послідовним та шунтуючим опорами?*
3. *Як впливають послідовний та шунтуючий опори на ВАХ ФЕП ?*

### 11.6 Завдання №5. Розрахунок оптимальних параметрів гребінчастої контактної сітки

Струмознімальні контакти ФЕП (рис. 11.5.1) можна отримати вакуумним напилюванням товстого шару металу через маску відповідної форми; вакуумним або електролітичним осадженням товстого суцільного шару металу в поєднанні з методами фотолітографії, методом трафаретного друку, тощо.

Струмознімальні контакти можуть виготовлятися як з одного металу, так і з декількох, що наносяться послідовно один на інший, а завершальним етапом може бути лудіння контактів з метою зменшення їх опору.

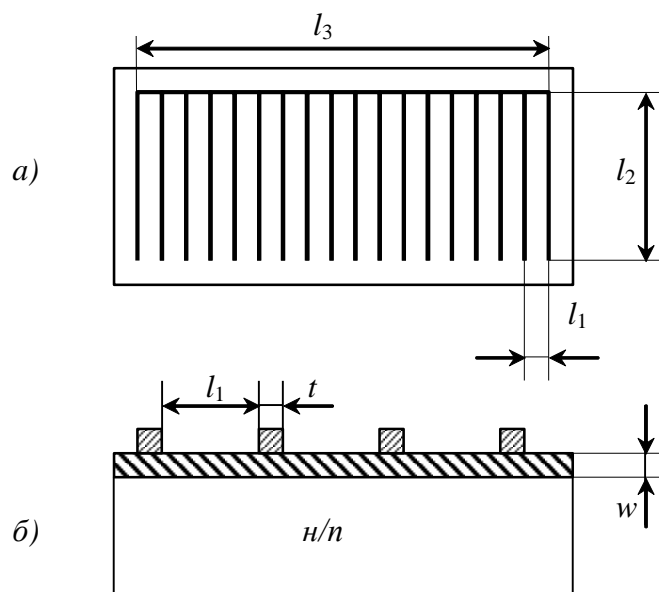


Рисунок 11.5.1 – Струмознімальні контакти до фронтального шару:  
а – вид зверху; б – вид збоку

Розглянемо, з яких міркувань вибираються розміри струмознімальних контактів. Будемо виходити з гребінчастої форми струмознімальної контактної сітки, зображеної на рис. 11.5.1. Оскільки товщина струмознімальних контактів обмежена технологічними причинами і не перевищує 2-10 мкм (якщо не застосовувати лудіння контактів), то це повинно накладати обмеження на мінімальну ширину смужки, тому що опір смужок  $R_C$  повинен бути меншим, ніж опір об'єму напівпровідника  $R_0$  та опір омичного контакту  $R_K$ . Для  $N$  паралельно включених смуг ця умова для опорів, віднесених до  $1 \text{ см}^2$ , може бути записана у вигляді:

$$\rho_{к.м} / (Nw_1t) < R_0 + R_K, \quad (11.5.1)$$

де геометричні параметри  $t, w_1$  показані на рис. 11.5.1, б;  $\rho_{к.м}$  – питомий опір металу струмознімального контакту.

Для виконання умови (11.5.1) необхідно брати або широкую смужку або збільшувати число смуг на одиниці довжини фотоприймальної поверхні.

Однак, збільшення числа контактних смужок робить контактну сітку більш густою і зменшує корисну площу фотоелемента. У зв'язку з цим виникає задача про створення сітки з оптимальними розмірами. Ця задача зводиться до пошуку потужності, яку можна зняти з одиниці поверхні сонячного елемента.

Фотоелектрична напруга, що виникає при освітленні сонячного елемента, записується у вигляді:

$$U = (nkT/e) \ln \{ [J_L(S - S_K) - I](J_S S)^{-1} + 1 \} - IR_S, \quad (11.5.2)$$

де  $S$  і  $S_K$  – загальна площа сонячного елемента і площа, зайнята контактами;  $R_S$  – сумарний послідовний опір.

Позначивши  $I/I_L = I/J_L(S - S_K) = q$ , вираз для потужності можна записати у вигляді:

$$P_{\text{пит}} = J_L q (1 - S_K/S) \{ (nkT/e) \ln [(J_L/J_S)(1 - q)(1 - S_K/S) + 1] - R_S q J_L (1 - S_K/S) \}. \quad (11.5.3)$$

Якщо ширина контактних смужок на поверхні задана, то вираз для  $P_{\text{пит}}$  має максимум при зміні  $m = S_K/S$ . Диференціюючи вираз (11.5.3) по  $m$ , можна дістати рівняння для знаходження оптимального значення  $m$ .

Вираз (11.5.3) при врахуванні останнього члена має також максимум при зміні відстані між смужками  $l_1$ . Цей максимум можна знайти, якщо знехтувати опором об'єму й омичного контакту, задавшись конкретною формою контакту і здійснюючи диференціювання (11.5.3) по  $l_1$  і  $l_2$  (рис. 11.5.1). Тоді:

$$R_B = R_S = \rho_e l_1 / (12 w l_2), \quad (11.5.4)$$

де  $\rho_e$  – питомий опір емітерної області,  $l_2$  – довжина смужки.

У результаті диференціювання виразу (11.5.3) та з урахуванням (11.5.4)

маємо:

$$l_1 = 2 \left\{ 3tw(nkT/e) \ln[(J_L/J_s)(1-q)+1] (2\rho_e q^2 J_L)^{-1} \right\}^{1/3}. \quad (11.5.5)$$

**Завдання.** Розрахувати оптимальні розміри фронтальної контактної сітки сонячного елемента площею  $l_2 \times l_3$  з товщиною емітерного шару  $w$  з питомим опором  $\rho_e$  та визначити кількість контактних доріжок у системі.

Прийняти до уваги, що технологія створення контактної сітки забезпечує мінімальну ширину контактної смужки, рівну  $t$ , а сонячний елемент повинен забезпечувати наступні параметри: 1) щільність фотоструму  $J_L$  при щільності оберненого струму насичення  $J_s$ ; 2) відношення струму сонячного елемента до фотоструму в робочій точці становить  $q$ . При розрахунку прийняти коефіцієнт ідеальності вольт-амперної характеристики рівним  $n$ . Температура становить 25 °С. Варіанти завдань представлені в табл. 11.5.1.

Таблиця 11.5.1 – Варіанти завдань для розрахунку

№ вар.	$l_2, \text{см}$	$l_3, \text{см}$	$w, \text{мкм}$	$\rho_e, \text{Ом} \cdot \text{см}$	$t, \text{мкм}$	$J_L, \text{мА/см}^2$	$J_s, \text{мкА/см}^2$	$q$	$n$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	0,20	0,1	100	20	20	0,80	1
2	1	2	0,20	0,1	150	25	20	0,80	1
3	1	1	0,25	0,1	200	30	20	0,80	1
4	1	2	0,25	0,5	100	20	15	0,80	1,5
5	1	1	0,30	0,5	150	25	15	0,80	1,5
6	1	2	0,30	0,5	200	30	15	0,80	1,5
7	1	1	0,35	1,0	100	20	20	0,85	1
8	1	2	0,35	1,0	150	25	20	0,85	1
9	1	1	0,40	1,0	200	30	20	0,85	1
10	1	2	0,40	0,1	100	20	15	0,85	1
11	2	1	0,20	0,1	150	25	15	0,80	1
12	2	2	0,20	0,1	200	30	15	0,80	1
13	2	1	0,25	0,5	100	20	20	0,80	1
14	2	2	0,25	0,5	150	25	20	0,80	1,5
15	2	1	0,30	0,5	200	30	20	0,80	1,5

### Продовження таблиці 11.5.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	2	2	0,30	1,0	100	20	15	0,80	1,5
17	2	1	0,35	1,0	150	25	15	0,85	1
18	2	2	0,35	1,0	200	30	15	0,85	1
19	2	1	0,40	0,1	100	20	20	0,85	1
20	2	2	0,40	0,1	150	25	15	0,85	1

### Порядок виконання завдання

- 1) Переводимо розмірності параметрів, наведених у табл. 11.5.1, до системи СІ.
- 2) Підставляємо параметри сонячного елемента, а також значення констант, як-то елементарний заряд  $e$ , стала Больцмана  $k$ , а також температуру  $T$  до виразу (11.5.5).
- 3) З використанням отриманого виразу, розраховуємо оптимальну відстань між контактними смугами сітки  $l_1$ .
- 4) Виходячи з того, що колекторна шина контактної сітки має довжину  $l_3$  (рис. 11.5.1, а), визначаємо кількість контактних смуг у оптимізованій системі струмоз'єму, округлюючи результат до найближчого меншого цілого числа:

$$N = \frac{l_3}{l_1} + 1.$$

### Питання для самоконтролю

1. Чим обумовлена необхідність оптимізації геометричних параметрів контактної сітки ФЕП?
2. Які способи формування контактних сіток застосовуються в технології сонячних елементів?
3. Як залежать геометричні параметри контактної сітки від інтенсивності світлового потоку?
4. Назвіть основні конструкції контактних сіток, що застосовуються в ФЕП неконцентрованого та концентрованого сонячного випромінювання.

5. Чому і в яких випадках застосовують багат шарову металізацію контактних сіток?

### 11.7 Завдання №6. Розрахунок ефективності перетворення сонячної енергії кремнієвими фотоелектричними перетворювачами

Спектр сонячного випромінювання, який досягає Землі за межами її атмосфери, близький до спектра випромінювання абсолютно чорного тіла з температурою близько 6000 К. При проходженні крізь земну атмосферу загальна кількість падаючої енергії зменшується і спектральний розподіл її деформується таким чином, що максимум спектру зміщується в бік більш довгих хвиль. При цьому величина зміщення залежить від висоти Сонця над горизонтом завдяки зміні атмосферної маси, крізь яку проходять сонячні промені (рис. 11.6.1).

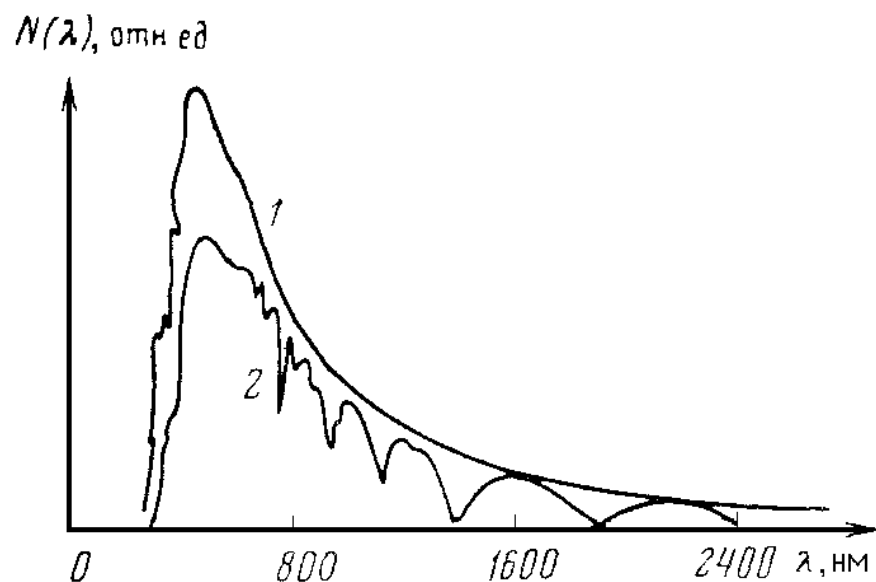


Рисунок 11.6.1 – Спектр сонячного випромінювання:

1 – за межами земної атмосфери; 2 – на рівні моря

Максимально можливий коефіцієнт корисної дії (ККД) перетворення сонячної енергії, визначається із загальних принципів термодинаміки:

$$\eta_{therm} = (T_S - T_E)/T_S, \quad (11.6.1)$$

де  $T_S$  - температура джерела енергії (Сонця);  $T_E$  - температура приймача енергії, тобто поверхні Землі.

Велике обмеження на реально досяжне значення ККД накладає та обставина, що фактично перетворення енергії – це пороговий процес, який протікає при енергіях квантів, що є більшими за деяке мінімальне значення, яке дорівнює ширині забороненої зони напівпровідника  $h\nu > E_g$ . Пороговий характер перетворення енергії може бути врахований введенням наступного безрозмірного коефіцієнта:

$$K_{thresh} = \frac{E_g \int_{E_g}^{\infty} N(E)(1-R)dE}{\int_0^{\infty} EN(E)dE} = \frac{E_g N_{\phi} (1-R)}{E_u}, \quad (11.6.2)$$

де  $N(E)$  - кількість квантів світла з енергією  $E = h\nu$ , які падають в одиницю часу на поверхню фотоприймача;  $R$  - коефіцієнт відбиття світла від поверхні напівпровідника, який залежить від енергії кванту світла  $h\nu$ ;  $E_u$  - густина потоку сонячної радіації, що надходить на поверхню фотоелемента.

Значення  $N_{\phi}$ , що фігурує у формулі (11.6.2), визначається за графіком, представленим на рис. 11.6.2.

Реальний ККД сонячного елемента отримуємо в результаті множення  $K_{thresh}$  на кілька інших безрозмірних чинників, кожний з яких враховує певний тип втрат енергії в загальному процесі перетворення:

1. Ефективність запасання енергії в елементарному процесі перетворення визначається зміною електрохімічного потенціалу неосновних носіїв в напівпровіднику при заданій освітленості. Ця величина виявляється в твердотільних сонячних батареях і у фотоелектрохімічних елементах регенеративного типу у формі так званої "електрорушійної сили холостого ходу"  $\phi_{ph}^{oc}$ , яка співпадає з фотопотенціалом при розімкненому зовнішньому ланцюзі. Відповідний чинник дорівнює:

$$K_{stor} = e\phi_{ph}^{oc}/E_g \quad (11.6.3)$$

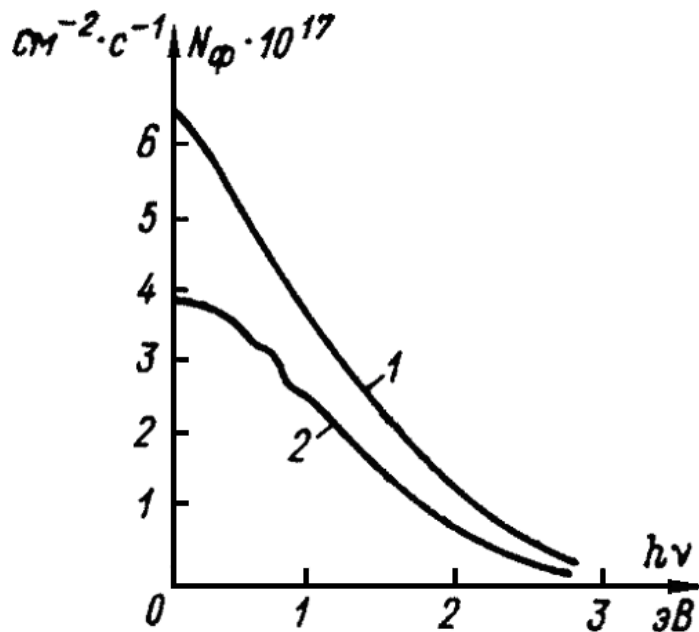


Рисунок 11.6.2 – Розподіл числа поглинених квантів:

1 – AM0; 2 – AM1,5

2. Ефективність розділення утворюваних світлом нерівноважних носіїв заряду проявляється у величині фотоструму при короткому замиканні фотоелемента  $i_{sh.c.}$ . Чинник, що обумовлює ефективність перетворення потоку фотонів в електричний струм, тобто квантовий вихід, дорівнює:



$$Y = \frac{i_{sh.c.}/e}{\int_{E_g}^{\infty} N(E)(1-R)dE} = \frac{i_{sh.c.}/e}{N_{\phi}}. \quad (11.6.4)$$

3. Нарешті, вплив омічних втрат в сонячному елементі (які складаються з падіння напруги в об'ємі напівпровідника) може бути врахований за допомогою фактора заповнення:

$$f = \frac{(i_{ph}\phi_{ph})_{\max}}{(i_{sh.c.}\phi_{ph}^{oc})}. \quad (11.6.5)$$

У чисельнику виразу (11.6.5) знаходиться максимальна величина добутку фотоструму на фотонапругу, яку можна одержати з навантажувальної характеристики сонячного елемента.

У зв'язку з переліченими факторами, реальний ККД сонячного елемента становить:

$$\eta_{real} = K_{thresh} K_{stor} Y f, \quad (11.6.6)$$

причому кожний із співмножників, як впливає з (11.6.2) – (11.6.5), є меншим за одиницю.

**Завдання.** Розрахувати реальний і термодинамічний ККД фотоелектричного перетворювача на основі кремнію ( $R = 0,3$ ;  $E_g = 1,1$  еВ ), якщо відомі наступні його параметри (табл. 11.6.1):  $i_{sh.c.}$ ,  $\phi_{ph}^{oc}$ ,  $(i_{ph})_{\max}$ ,  $(\phi_{ph})_{\max}$ . Елемент працює при температурі 300 К та інсоляції  $E_u = 1000$  Вт/м<sup>2</sup> (спектр АМ1,5).

Таблиця 11.6.1 – Варіанти завдань для розрахунку

№ вар.	$i_{sh.c.}, mA/cm^2$	$\phi_{ph}^{oc}, B$	$(i_{ph})_{max}, mA/cm^2$	$(\phi_{ph})_{max}, B$
1	10	0,40	5	0,30
2	11	0,43	7	0,25
3	12	0,46	9	0,20
4	13	0,50	11	0,30
5	14	0,40	5	0,25
6	15	0,43	7	0,20
7	10	0,46	9	0,30
8	11	0,50	11	0,25
9	12	0,40	5	0,20
10	13	0,43	7	0,30
11	14	0,46	9	0,25
12	15	0,50	11	0,20
13	10	0,40	5	0,30
14	11	0,43	7	0,25
15	12	0,46	9	0,20
16	13	0,50	11	0,30
17	14	0,40	5	0,25
18	15	0,43	7	0,20
19	10	0,46	9	0,30
20	11	0,50	11	0,25

### Порядок виконання завдання

- 1) Переводимо розмірності параметрів, наведених у табл. 11.6.1, до системи СІ.
- 2) За виразом (11.6.1) визначаємо термодинамічний ККД фотоелектричного перетворення.
- 3) За формулами (11.6.2) – (11.6.5) визначаємо відповідні коефіцієнти:  $K_{thresh}, K_{stor}, Y, f$ .
- 4) За виразом (11.6.6) розраховуємо реальний ККД сонячного елемента.
- 5) Порівнюємо значення термодинамічного та реального ККД, робимо висновок.

### Питання для самоконтролю

1. Поясніть причини зменшення інтенсивності сонячного

*випромінювання при проходженні крізь земну атмосферу.*

*2. Які фізичні причини обумовлюють менші значення реальної ефективності фотоелектричного перетворення в порівнянні з термодинамічною?*

*3. Дайте визначення квантового виходу внутрішнього фотоефекту.*

*4. Які види енергетичних втрат притаманні сонячним елементам?*

*5. Назвіть основні способи зменшення енергетичних втрат в сонячних елементах.*

### **11.8 Завдання №7. Побудова температурних залежностей основних параметрів кремнієвого сонячного елемента**

Електричні параметри будь-якого сонячного елемента визначаються в так званих стандартних умовах тестування (STC), а саме при інтенсивності сонячного випромінювання  $1000 \text{ Вт/ м}^2$  і температурі фотоелементів  $T_m = 25^\circ\text{C}$ . Втім, під час експлуатації в реальних умовах температура сонячного елемента підвищується і його продуктивність погіршується. Так у кремнієвих елементах з кожним градусом підвищення температури номінальна потужність падає приблизно на 0,4%. У той же час елементи з телуриду кадмію втрачають всього 0,25%.

У сонячний день елемент у складі фотоелектричного модуля нагрівається до  $60 - 70^\circ\text{C}$ , що призводить до помітного зменшення генерованої ним напруги на 0,07-0,09 В відносно номінального значення. Це і є основною причиною зниження ефективності сонячних елементів при нагріванні, оскільки зростання генерованого струму при цьому, а отже, його вплив на електричну потужність, є незначним.

Залежність струму короткого замикання сонячного елемента  $I_{sc}(T)$  від температури  $T$  є лінійною і визначається наступним рівнянням:

$$I_{sc}(T) = I_{sc}(T_m) \cdot [1 + \alpha_I \cdot (T - T_m)] \quad , \quad (11.7.1)$$

де  $I_{sc}(T_m)$  – значення струму короткого замикання при температурі тестування  $T_m$ ;  $\alpha_I$  - температурний коефіцієнт струму

Залежність напруги холостого ходу  $U_{oc}(T)$  від температури описується аналогічним виразом:

$$U_{oc}(T) = U_{oc}(T_m) \cdot [1 + \alpha_U \cdot (T - T_m)] \quad , \quad (11.7.2)$$

де  $U_{oc}(T_m)$  – значення напруги холостого ходу при температурі тестування  $T_m$ ;  $\alpha_U$  - температурний коефіцієнт напруги.

Максимальна електрична потужність сонячного елемента залежить від температури у відповідності до рівняння:

$$P_{mpp}(T) = P_{mpp}(T_m) \cdot [1 + \alpha_P \cdot (T - T_m)] \quad , \quad (11.7.3)$$

де  $P_{mpp}(T_m)$  – максимальна електрична потужність при температурі тестування;  $\alpha_P$  - температурний коефіцієнт потужності.

Значення температурного коефіцієнту струму  $\alpha_I$  є позитивним, а температурні коефіцієнти напруги  $\alpha_U$  та потужності  $\alpha_P$  – негативні.

**Завдання.** Розрахувати значення струму короткого замикання, напруги холостого ходу та електричної потужності для кремнієвого сонячного елемента з температурою  $T$ , якщо відомі його параметри для умов тестування STC та відповідні температурні коефіцієнти. Побудувати температурні залежності цих параметрів в діапазоні від 0 до 80 °С, зробити висновок. Варіанти завдань для розрахунку представлені в табл. 11.7.1.

Таблиця 11.7.1 – Варіанти завдань для розрахунку

№ варіанту	$I_{sc}(T_m)$ , А	$U_{oc}(T_m)$ , В	$P_{mpp}(T_m)$ , Вт	$\alpha_I$ , %	$\alpha_U$ , %	$\alpha_P$ , %	$T$ , °С
1	9,85	0,67	5,08	0,06	- 0,30	- 0,40	35
2	9,19	0,65	4,83	0,03	- 0,31	- 0,42	40
3	9,37	0,64	4,67	0,05	- 0,29	- 0,39	45
4	10,24	0,61	4,86	0,04	- 0,35	- 0,45	50
5	9,15	0,63	4,44	0,05	- 0,32	- 0,39	55
6	9,06	0,63	4,42	0,04	- 0,32	- 0,42	60
7	9,85	0,67	5,08	0,06	- 0,30	- 0,40	65
8	9,19	0,65	4,83	0,03	- 0,31	- 0,42	70
9	9,37	0,64	4,67	0,05	- 0,29	- 0,39	35
10	10,24	0,61	4,86	0,04	- 0,35	- 0,45	40
11	9,15	0,63	4,44	0,05	- 0,32	- 0,39	45
12	9,06	0,63	4,42	0,04	- 0,32	- 0,42	50
13	9,85	0,67	5,08	0,06	- 0,30	- 0,40	55
14	9,19	0,65	4,83	0,03	- 0,31	- 0,42	60
15	9,37	0,64	4,67	0,05	- 0,29	- 0,39	65
16	10,24	0,61	4,86	0,04	- 0,35	- 0,45	70
17	9,15	0,63	4,44	0,05	- 0,32	- 0,39	35
18	9,06	0,63	4,42	0,04	- 0,32	- 0,42	40
19	9,85	0,67	5,08	0,06	- 0,30	- 0,40	45
20	9,19	0,65	4,83	0,03	- 0,31	- 0,42	50

### Порядок виконання завдання

- 1) Використовуючи дані табл. 11.7.1 та приймаючи до уваги, що в умовах тестування STC температура  $T_m = 25$  °С, у відповідності до виразу (11.7.1) складаємо рівняння, яке визначає залежність струму короткого замикання  $I_{sc}$  від температури сонячного елемента  $T$ . Попередньо переводимо значення температурних коефіцієнтів з відсотків до відносних одиниць.
- 2) Підставляючи задане значення температури  $T$  в отримане рівняння, знаходимо струм короткого замикання сонячного елемента при цій температурі.
- 3) Для побудови залежності  $I_{sc}(T)$  у отриманий вираз послідовно підставляємо значення температури 0 та 80 °С та отримуємо пару точок  $I_{sc1}$  при  $T_1 = 0$  та  $I_{sc2}$  при  $T_2 = 80$  °С. Оскільки залежність  $I_{sc}(T)$  є лінійною, то для її побудови достатньо цих двох точок.

- 4) У відповідності до (11.7.2) та з використанням даних табл. 11.7.1 записуємо вираз для температурної залежності напруги холостого ходу  $U_{oc}(T)$ .
- 5) За отриманим виразом для  $U_{oc}(T)$  визначаємо напругу холостого ходу при температурі  $T$ , а також 0 та 80 °С, будуємо графік температурної залежності напруги холостого ходу сонячного елемента.
- 6) Записуємо вираз для температурної залежності максимальної електричної потужності сонячного елемента  $P_{mpp}(T)$ , використовуючи рівняння (11.7.3) та дані табл. 11.7.1.
- 7) За отриманим виразом для  $P_{mpp}(T)$  знаходимо максимальну електричну потужність сонячного елемента при температурі  $T$ , а також 0 та 80 °С, будуємо графік залежності максимальної електричної потужності від температури.
- 8) З аналізу побудованих залежностей робимо висновок щодо впливу температури на параметри сонячних елементів.

### **Питання для самоконтролю**

1. Поясніть фізичні причини, що обумовлюють вплив температури на основні параметри сонячних елементів.
2. Яке значення світлового потоку та температури встановлюються при тестуванні сонячних елементів в умовах STC?
3. Поясніть, як впливає температура на основні параметри сонячних елементів.
4. Чому ефективність перетворення сонячного випромінювання з підвищенням температури сонячного елемента зменшується?
5. Поясніть, чому в зимовий період фотоелектрична панель здатна виробляти більше електричної енергії, аніж влітку.

## 11.9 Завдання №8. Розрахунок фотоелектричного модуля

Для забезпечення потрібних значень струмів та напруг сонячні елементи при збиранні у модуль з'єднують, як правило, змішаним послідовно-паралельним способом: з'єднання елементів у послідовний ланцюг дозволяє досягти потрібного значення напруги при незмінному струмі в ланцюзі, що визначається фотострумом сонячного елемента з найгіршими параметрами; паралельне з'єднання ланцюгів, які складаються з однакової кількості послідовно з'єднаних сонячних елементів, дозволяє збільшити струм короткого замикання модуля при фіксованому значенні напруги. Типова схема комутації сонячних елементів у модулі наведена на рис. 11.8.1.

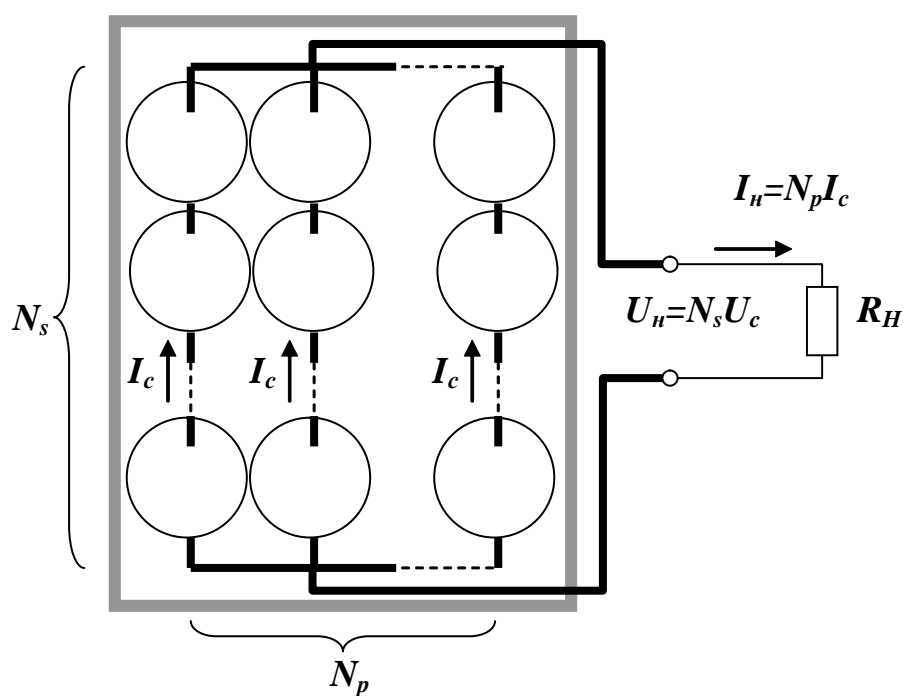


Рисунок 11.8.1 – Комутація сонячних елементів у модулі

Для забезпечення напруги модуля  $U_n$  необхідно з'єднати послідовно  $N_s$  сонячних елементів з напругою  $U_c$  кожен:

$$U_n = N_s U_c. \quad (11.8.1)$$

В той же час, щоб забезпечити струм  $I_n$ , потрібно, щоб модуль містив  $N_p$  паралельних гілок з силою струму  $I_c$  кожна, тобто:

$$I_n = N_s I_c. \quad (11.8.2)$$

Якщо кожен сонячний елемент у складі модуля має струм короткого замикання  $I_{sc}$ , напругу холостого ходу  $U_{oc}$  і фактор заповнення навантажувальної характеристики  $FF$ , то за умови оптимального опору навантаження  $R_n$  на ньому виділиться потужність:

$$P_H = U_n I_n = \frac{U_n^2}{R_n} = N_s U_{oc} N_p I_{sc} FF. \quad (11.8.3)$$

Розрахунок ефективності модуля сонячних елементів виконується за виразом, що є ідентичним до того, за яким визначають ефективність окремого сонячного елемента:

$$\eta_M = \frac{P_M}{P_0 S_M} = \frac{N_s U_{oc} N_p I_{sc} FF}{P_0 S_M}, \quad (11.8.4)$$

де  $P_M$  – максимальна електрична потужність модуля;  $P_0$  – густина потужності падаючого світлового потоку;  $S_M$  – площа модуля.

Навіть без врахування омичних втрат в модулі, нещільне розміщення сонячних елементів на його площі, яке пов'язане з кінцевими відстанями між сусідніми сонячними елементами, а також відмінною від прямокутної формою пластин, призводить до зменшення коефіцієнта корисної дії модуля. Дійсно, відношення ефективності модуля  $\eta_M$  до ефективності окремого сонячного елемента  $\eta_{sc}$  може бути записане у наступному вигляді:



$$\frac{\eta_M}{\eta_{sc}} = \frac{\frac{N_p I_{sc} N_s U_{oc} FF}{P_0 S_M}}{\frac{I_{sc} U_{oc} FF}{P_0 S_{sc}}} = \frac{N_p N_s S_{sc}}{S_M} = \frac{N_p N_s S_{sc}}{N_p N_s S_{sc} + S'} < 1. \quad (11.8.5)$$

де  $S_{sc}$  – площа окремого сонячного елемента;  $S'$  – площа модуля, що не зайнята сонячними елементами.

Як видно з виразу (11.8.5), відношення ефективності модуля до ККД окремого сонячного елемента є меншим за одиницю. У зв'язку з цим, при розробці конструкцій модулів варто прагнути, щоб  $S' \rightarrow 0$ , тобто, до зменшення вільної площі, не покритої сонячними елементами.

**Завдання.** Сонячний елемент діаметром 10 см має наступні параметри: густина струму короткого замикання  $j_{sc} = 34 \text{ мА/см}^2$ , напруга холостого ходу  $U_{oc} = 0,65 \text{ В}$ , фактор заповнення навантажувальної характеристики  $FF = 0,71$ . Наведені параметри виміряні при густині потужності потоку сонячного випромінювання  $P_0 = 850 \text{ Вт/м}^2$ .

Необхідно:

1. Розрахувати мінімальну кількість сонячних елементів для компонування модуля неконцентрованого сонячного випромінювання, призначеного для безпосереднього живлення узгодженого навантаження з номінальною напругою  $U_n$  та потужністю  $P_n$  (табл. 11.8.1).

2. Визначити струм короткого замикання, напругу холостого ходу та максимальну електричну потужність запропонованого модуля.

3. Визначити мінімальну площу модуля для варіанту розміщення масиву сонячних елементів паралельними рядами (рис. 11.8.1).

4. Розрахувати ефективність запропонованого модуля та порівняти її з ефективністю окремого сонячного елемента в його складі. Зробити висновки.

Втратами на внутрішньому опорі модуля знехтувати.

Таблиця 11.8.1 – Варіанти завдань для розрахунку

№ вар.	$U_n$ , В	$P_n$ , Вт	№ вар.	$U_n$ , В	$P_n$ , Вт
1	1,5	9	11	6	36
2	3	18	12	12	72
3	6	36	13	1,5	9
4	12	72	14	3	18
5	1,5	9	15	6	36
6	3	18	16	12	72
7	6	36	17	1,5	9
8	12	72	18	3	18
9	1,5	9	19	6	36
10	3	18	20	12	72

### Порядок виконання завдання

- 1) Приводимо діаметр сонячного елемента  $d$  до одиниць системи СІ та знаходимо площу окремого елемента:

$$S_{sc} = \pi d^2 / 4.$$

- 2) Знаходимо силу струму короткого замикання сонячного елемента, попередньо призвівши густину струму  $j_{sc}$  до одиниць системи СІ:

$$I_{sc} = j_{sc} S_{sc}.$$

- 3) Розраховуємо максимальну електричну потужність окремого сонячного елемента:

$$P_c = I_{sc} U_{oc} FF.$$

- 4) Виходячи з потужності навантаження  $P_n$  (табл. 11.8.1), визначаємо мінімальну загальну кількість сонячних елементів, достатню для його живлення, округлюючи отримане значення до найближчого більшого цілого числа:

$$N = P_n / P_c.$$

- 5) Оцінюємо мінімальну кількість сонячних елементів у послідовній гілці, враховуючи, що напруга в точці максимальної потужності сучасних елементів на основі кристалічного кремнію становить  $0,8U_{oc}$ , округлюємо отримане значення до найближчого більшого цілого числа:

$$N_s = U_n / 0,8U_{oc}.$$

- 6) Оцінюємо кількість паралельних гілок у складі модуля, округлюючи значення в бік найближчого більшого цілого:

$$N_p = N / N_s.$$

- 7) За необхідності збільшуємо загальну кількість сонячних елементів у модулі  $N$  так, щоб отримати можливість розподілити їх в однаковій кількості  $N_s$  по паралельних гілках.

- 8) Визначаємо основні параметри модуля, такі як: струм короткого замикання  $I_{scM}$ , напругу холостого ходу  $U_{ocM}$  та максимальну електричну потужність  $P_M$ :

$$I_{scM} = I_{sc} N_p; U_{ocM} = U_{oc} N_s; P_M = P_c N.$$

- 9) Перевіряємо умови, виконання яких за даного рівня освітлення є достатнім для безпосереднього живлення навантаження від модуля сонячних елементів:

$$U_M \geq U_n; P_M \geq P_n.$$

- 10) Визначаємо мінімальну площу модуля при розміщенні сонячних елементів діаметром  $d$  паралельними рядами (рис. 11.8.1) як площу описаного навколо масиву елементів прямокутника шириною  $a$  на висотою  $b$ :

$$S_M = a \cdot b = d \cdot N_p \cdot d \cdot N_s = N_p N_s d^2.$$

- 11) За формулою (11.8.4) знаходимо ефективність модуля.

- 12) Використовуючи вираз (11.8.5), визначаємо відношення ефективності модуля до ефективності окремого сонячного елемента, робимо висновок.

### Питання для самоконтролю

1. Поясніть необхідність застосування послідовного з'єднання сонячних елементів у модулі.

2. З якою метою застосовують паралельне з'єднання гілок сонячних елементів?

3. Чому ефективність модуля ФЕП є меншою за ефективність окремого сонячного елемента?

4. Назвіть заходи з підвищення ефективності модулів сонячних

елементів.

### 11.10 Завдання №9. Розрахунок ємності акумуляторної батареї для автономної фотоелектричної системи

Автономні сонячні електростанції забезпечують електроживлення в межах локальної мережі і найчастіше використовуються саме там, де має місце віддаленість об'єкта від централізованих електромереж або ж підключення до загальної електромережі є занадто дорогим.

Автономна фотоелектрична система у загальному випадку містить наступні основні складові (рис. 11.9.1):

- фотоелектрична панель (сонячний модуль);
- контролер заряду акумуляторної батареї;
- акумуляторна батарея;
- інвертор (у випадку наявності споживачів змінного струму);
- електричні кабелі.

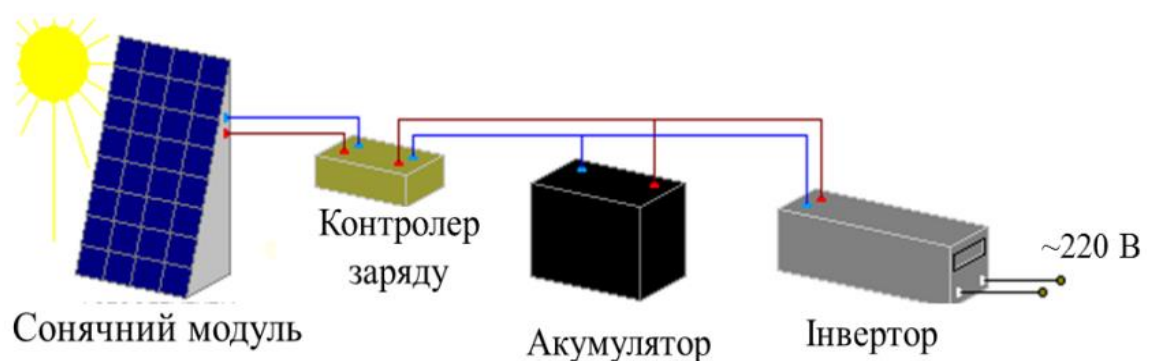


Рисунок 11.9.1 – Структура автономної фотоелектричної системи

В таких системах функцію накопичення та зберігання електричної енергії до моменту споживання електричними пристроями виконує акумуляторна батарея. В автономних сонячних станціях можуть використовуватись наступні типи акумуляторних батарей:

- OPzS – є найбільш розповсюдженими стаціонарними заливними акумуляторами, що мають найбільшу в порівнянні з іншими типами акумуляторів кількість циклів «заряд-розряд» при глибині розряду до 80% і відрізняються низьким рівнем саморозряду;

- GEL – їх переваги полягають у тому, що при пошкодженні корпусу електроліт не витікає, бо він знаходиться у гелевому стані, а під час зарядки не виділяють отруйні пари;

- AGM – це акумулятори, які оснащено абсорбуючими пакетами з електролітом, що знаходиться у зв'язаному стані, їх можна експлуатувати в будь-якому положенні, допускають глибину розряду до 80%, витримують до 500 циклів «заряд-розряд», мають температурний діапазон використання від 15°C до 25°C, недозаряд не чинить на них негативного впливу, але не допускають перезаряду, який призводить до виходу їх з ладу;

- лужні акумуляторні батареї – допускають глибокі розряди без негативних наслідків, але мають «ефект пам'яті»;

- літєві акумуляторні батареї – є доволі компактними, здатні без втрати ємності витримувати глибокі розряди, швидко заряджаються.

Щодо стартерних акумуляторних батарей, то їх не рекомендується використовувати в автономних системах, оскільки вони чутливі до глибокого розряджання і не можуть забезпечити тривалу роботу системи.

Загальна ємність акумуляторної батареї автономної фотоелектричної системи розраховується, виходячи з добової потреби об'єкта в електричній енергії  $W_{доб}$ , яка, в свою чергу, визначається на основі моніторингу тижневого споживання енергії об'єктом  $W_{тиж}$ .

Важливим етапом є вибір напруги системи  $U_n$  по стороні постійного струму, оскільки від цього залежить не лише вибір типу обладнання для комплектування автономної станції, а й номінальні значення струмів, а отже, і енергетичні втрати в системі. Зазвичай це 12 або 24 В. Для потужних систем це значення може становити 48 В і більше.

Обравши значення постійної напруги  $U_n$  та виходячи з тижневої потреби

об'єкта в енергії змінного струму, визначають середньодобову потребу в енергії постійного струму, користуючись рівнянням:

$$W_{\text{доб}} = \frac{W_{\text{тиж}}}{7} k, \text{ кВт}\cdot\text{год}, \quad (11.9.1)$$

де  $k$  – коефіцієнт, що відображає втрати енергії в інверторі, який можна прийняти рівним 1,2;  $W_{\text{тиж}}$  – тижнева потреба об'єкта в енергії змінного струму, кВт·год.

Визначають добову витрату ємності акумуляторної батареї, яка має покривати потребу об'єкта в електричній енергії:

$$C_{\text{доб}} = 1000 \frac{W_{\text{доб}}}{U_n}, \text{ А}\cdot\text{год}, \quad (11.9.2)$$

де 1000 – коефіцієнт, що враховує переведення добового споживання з кВт·год у Вт·год;  $U_n$  – напруга по стороні постійного струму, В.

Враховуючи допустиму глибину розряду акумуляторної батареї  $\gamma$ , необхідна добова ємність становитиме:

$$C_{\text{доб}\gamma} = \frac{C_{\text{доб}}}{\gamma}, \text{ А}\cdot\text{год}. \quad (11.9.3)$$

Вплив температури навколишнього середовища на ємність акумуляторної батареї враховується уведенням поправочного коефіцієнту  $\alpha$  (табл. 11.9.1), який відображає ефект зменшення реальної ємності відносно номінальної при зниженні температури:

$$C_{\text{доб}\alpha\gamma} = \alpha \cdot C_{\text{доб}\gamma}, \text{ А}\cdot\text{год}. \quad (11.9.4)$$

Таблиця 11.9.1 – Поправочний температурний коефіцієнт

Температура		Коефіцієнт
<sup>0</sup> С	F	
26,7	80	1,00
21,2	70	1,04
15,6	60	1,11
10,0	50	1,19
4,4	40	1,30
-1,1	30	1,40
-6,7	20	1,59

Для забезпечення безперервного електропостачання об'єкту навіть в умовах недостатньої сонячної радіації необхідно врахувати ймовірну кількість послідовних «днів без Сонця»  $N_{bc}$ , тобто днів, протягом яких через негоду або хмарність сонячної енергії недостатньо для заряду акумуляторної батареї і, відповідно, для роботи навантаження (табл. 11.9.2). Тоді необхідна ємність акумуляторної батареї становитиме:

$$C_{заг} = C_{доб\gamma} \cdot N_{bc}, \text{ А}\cdot\text{год.} \quad (11.9.5)$$

Таблиця 11.9.2 – Кількість «днів без Сонця», обумовлене погодними умовами

Широта місцевості	Період		
	літні місяці	осінні і весняні місяці	зимові місяці
30	2-4	3-4	4-6
40	2-4	4-6	6-10
50	2-4	6-8	10-15
60	3-5	8-12	15-25
70	3-5	12-14	20-35

Для розрахунку кількості акумуляторів у складі автономної фотоелектричної системи, що забезпечують необхідну ємність батареї  $C_{заг}$ , за

каталогами виробників обирають тип акумулятора та виписують для нього номінальну ємність  $C_{ном}$  і номінальну напругу  $U_{ном}$ .

Кількість акумуляторів, з'єднаних паралельно, знаходять за виразом:

$$N_{пар} = \frac{C_{заг}}{C_{ном}}, \text{ од.} \quad (11.9.6)$$

Отримане значення  $N_{пар}$  округлюють до найближчого більшого цілого числа.

Діленням напруги постійного струму системи  $U_n$  на номінальну напругу акумулятора  $U_{ном}$  (найчастіше 12 В) знаходять кількість послідовно з'єднаних акумуляторів у гілці:

$$N_{посл} = \frac{U_n}{U_{ном}}, \text{ од.} \quad (11.9.7)$$

Результат округлюють до найближчого більшого цілого.

Загальну кількість акумуляторів в батареї розраховують як добуток кількості послідовно та паралельно з'єднаних акумуляторів:

$$N = N_{посл} \cdot N_{пар}, \text{ од.} \quad (11.9.8)$$

**Завдання.** Розрахувати необхідну ємність акумуляторної батареї та кількість акумуляторів для автономної фотоелектричної системи з напругою по стороні постійного струму  $U_n$ , призначеної для безперебійного забезпечення електричною енергією об'єкта з тижневим споживанням  $W_{тиж}$ , що розташований на широті  $\varphi$ .

Відомо, що акумуляторна батарея має бути сформована з акумуляторів номінальною ємністю  $C_{ном}$  та напругою  $U_{ном}$ . Допустима глибина розряду



аккумуляторів становить  $\gamma$ . Температуру повітря в аккумуляторному приміщенні прийняти такою, що дорівнює  $T$ .

Варіанти завдань для розрахунку представлені в табл. 11.9.3.

Таблиця 11.9.3 – Варіанти завдань для розрахунку

№ вар.	$W_{тиж}$ , кВт·год	$U_n$ , В	$\varphi$ , град. пн.ш.	$T$ , °С	$C_{ном}$ , А·год	$U_{ном}$ , В	$\gamma$ , %
1	35	12	30	10	60	12	60
2	49	12	40	15	65	12	70
3	56	12	50	21	75	12	80
4	63	12	30	26	100	12	60
5	70	12	40	10	115	12	70
6	35	24	50	15	60	12	80
7	49	24	30	21	65	12	60
8	56	24	40	26	90	24	70
9	63	24	50	10	100	24	80
10	70	24	30	15	110	24	60
11	35	12	40	21	75	12	70
12	49	12	50	26	100	12	80
13	56	12	30	10	115	12	60
14	63	12	40	15	60	12	70
15	70	12	50	21	65	12	80
16	35	24	30	26	75	12	60
17	49	24	40	10	100	12	70
18	56	24	50	15	115	12	80
19	63	24	30	21	110	24	60
20	70	24	40	26	90	24	70

### Порядок виконання завдання

- 1) Виходячи з тижневої потреби об'єкта в енергії змінного струму  $W_{тиж}$  (табл. 11.9.3), за рівнянням (11.9.1) визначаємо середньодобову потребу в енергії постійного струму.
- 2) За виразом (11.9.2) визначаємо добову витрату ємності аккумуляторної батареї, використовуючи задане значення напруги системи по стороні постійного струму  $U_n$  (табл. 11.9.3).
- 3) За формулою (11.9.3) розраховуємо необхідну добову ємність батареї з врахуванням допустимої глибини розряду  $\gamma$  (табл. 11.9.3), попередньо

виразивши значення  $\gamma$  у відносних одиницях.

- 4) Використовуючи дані табл. 11.9.1, за відомим значенням температури  $T$  в приміщенні, де розташовані акумулятори (табл. 11.9.3), визначаємо поправочний температурний коефіцієнт  $\alpha$ . При використанні табл. 11.9.1 орієнтуємось на найближче до заданого за умовою задачі значення температури.
- 5) Розраховуємо ємність акумуляторної батареї з поправкою на температуру за виразом (11.9.4).
- 6) За табл. 11.9.2 визначаємо найбільшу можливу кількість «днів без Сонця»  $N_{bc}$ , для заданої широти розташування об'єкта  $\varphi$  (табл. 11.9.3).
- 7) За виразом (11.9.5) розраховуємо загальну ємність акумуляторної батареї  $C_{заг}$ .
- 8) Використовуючи відоме значення номінальної ємності акумулятора  $C_{ном}$  (табл. 11.9.3), знаходимо кількість паралельних гілок в акумуляторній батареї за виразом (11.9.6), округлюємо отримане значення в бік найближчого більшого цілого.
- 9) Використовуючи значення номінальної напруги акумулятора  $U_{ном}$  (табл. 11.9.3), за виразом (11.9.7) розраховуємо кількість послідовно з'єднаних акумуляторів у гілці, округлюємо отримане значення в бік найближчого більшого цілого.
- 10) Визначаємо загальну кількість акумуляторів в батареї за формулою (11.9.8).

### **Питання для самоконтролю**

1. *Перелічить основні складові автономних фотоелектричних систем та назвіть їх функції.*
2. *Назвіть та охарактеризуйте типи акумуляторних батарей, що застосовуються в автономних фотоелектричних системах.*
3. *З якою метою застосовують паралельне з'єднання акумуляторів у батарею?*

4. Які фактори впливають на ємність акумуляторної батареї?

5. Розкрийте термін «кількість днів без Сонця».

### 11.11 Завдання №10. Розрахунок площі геліополя фотоелектричної станції

Розрахунок мінімально необхідної кількості сонячних панелей, а отже, і мінімальної площі геліополя фотоелектричної системи, призначеної для покриття енергоспоживання об'єкта, базується на визначенні добової потреби у електричній енергії  $W_{\text{спож.}}$ , середньодобового надходження сонячної радіації до поверхні сонячних панелей  $\bar{H}_T$ , а також передбачає зарані відому номінальну потужність панелей  $P_{\text{ном}}^{CB}$ , які обрано для створення сонячної електростанції.

Добову потребу об'єкта в електричній енергії  $W_{\text{спож.}}$  визначають або безпосереднім вимірюванням, або розрахунком за формулою:

$$W_{\text{спож.}} = \sum_i P_i \cdot t_i, \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (11.10.1)$$

де  $i$  – порядковий номер проміжку часу впродовж доби;  $P_i$  – сумарна споживана потужність приладів для проміжку часу з номером  $i$ , кВт;  $t_i$  – проміжок часу, впродовж якого споживана електрична потужність становить  $P_i$ , год.

Враховуючи втрати в перетворюючих пристроях фотоелектричної системи (інвертори, контролери заряду, тощо), кількість виробленої сонячними панелями електричної енергії  $W_{\text{вир.}}$  має бути більшою за величину  $W_{\text{спож.}}$ :

$$W_{\text{вир.}} = k_1 W_{\text{спож.}}, \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (11.10.2)$$

де  $k_1$  — коефіцієнт, що враховує енергетичні втрати, величина якого з врахуванням типових значень ефективності сучасних перетворюючих

пристроїв може бути прийнята 1,2.

Енергія, яку протягом доби вироблятиме кожна сонячна панель номінальною потужністю  $P_{ном}^{CB}$  при середньодобовому надходженні сонячної радіації до її поверхні  $\bar{H}_T$ , визначається за формулою:

$$W_m = \frac{k_2 \cdot \bar{H}_T \cdot P_{ном}^{CB}}{1000}, \text{ кВт}\cdot\text{год}, \quad (11.10.3)$$

де  $k_2$ — коефіцієнт, який враховує похиле падіння променів на поверхню панелі протягом дня та втрату потужності за рахунок нагрівання, і дорівнює відповідно 0,7 для зимових та 0,5 для літніх місяців.

Значення  $1000 \text{ Вт/м}^2$  у знаменнику формули (11.10.3) являє собою інтенсивність сонячного опромінення в стандартних умовах тестування сонячних панелей STC.

Знаючи кількість енергії, виробленої протягом доби однією панеллю, та добову потребу у виробленні електричної енергії, розраховують мінімальну кількість сонячних панелей  $N_m$ , необхідну для забезпечення цієї добової потреби:

$$N_m = \frac{W_{вир.}}{W_m}, \text{ шт.} \quad (11.10.4)$$

Отримане в результаті розрахунку за формулою (11.10.4) значення округлюють до найближчого більшого цілого.

Загальна площа сонячних панелей  $S$ , що складають геліополе, визначається за формулою:

$$S = S_m \cdot N_m, \text{ м}^2, \quad (11.10.5)$$

де  $S_m$  – площа однієї панелі у відповідності до її технічного паспорту, м<sup>2</sup>.

**Завдання.** Розрахувати мінімально необхідну кількість сонячних панелей номінальною потужністю  $P_{НОМ}^{СБ}$  та площею  $S_m$  кожна, а також відповідну площу геліополя для фотоелектричної системи, призначеної для покриття добового енергоспоживання об'єкта  $W_{спож.}$ . Середньодобове надходження сонячної радіації до поверхні сонячних панелей становить  $\bar{H}_T$ .

Варіанти завдань для розрахунку представлені в табл. 11.10.1.

Таблиця 11.10.1 – Варіанти завдань для розрахунку

№ вар.	$W_{спож.}$ , кВт·год	$\bar{H}_T$ , кВт·год/м <sup>2</sup>	$P_{НОМ}^{СБ}$ , Вт	$S_m$ , м <sup>2</sup>	Сезон роботи	№ вар.	$W_{спож.}$ , кВт·год	$\bar{H}_T$ , кВт·год/м <sup>2</sup>	$P_{НОМ}^{СБ}$ , Вт	$S_m$ , м <sup>2</sup>	Сезон роботи
1	5	0,63	260	1,64	зима	11	5	5,98	290	1,64	літо
2	7	0,89	270	1,63	зима	12	7	5,16	300	1,63	літо
3	8	1,7	290	1,64	зима	13	8	0,63	260	1,64	зима
4	9	6,19	300	1,63	літо	14	9	0,89	270	1,63	зима
5	10	5,98	260	1,64	літо	15	10	1,7	290	1,64	зима
6	5	5,16	270	1,63	літо	16	5	6,19	300	1,63	літо
7	7	0,63	290	1,64	зима	17	7	5,98	260	1,64	літо
8	8	0,89	300	1,63	зима	18	8	5,16	270	1,63	літо
9	9	1,7	260	1,64	зима	19	9	0,63	290	1,64	зима
10	10	6,19	270	1,63	літо	20	10	0,89	300	1,63	зима

### Порядок виконання завдання

- 1) Виходячи з відомої добової потреби об'єкта в електричній енергії  $W_{спож.}$  (табл. 11.10.1), за рівнянням (11.10.2) визначаємо необхідну кількість енергії  $W_{вир.}$ , що має бути вироблена сонячними панелями за добу.
- 2) За виразом (11.10.3) визначаємо енергію, яку протягом доби вироблятиме сонячна панель номінальною потужністю  $P_{НОМ}^{СБ}$  при середньодобовому надходженні сонячної радіації до її поверхні  $\bar{H}_T$  (табл. 11.10.1). При розрахунку за формулою (11.10.3) номінальну потужність панелі

підставляємо у Вт, середньодобову сонячну радіацію – у кВт· год/м<sup>2</sup>. При виборі значення коефіцієнта  $k_2$  керуємось заданим у табл. 11.10.1 сезоном роботи фотоелектричної системи.

- 3) Користуючись виразом (11.10.4), розраховуємо мінімальну кількість сонячних панелей  $N_m$ , необхідну для забезпечення добової потреби об'єкта в електричній енергії. Отримане значення  $N_m$  округлюємо до найближчого більшого цілого числа.
- 4) За рівнянням (11.10.5) знаходимо площу геліополя, приймаючи до уваги площу однієї сонячної панелі  $S_m$ , вказану у табл. 11.10.1.

### **Питання для самоконтролю**

- 1. Перелічить типи фотоелектричних систем, вкажіть особливості їх застосування та будови.*
- 2. Які типи сонячних панелей найчастіше застосовуються при створенні дахових фотоелектричних станцій?*
- 3. Назвіть способи визначення середньодобового споживання електричної енергії об'єктом.*
- 4. Як залежить площа геліополя сонячної електростанції від добової потреби об'єкта у електричній енергії?*
- 5. Які параметри сонячних панелей вказують в їх технічному паспорті?*

## 12 ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

### 12.1 Методика проведення лабораторних робіт

Лабораторні роботи виконуються бригадним методом згідно з індивідуальним графіком виконання лабораторних робіт, який складається на початку семестру.

На лабораторному занятті, що триває 4 години, студент виконує одну лабораторну роботу у відповідності до індивідуального графіку виконання робіт. Виконання лабораторної роботи складається з трьох етапів: самостійної підготовки до виконання, саме виконання роботи та захисту.

1. *Підготовка* до виконання роботи (виконується студентом самостійно до початку лабораторного заняття) – 1 година:

- самостійне опрацювання теоретичної частини лабораторної роботи; опрацювання порядку виконання роботи та методики обробки результатів, техніки безпеки при виконанні лабораторної роботи (див. Додаток) – 0,5 години;

- письмова відповідь на контрольні питання, що містяться наприкінці відповідної лабораторної роботи – 0,5 години.

2. *Виконання* роботи (виконується студентом у лабораторії протягом перших 3 годин лабораторного заняття):

- отримання допуску до виконання роботи (студент має знати мету роботи, описати обладнання, порядок виконання роботи та обробки результатів вимірювань);

- виконання відповідних вимірювань на лабораторній установці;

- надання результатів вимірювань викладачу для перевірки грамотності запису та реалістичності значень виміряних величин;

- обробка результатів вимірювань (розрахунок відповідних фізичних величин за експериментальними результатами, побудова графіків, розрахунок похибок тощо);

- оформлення звіту (заповнення таблиць результатами розрахунків).

3. *Захист* роботи (здійснюється в лабораторії протягом останньої 1 години лабораторного заняття, або ж під час занять із захисту лабораторних робіт):

- студент повинен знати відповіді на контрольні питання, фізичні закони, що описують досліджуване явище; основні функціональні елементи та принцип дії лабораторної установки, що використовувалась у відповідній лабораторній роботі;
- студент повинен вміти безпосередньо вимірювати фізичні величини, що визначають відповідні параметри досліджуваного приладу, розраховувати значення параметрів, що характеризують його роботу, будувати графіки залежностей параметрів, аналізувати отримані залежності, проводити статистичну обробку результатів.

Бали за підготовку, виконання та захист лабораторних робіт є складовими загальної кількості балів поточного контролю. У разі виникнення заборгованості з виконання робіт лабораторного практикуму студент має право на відпрацювання відповідної роботи впродовж занять із захисту лабораторних робіт або під час проведення індивідуально-консультативних занять.

Студент, який наприкінці семестру має неліквідовані заборгованості з лабораторного практикуму, вважається таким, що не виконав програму дисципліни, отримує незадовільну підсумкову оцінку. Останнім терміном ліквідації заборгованості є час проведення консультації з підготовки до іспиту.

## **12.2 Лабораторна робота №1. Дослідження світлових вольт-амперних характеристик сонячного елемента на основі кремнію**

**Мета роботи:** Визначити ефективність кремнієвого сонячного елемента з аналізу світлової вольт-амперної характеристики.

### ***Короткі теоретичні відомості***

Розглянемо процеси, що відбуваються в р-п-переході при освітленні. При поглинанні фотонів з енергією  $h\nu \geq E_g$  відбувається генерація електронно-діркових пар, а потенційний бар'єр р-п-переходу просторово розділяє фотогенеровані дірки і електрони.

Нехай електронно-діркові пари виникають тільки в р-області на відстані



менше дифузійної довжини електронів від р-п-переходу, а зовнішнє електричне коло фотоелектричного перетворювача (ФЕП) складається з опору навантаження  $R_H$  (рис. 12.1.1).

При  $R_H = 0$  має місце режим короткого замикання, а при  $R_H = \infty$ , тобто при розімкнутому колі – режим холостого ходу. Зонні діаграми р-п-переходу в цих режимах зображені на рис. 12.1.1, а, б.

При роботі в режимі короткого замикання через р-п-перехід і зовнішній провідник тече струм  $I_{кз}$ . Фотоелектрони, що утворилися в безпосередній близькості від області об'ємного заряду (ООЗ), захоплюються електричним полем р-п-переходу і потрапляють у п-область, де виникає спрямований рух електронів до тильного контакту, перетікання їх в зовнішнє коло і в контакт до р-області. На границі контакту до р-області відбувається рекомбінація електронів, що сюди підійшли, з фотогенерованими дірками. Між п- і р-областями встановлюється нульова різниця потенціалів (рис. 12.1.1, а).

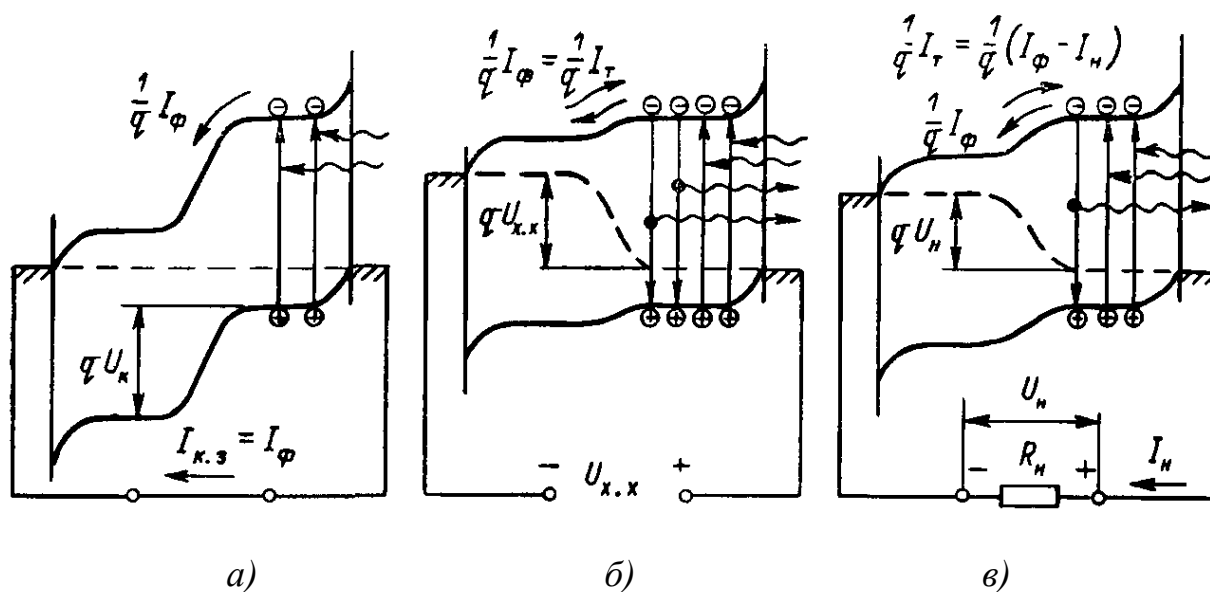


Рисунок 12.1.1 – Зонні енергетичні діаграми р-п-переходу при опроміненні: а – режим короткого замикання; б – режим холостого ходу; в – робота на опір навантаження

При розімкнутому зовнішньому колі р-п-переходу (рис. 12.1.1, б)

фотоелектрони, потрапляючи в n-область, накопичуються в ній і заряджають її негативно. Надлишкові дірки, що залишаються в р-області, заряджають р-область позитивно. Різниця потенціалів, що виникає при цьому, є напругою холостого ходу  $U_{xx}$ , полярність якої відповідає прямому зсувові р-n-переходу, а фотострум  $I_\phi$  компенсується струмом прямозміщеного р-n-переходу  $I_D$ .

Якщо електроди сонячного елемента замкнуті на зовнішнє навантаження  $R_H$  (рис. 12.1.1, в), то напруга між ними буде меншою за  $U_{xx}$ , і тоді фотострум  $I_\phi$  не буде компенсуватися струмом прямозміщеного р-n-переходу  $I_D$ , як у випадку режиму холостого ходу. В колі виникає результуючий електричний струм:

$$I = I_\phi - I_D = I_\phi - I_0 \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (12.1.1)$$

де  $I_0$  – зворотний струм насичення р-n-переходу;  $e$  – елементарний заряд;  $k$  – постійна Больцмана;  $T$  – абсолютна температура;  $I, U$  – струм в колі і напруга на навантаженні відповідно.

За експериментально знятими світловими вольт-амперними характеристиками фотоелектричних перетворювачів можна обрати оптимальний режим роботи сонячного елемента, тобто оптимальний опір навантаження, при якому досягатиметься максимальна корисна електрична потужність. Оптимальному режиму роботи сонячного елемента відповідає найбільша площа прямокутника з вершиною на світловій вольт-амперній характеристиці (рис. 12.1.2).

Максимальна електрична потужність  $P_{\max}$  може бути визначена з наступного рівняння:

$$P_{\max} = FF \cdot I_{K3} \cdot U_{xx}, \quad (12.1.2)$$

де величина  $FF$  – фактор заповнення вольт-амперної характеристики, який

показує ступінь наближення форми вольт-амперної характеристики до прямокутного. У сучасних кремнієвих сонячних елементів фактор заповнення наближається до 0,8.

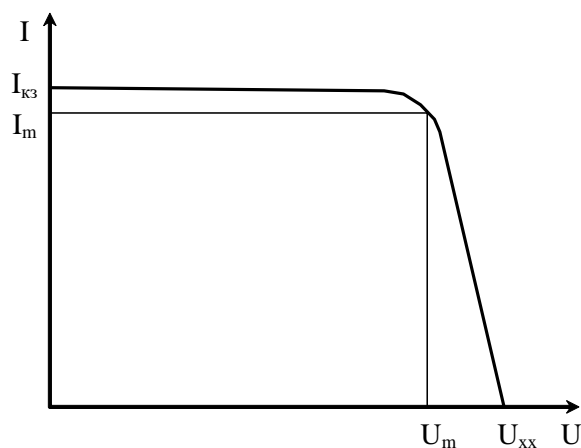


Рисунок 12.1.2 – Світлова вольт-амперна характеристика ФЕП

Коефіцієнт корисної дії сонячного елемента – це відношення максимальної електричної потужності, яку можна одержати від ФЕП за даного рівня освітленості, до повної потужності променистого потоку, що падає на робочу поверхню сонячного елемента:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_0} = \frac{FF \cdot I_{кз} \cdot U_{хх}}{P_0} = \frac{I_m \cdot U_m}{P_0}, \quad (12.1.3)$$

де  $I_m$  – струм у точці максимальної потужності;  $U_m$  – напруга в точці максимальної потужності (рис. 12.1.2);  $P_0$  – повна потужність випромінювання, що падає на поверхню сонячного елемента площею  $S$  ( $P_0 = p_0 S$ , де  $p_0$  – густина потоку випромінювання від джерела світла).

Слід зазначити, що коефіцієнт корисної дії сильно залежить від спектрального складу світла, що використовується під час вимірювань, у зв'язку з чим відрізняються значення ефективності, отримані при вимірюваннях під вольфрамковою лампою і при сонячному висвітленні. Коефіцієнт корисної

дії також сильно залежить від температури сонячного елемента та інтенсивності випромінювання.

Блок-схема установки для зняття світлових вольт-амперних характеристик ФЕП представлена на рис. 12.1.3.

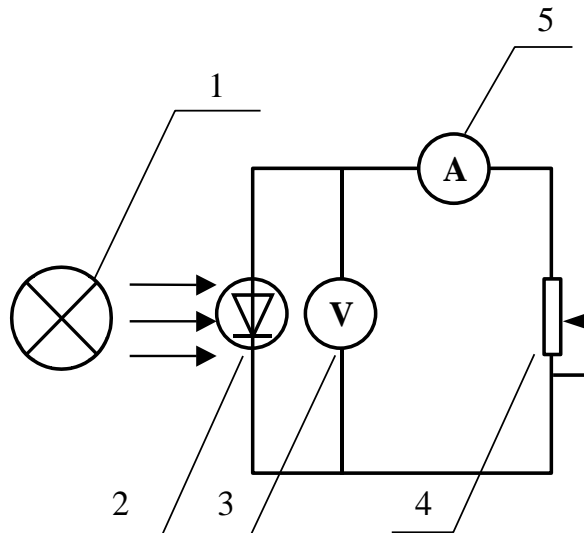


Рисунок 12.1.3 – Блок-схема установки для зняття світлових характеристик

В цій установці в якості джерела випромінювання використовується лампа розжарення 2 потужністю 60 Вт. Паралельно зразку ФЕП 1 підключено цифровий вольтметр 3. Для зміни опору навантаження в електричному колі використовується магазин опорів 4 типу МОР-58. Цифровий міліамперметр 5 фіксує струм у колі.

### ***Порядок виконання роботи***

1. Зібрати вимірювальну схему, зображену на рис. 12.1.3.
2. Подати напругу до джерела світла, увімкнувши блок живлення лампи.
3. Орієнтувати сонячний елемент на максимальний світловий потік, орієнтуючись на показання міліамперметра при  $R_H = 0$ .
4. Поступово збільшуючи опір навантаження  $R_H$ , зробити відлік показань вольтметра і мікроамперметра. Результати занести до табл. 12.1.1.

5. За отриманими даними побудувати світлову вольт-амперну характеристику сонячного елемента, відкладаючи по осі абсцис значення напруги у вольтах, а по осі ординат – значення сили струму в міліамперах.
6. За формулою  $P = I \cdot U$  розрахувати потужність, яка виділяється на навантаженні при кожному значенні опору  $R_H$ .
7. Побудувати залежність потужності від напруги на сонячному елементі  $P = P(U)$ , і знайти максимальне значення потужності  $P$ .
8. Розрахувати величину фактора заповнення  $FF$  за формулою (12.1.2).
9. За формулою (12.1.3) розрахувати коефіцієнт корисної дії сонячного елемента.
10. Повторити пп. 1-8 для інших зразків сонячних елементів.

Таблиця 12.1.1 – Результати вимірювань

Зразок № ____				Зразок № ____				Зразок № ____			
$R_H$ , Ом	$U$ , В	$I$ , мА	$P$ , мВт	$R_H$ , Ом	$U$ , В	$I$ , мА	$P$ , мВт	$R_H$ , Ом	$U$ , В	$I$ , мА	$P$ , мВт
0				0				0			
0,1				0,1				0,1			
...				...				...			

### **Контрольні питання**

1. Пояснити, як змінюється структура енергетичних зон при освітленні р-n-переходу.
2. Назвіть види фотоефекту. В чому полягає фізична сутність кожного з них?
3. Поясніть принцип дії сонячного елемента.
4. Які параметри сонячного елемента можна визначити із його світлової вольт-амперної характеристики?
5. Дайте визначення фактора заповнення навантажувальної характеристики.
6. Від яких зовнішніх факторів залежать параметри сонячних елементів?

## 12.3 Лабораторна робота №2. Визначення потужності світлового потоку за тестовим сонячним елементом

**Мета роботи:** Оволодіти методикою визначення потужності падаючого світлового потоку за ефективністю тестового сонячного елемента і побудувати калібрувальну залежність.

### **Короткі теоретичні відомості**

При вимірюванні параметрів сонячних елементів, яке базується на аналізі світлової вольт-амперної характеристики, одним з найважливіших моментів є знання *інтегральної потужності падаючого випромінювання*.

Одним з найбільш розповсюджених методів визначення інтегральної потужності падаючого випромінювання є використання тестових елементів з відомою *калібрувальною залежністю – залежністю струму короткого замикання від інтенсивності падаючого світлового потоку*.

У випадку відсутності такої калібрувальної залежності, визначення потужності падаючого світлового потоку у вузькому діапазоні його інтенсивностей здійснюють на основі *аналізу світлової вольт-амперної характеристики тестового сонячного елемента за відомою його ефективністю  $\eta$* .

Сутність даної методики полягає в наступному. Вимірюють світлову (навантажувальну) вольт-амперну характеристику  $I=I(U)$  сонячного елемента при шуканій потужності падаючого світлового потоку  $P_0$ . За вимірною навантажувальною характеристикою будують графік залежності електричної потужності  $P$  від напруги на сонячному елементі  $U$  і знаходять максимальну електричну потужність  $P_{max}$ , яка виділяється на опорі навантаження. Розрахунок інтегральної потужності випромінювання, що надходить на фотоприймальну поверхню сонячного елемента площею  $S$ , здійснюють за виразом:

$$p_0 = P_{max} / (\eta \cdot S), \text{ мВт/см}^2 \quad (12.2.1)$$

Оскільки  $P_{max} = I_{кз} U_{хх} FF$ , тобто  $P_{max} \sim I_{кз}$ , то з метою експрес контролю потужності падаючого світлового потоку варто побудувати калібровану залежність у вигляді залежності струму короткого замикання  $I_{кз}$  даного тестового сонячного елемента від густини потужності світлового потоку  $p_0$ . Слід зазначити, що використання виразу (12.2.1) є коректним тільки в обмеженому діапазоні потужностей падаючого світлового потоку, коли ефективність  $\eta$  може бути прийнята незалежною від  $p_0$ .

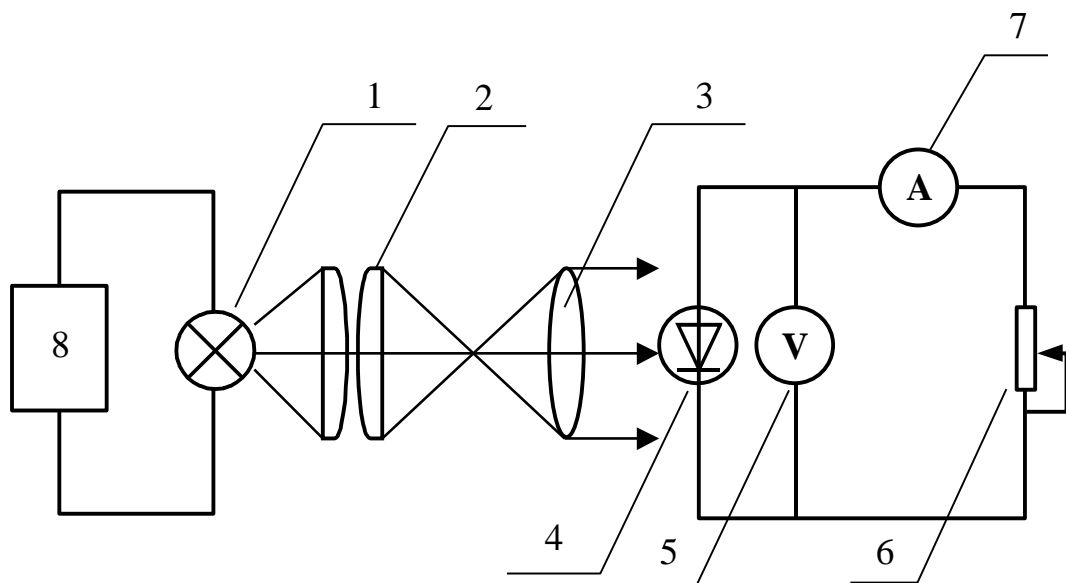


Рисунок 12.2.1 – Схема установки для виміру навантажувальних характеристик на імітаторі сонячного випромінювання

На рис. 12.2.1 представлена схема установки для вимірювання навантажувальних характеристик сонячних елементів. У якості джерела випромінювання 1, густину потоку від якого потрібно визначити, використовується газонаповнена лампа типу КГМ. Випромінювання від джерела 1 через конденсор 2 і лінзу 3 направляється на тестовий сонячний елемент 4, ефективність якого є відомою. Паралельно сонячному елементу підключається вольтметр 5. Послідовно в коло сонячного елемента підключають міліамперметр 7. Змінюючи опір навантаження в колі зразка за

допомогою магазину опорів 6, здійснюють вимір світлової вольт-амперної характеристики. Джерело випромінювання підключене до регульованого блоку живлення 8.

### ***Порядок виконання роботи***

1. Зібрати електричну схему вимірювальної установки, як показано на рис. 12.2.1.
2. Ввімкнути блок живлення лампи ЛІПС-35 тумблером «Мережа» і встановити струм лампи 8 А (струм лампи контролювати за амперметром, який розташовано на панелі блоку живлення).
3. Помістити тестовий сонячний елемент на предметний столик установки для вимірів навантажувальних характеристик і зорієнтувати його на максимальний світловий потік, досягаючи максимального значення струму сонячного елемента.
4. Зафіксувати показання міліамперметра при  $R_H = 0$ , тобто струм короткого замикання сонячного елемента.
5. Поступово збільшуючи опір навантаження  $R_H$ , зробити відлік показань вольтметра і міліамперметра. Результати вимірів занести до табл. 12.2.1.
6. За допомогою регулятора на панелі блоку живлення ЛІПС-35 встановити струм у колі лампи 6 А. При заданому струмі лампи зробити виміри, які зазначено в пп. 4 - 5.
7. Встановити струм лампи 4 А и знову зробити виміри, зазначені в пп. 4 - 5. Результати вимірів занести до табл. 12.2.1.
8. Для кожної серії вимірів, які виконано при фіксованому струмі лампи, побудувати залежність потужності  $P$ , яка виділяється на опорі навантаження, від напруги  $U$  і знайти максимальну потужність  $P_{max}$ .
9. Визначити площу сонячного елемента  $S$  і за відомим значенням його ефективності, користуючись виразом (12.2.1), розрахувати густину потужності падаючого світлового потоку  $p_0$  для кожного струму лампи. Результати вимірів і обчислень занести до табл. 12.2.2.



10. Зіставити отримані значення густини потужності та величини струмів короткого замикання з табл. 12.2.1 та побудувати калібрувальну залежність  $p_0 = p_0(I_{кз})$ .

Таблиця 12.2.1 – Результати вимірювань світлових вольт-амперних характеристик тестового сонячного елемента

Струм лампи А			Струм лампи А			Струм лампи А		
$I, \text{мА}$	$U, \text{В}$	$P=IU, \text{мВт}$	$I, \text{мА}$	$U, \text{В}$	$P=IU, \text{мВт}$	$I, \text{мА}$	$U, \text{В}$	$P=IU, \text{мВт}$
$I_{кз} =$	0	0	$I_{кз} =$	0	0	$I_{кз} =$	0	0
	0,05			0,05			0,05	
...	...	...	...	...	...	...	...	...
<b>0</b>	$U_{xx} =$	<b>0</b>	<b>0</b>	$U_{xx} =$	<b>0</b>	<b>0</b>	$U_{xx} =$	<b>0</b>

Таблиця 12.2.2 – Дані для побудови калібрувальної залежності

Параметри тестового сонячного елемента		Струм лампи А			Струм лампи А			Струм лампи А		
$S, \text{см}^2$	$\eta, \%$	$P_{max}, \text{мВт}$	$p_0, \text{мВт/см}^2$	$I_{кз}, \text{мА}$	$P_{max}, \text{мВт}$	$p_0, \text{мВт/см}^2$	$I_{кз}, \text{мА}$	$P_{max}, \text{мВт}$	$p_0, \text{мВт/см}^2$	$I_{кз}, \text{мА}$

### Контрольні питання

1. Дайте визначення інтегральної потужності сонячного випромінювання.
2. Назвіть відомі вам методики визначення потужності сонячного випромінювання.
3. Що являє собою калібрувальна залежність? Який характер вона має?
4. Дайте визначення світлового потоку, густини потоку, освітленості та інтенсивності.
5. Назвіть особливості спектрального розподілу наземного сонячного випромінювання в порівнянні з позаатмосферним.
6. Опишіть типову будову імітатора сонячного випромінювання.

## 12.4 Лабораторна робота №3. Визначення контактної опору сонячного елемента

*Мета роботи:* Оволодіти методикою визначення контактної опору сонячного елемента.

### *Короткі теоретичні відомості*

В однокспоненційній моделі темнова вольт-амперна характеристика сонячного елемента з нескінченно великим шунтуючим і кінцевим послідовним внутрішнім опором  $R_s$  може бути представлена в наступному вигляді:

$$I = I_o \left[ \exp\left(\frac{e(U + IR_s)}{AkT}\right) - 1 \right], \quad (12.3.1)$$

де  $I_o$  – зворотний струм насичення діода;  $A$  – коефіцієнт ідеальності вольт-амперної характеристики (для кремнієвих кристалічних сонячних елементів  $A = 1 \div 2$ );  $I$  – струм у колі сонячного елемента;  $U$  – напруга на клеммах сонячного елемента.

Чим меншим є внутрішній послідовний опір сонячного елемента, тим меншим є падіння напруги  $IR_s$  на ньому і, відповідно, тим ефективнішим є сонячний елемент. Отже, мінімізація величини  $R_s$  є однією з головних задач технології фотоелектричних перетворювачів.

*Основними компонентами послідовного опору  $R_s$  є наступні:*

- шаровий опір фронтальної області р-п переходу  $R_c$ , який долається носіями заряду при русі уздовж фронтального шару до електрода контактної сітки;
- контактний опір  $R_k$  – опір перехідної області між напівпровідниковим матеріалом фронтальної області і металевим контактом;
- опір металевої доріжки контактної сітки  $R_m$ , тобто опір, який долається носієм заряду при русі по металевих доріжках контактної сітки до виходу в

зовнішнє коло;

- опір базової області сонячного елемента;
- опір перехідної області метал-напівпровідник на тильному контакті.

Оскільки в сучасних сонячних елементах товщина базової області доволі незначна (менше 0,3 мм), а площа тильного контакту істотно більша за площу фронтального контакту, то опори базової області і перехідної області метал-напівпровідник на тильному контакті є досить малими і не роблять вирішального внеску у внутрішній послідовний опір. Тому для внутрішнього послідовного опору можна записати наступний вираз:

$$R_s \cong R_c + R_k + R_M. \quad (12.3.2)$$

У випадку, якщо для створення контактної сітки використовуються тонкі плівки матеріалів з низьким питомим опором (алюміній, срібло, золото), або товщину доріжок контактної сітки збільшують, наприклад, шляхом лудіння, то у виразі (12.3.2) можна знехтувати також і величиною опору  $R_M$ . Тоді:

$$R_s \approx R_c + R_k. \quad (12.3.3)$$

Для вимірювання контактного опору  $R_k$  можна скористатися тим, що при високих значеннях напруги прямого зсуву р-п-переходу, яка подається на сонячний елемент від зовнішнього джерела, струм перестає розтікатися по фронтальному шару і переважно перетинає р-п-перехід безпосередньо під контактними доріжками, тобто  $R_c \rightarrow 0$ . У цьому випадку внутрішній послідовний опір  $R_s \approx R_k$  і справедлива найпростіша еквівалентна схема сонячного елемента, представлена на рис. 12.3.1.

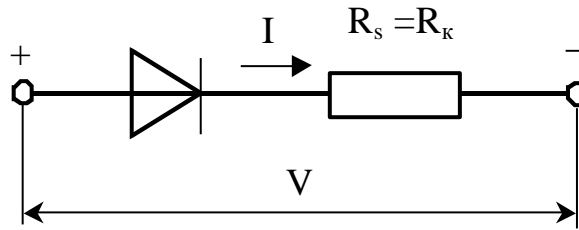


Рисунок 12.3.1 – Еквівалентна схема неосвітленого сонячного елемента з нескінченно великим шунтуючим опором при високих прямих зсувах р-n-переходу

Визначення контактного опору сонячного елемента здійснюють при великих прямих зсувах, коли пряма гілка темної вольт-амперної характеристики виходить на пряму лінію. Котангенс кута нахилу цієї прямої ділянки в координатах «струм – напруга» дорівнює  $R_k$ . Вимірювальна схема, яку реалізують для визначення контактної опору, представлена на рис. 12.3.2.

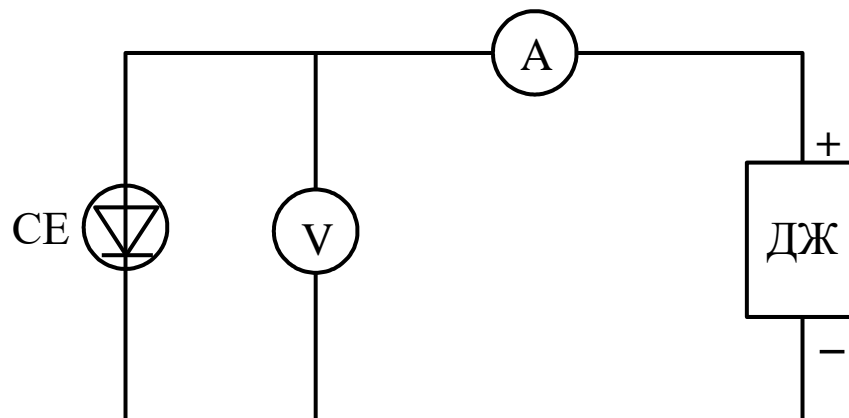


Рисунок 12.3.2 – Схема установки для зняття прямої гілки темної вольт-амперної характеристики сонячного елемента

### ***Порядок виконання роботи***

1. Зібрати вимірювальну схему, як показано на рис. 12.3.2, дотримуючись полярності напруги, яка подається на зразок.
2. За допомогою перемикачів установити датчик напруги на джерелі живлення

- в положення «0,00», увімкнути джерело живлення тумблером «Мережа»
3. За допомогою щільної тканини або пластикового футляру затінити досліджуваний зразок, щоб уникнути потрапляння світла.
  4. Змінюючи напругу на досліджуваному зразку за допомогою датчика на джерелі живлення в діапазоні від 0 до 1,5 В с кроком 0,05 В, здійснити запис показань амперметра та вольтметра. Результати вимірювань занести до табл. 12.3.1.
  5. Повторити пп. 1-4 для інших наданих зразків сонячних елементів.
  6. За даними табл. 12.3.1 побудувати прямі гілки темнових вольт-амперних характеристик у вигляді залежностей  $I=I(U)$ ,
  7. Обрати діапазон напруг  $\Delta U$ , що відповідає лінійним ділянкам вольт-амперних характеристик при  $U > 1\text{В}$ , та визначити відповідні їм діапазони сили струмів  $\Delta I$ .
  8. Визначити контактний опір, як котангенс кута нахилу лінійних ділянок вольт-амперних характеристик  $R_k = \Delta U / \Delta I$ . Отримані значення занести до табл. 12.3.1.

Таблиця 12.3.1 – Пряма гілка темної вольт-амперної характеристики сонячних елементів

Зразок №__		Зразок №__		Зразок №__	
$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$
0	0	0	0	0	0
0,05		0,05		0,05	
...	...	...	...	...	...
$R_k = \text{_____ Ом}$		$R_k = \text{_____ Ом}$		$R_k = \text{_____ Ом}$	

### Контрольні питання

1. Як впливає величина внутрішнього послідовного опору на параметри сонячних елементів?
2. Назвіть основні компоненти внутрішнього послідовного опору сонячних

елементів.

3. Які способи зменшення величини внутрішнього послідовного опору сонячних елементів вам відомі?
4. Назвіть фактори, що впливають на величину контактного опору.
5. Опишіть фізичні процеси, що відбуваються в напівпровідниковій структурі з р-п-переходом в режимі прямого зміщення.
6. Поясніть сутність застосованої в лабораторній роботі методики визначення контактного опору.

### **12.5 Лабораторна робота №4. Оволодіння методикою оцінки послідовного та шунтуючого опорів сонячного елемента за прямою та зворотною гілками темної вольтамперної характеристики**

**Мета роботи:** Оволодіти методикою експрес-оцінки послідовного і шунтуючого опорів з аналізу прямої і зворотної гілки темної вольт-амперної характеристики сонячного елемента.

#### ***Короткі теоретичні відомості***

На даний час розроблено ряд доволі точних методик, що дозволяють за експериментально вимірними темновим вольт-амперним характеристикам визначити значення внутрішніх послідовного  $R_s$  і шунтуючого  $R_{sh}$  опорів сонячного елемента. Однак такі методики вимагають, як правило, великого обсягу обчислювальної роботи і, отже, великих витрат часу.

В умовах промислового виробництва важливо мати оперативну інформацію про параметри сонячних елементів, що дозволяє виявити причини недостатньо високої ефективності продукції, що випускається. У зв'язку з цим доцільним є використання експрес-методик визначення параметрів сонячних елементів.

Найбільш широко застосовується методика оцінки  $R_s$  і  $R_{sh}$ , яка базується

на аналізі прямої і зворотної гілки темної вольт-амперної характеристики сонячного елемента.

На рис. 12.4.1 зображено типову темнову вольт-амперну характеристику сонячного елемента. Як видно з рисунка, частина прямої гілки вольт-амперної характеристики у I квадранті являє собою приблизно пряму лінію. Нахил цієї прямої ділянки до осі струмів характеризує внутрішній послідовний опір сонячного елемента:

$$R_s = \Delta U_{np} / \Delta I_{np}. \quad (12.4.1)$$

Частина ж темної вольт-амперної характеристики в III квадранті, яка відповідає зворотній гілці, також являє собою пряму лінію, за нахилом якої визначають шунтуючий опір  $R_{sh}$ :

$$R_{sh} = \Delta U_{36} / \Delta I_{36}. \quad (12.4.2)$$

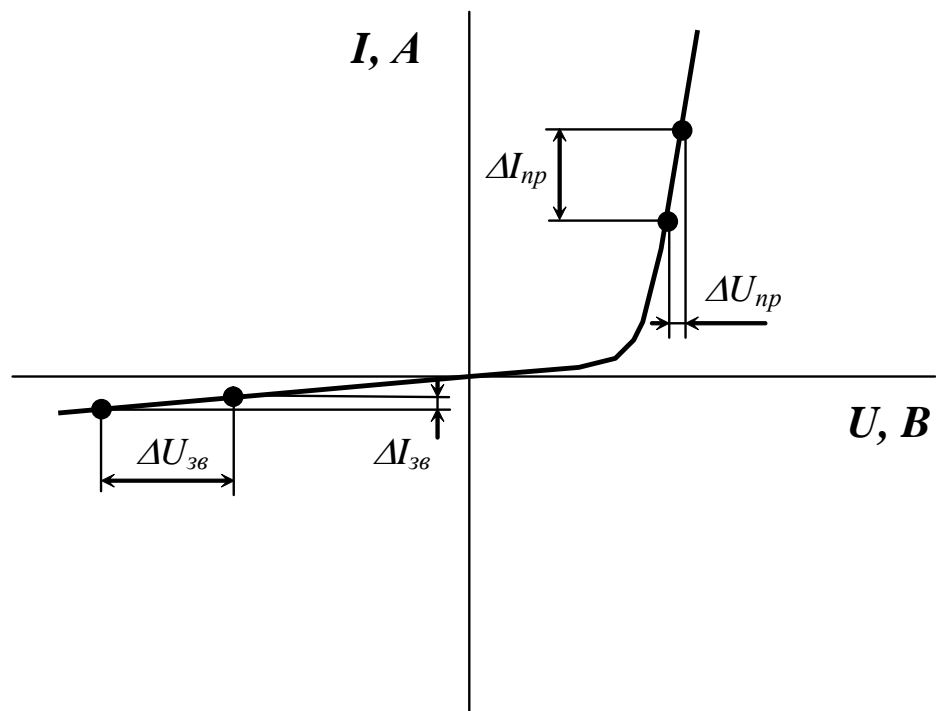


Рисунок 12.4.1 – Темнова вольт-амперна характеристика сонячного елемента

Для практичної реалізації цієї методики використовують вимірювальну установку, блок-схема якої представлена на рис. 12.4.2. Установка складається з досліджуваного зразка, стабілізованого джерела регульованої напруги (ДЖ), перемикача ( $K$ ), що дозволяє змінювати полярність поданої на сонячний елемент напруги, амперметра ( $A$ ) та вольтметра ( $V$ ). Дослідження передбачає затінення поверхні сонячного елемента задля уникнення потрапляння світла.

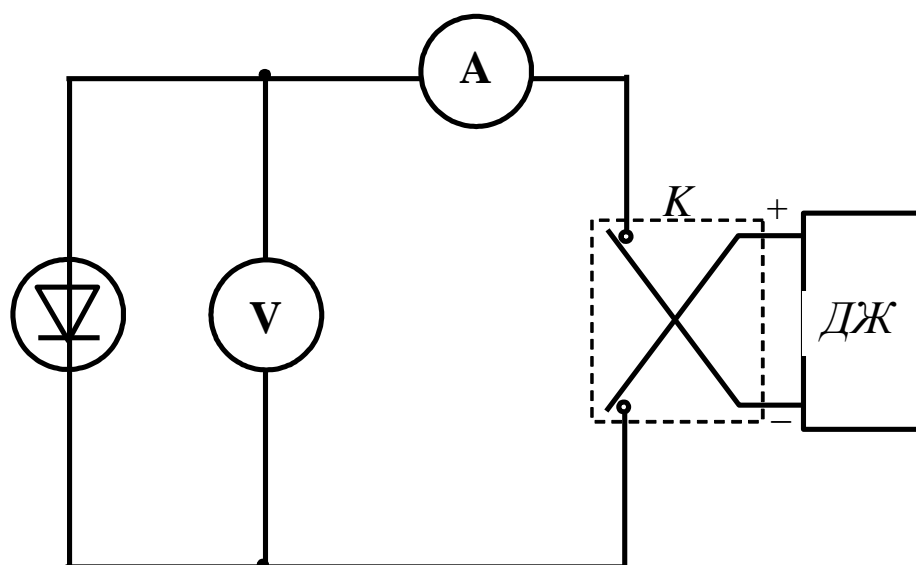


Рисунок 12.4.2 – Блок-схема установки для зняття темнових вольт-амперних характеристик сонячного елемента (положення перемикача  $K$  на рисунку відповідає зворотному зміщенню р-п- переходу)

### **Порядок виконання роботи**

1. Зібрати вимірювальну схему, як показано на рис. 12.4.2, підключивши затінений зразок сонячного елемента у режим прямого зміщення.
2. Встановити регулятор напруги на джерелі живлення в положення «0», після чого ввімкнути джерело живлення тумблером «Мережа».
3. Зняти пряму гілку темної вольт-амперної характеристики сонячного елемента, змінюючи за допомогою джерела живлення напругу на досліджуваному зразку в діапазоні від 0 до 1 В з кроком 0,05 В та фіксуючи



- відповідні показання амперметра та вольтметра. Результати вимірювання прямої гілки вольт-амперної характеристики занести до табл. 12.4.1.
4. Встановити регулятор напруги на джерелі живлення в положення «0».
  5. За допомогою комутатора  $K$  (рис. 12.4.2) змінити полярність напруги на досліджуваному зразку на таку, що відповідає зворотному зміщенню р-n-переходу.
  6. Змінюючи напругу зворотного зміщення в межах від 0 до 2 В з кроком 0,05 В, здійснити запис відповідних показань амперметра та вольтметра, Результати вимірювань зворотної гілки вольт-амперної характеристики занести до табл. 12.4.1.
  7. За даними табл. 12.4.1 на одній координатній площині побудувати графіки прямої та зворотної гілок у вигляді залежностей  $I=I(U)$ .
  8. Взавши пару точок на лінійній ділянці графіку прямої гілки темної вольт-амперної характеристики (рис. 12.4.1), визначити за виразом (12.4.1) послідовний опір сонячного елемента  $R_s$ .
  9. За лінійною ділянкою зворотної гілки темної вольт-амперної характеристики визначити шунтуючий опір сонячного елемента  $R_{sh}$ , користуючись виразом (12.4.2).
  10. Значення послідовного та шунтуючого опорів, що були отримані, занести до табл. 12.4.2.
  11. Повторити пп. 2 – 10 для інших наданих зразків сонячних елементів.
  12. Порівняти величину послідовного та шунтуючого опорів.

Таблиця 12.4.1 – Результати вимірювань прямої та зворотної гілок темної вольт-амперної характеристики сонячних елементів

Зразок № _____				Зразок № _____			
$U_{np}, \text{В}$	$I_{np}, \text{А}$	$-U_{зв}, \text{В}$	$-I_{зв}, \text{А}$	$U_{np}, \text{В}$	$I_{np}, \text{А}$	$-U_{зв}, \text{В}$	$-I_{зв}, \text{А}$
0		0		0		0	
0,05		0,05		0,05		0,05	
...		...		...		...	

Таблиця 12.4.2 – Значення послідовного та шунтуючого опорів

	$R_s$ , Ом	$R_{sh}$ , Ом
Зразок № _____		
Зразок № _____		
Зразок № _____		

### **Контрольні питання**

1. *Опишіть фізичні процеси, що відбуваються в p-n-перході при зворотному зміщенні.*
2. *Чому нахил прямої гілки темної вольт-амперної характеристики обумовлюється значенням внутрішнього послідовного опору сонячного елемента, а зворотної – шунтуючим опором?*
3. *Як впливає значення внутрішнього послідовного опору на форму вольт-амперної характеристики сонячного елемента?*
4. *Опишіть вплив шунтуючого опору на вольт-амперну характеристику сонячного елемента.*
5. *Як впливають величини послідовного та шунтуючого опорів на ефективність перетворення енергії сонячного випромінювання фотоелектричними перетворювачами?*
6. *Які фізичні причини обумовлюють шунтуючий опір сонячних елементів?*

## **12.6 Лабораторна робота №5. Дослідження температурної залежності світлових вольт-амперних характеристик ФЕП**

**Мета роботи:** Експериментально дослідити вплив температури на світлову вольт-амперну характеристику та ефективність кремнієвого сонячного елемента.

### *Короткі теоретичні відомості*

Світлова вольт-амперна характеристика реального сонячного елемента може бути описана рівнянням, яке у відповідності до однократно експоненційної моделі фотоелектричного перетворювача записується у наступному вигляді:

$$I = I_{\phi} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{e(U + IR_s)}{AkT}\right) - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}}, \quad (12.5.1)$$

де  $I_{\phi}$  - величина фотоструму;  $I_0$  - зворотний струм насичення р-п-переходу;  $e$  - елементарний заряд;  $k$  - постійна Больцмана;  $T$  - абсолютна температура;  $R_s$  - внутрішній послідовний опір сонячного елемента;  $R_{sh}$  - шунтуючий опір;  $I, U$  - струм в колі і напруга на навантаженні відповідно.

Як видно з рівняння (12.5.1) температура сонячного елемента  $T$  безпосередньо впливає на вольт-амперну характеристику фотоелектричного перетворювача. Втім, ця залежність є складнішою, аніж та, що дається цим рівнянням. Це, головним чином, пов'язано з температурною залежністю ширини забороненої зони напівпровідника та висоти потенційного бар'єру р-п-переходу.

Так, з підвищенням температури відбувається зменшення ширини забороненої зони напівпровідника, і висота потенційного бар'єру між р- та п-областями зменшується. Це призводить до зменшення напруги, що генерується сонячним елементом, та збільшення зворотного струму насичення р-п-переходу  $I_0$ . Зменшення ширини забороненої зони обумовлює зсув межі fotocутливості перетворювача в довгохвильову ділянку сонячного спектру, що збільшує величину фотоструму – струм, що генерується сонячним елементом, зростає.

Внутрішні послідовний та шунтуючий опори фотоелектричного перетворювача також є залежними від температури. З температурою змінюється як електропровідність напівпровідникових матеріалів, так і металів, що входять до складу сонячного елемента, а отже, змінюється величина внутрішнього послідовного опору. Більше того, інтенсивність протікання

процесів, пов'язаних з надбар'єрним витоком струму, визначається, зокрема, температурою структури, що обумовлює температурну залежність шунтуючого опору.

Спільна дія всіх цих факторів призводить до суттєвої залежності світлової вольт-амперної характеристики, а значить і основних параметрів сонячного елемента, від температури. Як вказано вище, з підвищенням температури напруга, що генерується фотоелектричним перетворювачем, зменшується, а струм – збільшується. Втім, відсоток, на який зменшується напруга при підвищенні температури на кожен градус, суттєво перевищує відсоток збільшення струму. Як результат, генерована сонячним елементом електрична потужність зменшується за законом:

$$P_{mpp}(T) = P_{mpp}(T_m) \cdot [1 + \alpha_p \cdot (T - T_m)] \quad , \quad (12.5.2)$$

де  $P_{mpp}(T_m)$  – максимальна електрична потужність при початковій температурі  $T_m$ ;  $\alpha_p$  - температурний коефіцієнт потужності, який є негативною величиною.

Ефективність сонячного елемента при фіксованій його температурі  $T$  може бути знайдена з аналізу світлової вольт-амперної характеристики сонячного елемента за виразом:

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{p_0 S} \quad , \quad (12.5.3)$$

де  $p_0$  – густина потужності випромінювання від джерела світла;  $S$  - площа приймальної поверхні сонячного елемента.

З врахуванням рівняння (12.5.2) вираз для температурної залежності ефективності сонячного елемента запишеться у вигляді:

$$\eta(T) = \frac{P_{mpp}(T)}{p_0 S} = \eta(T_m) \cdot [1 + \alpha_\eta (T - T_m)] \quad , \quad (12.5.4)$$

де  $\eta(T_m)$  – ефективність сонячного елемента при початковій температурі  $T_m$ ;  $\alpha_\eta$  – температурний коефіцієнт ефективності, який є негативною величиною.

З рівняння (12.5.4), знаючи ефективності фотоелектричного перетворювача  $\eta(T)$  та  $\eta(T_m)$  при температурах  $T$  та  $T_m$ , відповідно, можна оцінити температурний коефіцієнт ефективності:

$$\alpha_\eta = \frac{\eta(T) - \eta(T_m)}{\eta(T_m) \cdot (T - T_m)}. \quad (12.5.5)$$

Зменшення потужності, а отже, й ефективності, з температурою визначається, головним чином, видом напівпровідника, з якого виготовлено сонячний елемент. Так, у фотоелектричних перетворювачів на основі кристалічного кремнію номінальна потужність падає з кожним градусом підвищення температури на 0,40 - 0,45%. У той же час, перетворювачі з телуриду кадмію втрачають при цьому всього 0,25%.

### ***Порядок виконання роботи***

1. Зібрати схему для дослідження світлових вольт-амперних характеристик сонячного елемента (рис. 12.1.3).
2. Подати напругу до джерела світла, увімкнувши блок живлення лампи.
3. Встановити на магазині опорів значення  $R_H = 0$ .
4. Орієнтувати сонячний елемент на максимальний світловий потік, досягнувши максимальних показань на міліамперметрі.
5. Розмістивши термопарний датчик на поверхні сонячного елемента, виміряти температуру досліджуваного зразку, занести отримане значення температури до табл. 12.5.1.
6. Поступово збільшуючи опір навантаження  $R_H$ , зробити відлік показань вольтметра та міліамперметра. Результати вимірів занести до табл. 12.5.1.
7. Встановити опір навантаження сонячного елемента  $R_H = 0$ .

8. Увімкнути нагрівальний елемент. Контролюючи температуру зразка термопарним датчиком, здійснити нагрівання досліджуваного сонячного елемента до температури  $40^{\circ}\text{C}$ .
9. Повторити вимірювання світлової вольт-амперної у відповідності до п. 6, занести результати до табл. 12.5.1.
10. Здійснити нагрівання досліджуваного сонячного елемента до температури  $50^{\circ}\text{C}$  та зняти його світлову вольт-амперну характеристику, заносючи дані до табл. 12.5.1.
11. За даними табл. 12.5.1 побудувати на одній координатній площині вольт-амперні характеристики сонячного елемента при трьох температурах вимірювань.
12. За графіками світлових вольт-амперних характеристик визначити значення струму короткого замикання  $I_{кз}$  та напруги холостого ходу  $U_{хх}$  для кожної температури сонячного елемента, занести їх до табл. 12.5.2.
13. Розрахувати електричну потужність  $P=I\cdot U$ , яка виділяється на навантаженні, як добуток відповідної сили струму  $I$  на напругу  $U$ , заповнивши відповідні комірки табл. 12.5.1.
14. Побудувати залежності електричної потужності від напруги  $P = P(U)$ , і за отриманими графіками знайти максимальні значення потужності  $P_{\text{mpp}}$  для кожної температури сонячного елемента. Результати занести до табл. 12.5.2.
15. За формулою (12.5.3) розрахувати коефіцієнт корисної дії сонячного елемента для кожної температури, занести отримані значення до табл. 5.2.
16. За даними табл. 12.5.2 побудувати залежності струму короткого замикання  $I_{кз}$ , напруги холостого ходу  $U_{хх}$ , максимальної електричної потужності  $P_{\text{mpp}}$ , а також ефективності  $\eta$  від температури. Зробити висновки про характер отриманих температурних залежностей.
17. За рівнянням (12.5.5) оцінити значення температурного коефіцієнта ефективності. Порівняти його з типовими значеннями, характерними для сонячних елементів на основі кристалічного кремнію.

Таблиця 12.5.1 – Результати вимірювань світлових вольт-амперних характеристик при різних температурах сонячного елемента

$T = \underline{\quad\quad}^{\circ}\text{C}$			$T = \underline{\quad\quad}^{\circ}\text{C}$			$T = \underline{\quad\quad}^{\circ}\text{C}$		
$U, \text{В}$	$I, \text{мА}$	$P, \text{мВт}$	$U, \text{В}$	$I, \text{мА}$	$P, \text{мВт}$	$U, \text{В}$	$I, \text{мА}$	$P, \text{мВт}$
0			0			0		
0,05			0,05			0,05		
...			...			...		

Таблиця 12.5.2 – Параметри сонячного елемента при різних температурах

$T = \underline{\quad\quad}^{\circ}\text{C}$				$T = \underline{\quad\quad}^{\circ}\text{C}$				$T = \underline{\quad\quad}^{\circ}\text{C}$			
$I_{кз}, \text{мА}$	$U_{хх}, \text{В}$	$P_{тпрр}, \text{мВт}$	$\eta, \%$	$I_{кз}, \text{мА}$	$U_{хх}, \text{В}$	$P_{тпрр}, \text{мВт}$	$\eta, \%$	$I_{кз}, \text{мА}$	$U_{хх}, \text{В}$	$P_{тпрр}, \text{мВт}$	$\eta, \%$
$\alpha_{\eta} = \underline{\quad\quad} \%$											

### **Контрольні питання**

1. Поясніть, як змінюється структура енергетичних зон напівпровідникової р-п-структури при нагріванні.
2. Які фізичні причини зумовлюють залежність струму сонячного елемента від температури?
3. Як змінюється напруга, яку генерує сонячний елемент, з підвищенням його температури?
4. Як впливає нагрівання на внутрішній послідовний та шунтуючий опори сонячного елемента?
5. Поясніть температурну залежність ефективності сонячного елемента.
6. Що показує температурний коефіцієнт ефективності? Наведіть його типові значення для сонячних елементів на основі різних напівпровідників.

## 12.7 Лабораторна робота №6. Дослідження світлових вольт-амперних характеристик сонячної панелі

**Мета роботи:** З аналізу світлової вольт-амперної характеристики сонячної батареї визначити параметри окремих сонячних елементів, що входять до її складу.

### *Короткі теоретичні відомості*

Сонячні панелі наземного застосування конструюються з урахуванням їх призначення. Так, панелі для зарядки свинцево-кислотних акумуляторних батарей з номінальною напругою 12 В, як правило, будуються з 36 послідовно з'єднаних сонячних елементів, поміщених в герметичну капсулу, утворену прозорою плівкою з етилвінілацетату (EVA). Отриманий герметизований пакет розташовують між верхнім загартованим склом та нижньою полімерною, рідше металевую, підкладкою. Отриману конструкцію фіксують з боків за допомогою алюмінієвого профілю. З тильної сторони розміщують розподільчу коробку, куди заводять кінці струмопровідної стрічки від сонячних елементів.

З метою отримання необхідної потужності і робочої напруги сонячні елементи в батареї з'єднують між собою послідовно або паралельно. Якщо фотоелектрична панель складається з  $K$  однакових стрічок, що з'єднані між собою паралельно, причому кожна стрічка містить  $N$  послідовно з'єднаних сонячних елементів, то струм та напруга панелі будуть визначатися наступними виразами:

$$I = \sum_{i=1}^K I_i \quad ; \quad (12.6.1)$$

$$U = \sum_{i=1}^N U_i \quad , \quad (12.6.2)$$

де  $I_i$  – струм у стрічці з номером  $i$ ;  $U_i$  – напруга  $i$ -го сонячного елемента в



стрічці.

У припущенні, що всі сонячні елементи у складі панелі абсолютно однакові, вирази для струму  $I$  та напруги  $U$  сонячної батареї запишуться у вигляді:

$$I = I_{cell}K, \quad (12.6.3)$$

де  $I_{cell}$  – величина струму, що генерує один сонячний елемент.

$$U = U_{cell}N, \quad (12.6.4)$$

де  $U_{cell}$  – напруга, яку генерує один сонячний елемент.

Електрична потужність сонячної батареї  $P$  є сумою потужностей  $P_i$  окремих елементів, що входять до її складу. У випадку абсолютно однакових за параметрами сонячних елементів потужність панелі визначається за виразом

$$P = \sum_{i=1}^M P_i = P_{cell}M = P_{cell}NK, \quad (12.6.5)$$

де  $P_{cell}$  – потужність одного сонячного елемента;  $M$  – загальна кількість сонячних елементів у батареї.

Втім, в реальних фотоелектричних панелях не всі сонячні елементи однакові, а мають певне відхилення параметрів один відносно одного. Це призводить до появи, так званих, втрат на неузгодженість. Чим ретельніше підібрані сонячні елементи в батареї (тобто, чим менше різниця в параметрах елементів), тим нижчі ці втрати. Так, при послідовному з'єднанні десяти сонячних елементів з відмінністю у параметрах 10% втрати на неузгодженість становлять приблизно 6%, а при відмінності 5% - знижуються до 2%.

Номінальна потужність сучасних панелей в залежності від їх призначення становить від 10 Вт (сонячні батареї для живлення мобільних

пристроїв) до 500 Вт (панелі для побудови мережевих сонячних електростанцій).

У випадку затінення одного сонячного елемента або частини елементів у фотоелектричній панелі при послідовному їх з'єднанні з'являється "ефект гарячого плями" – затінений елемент починає розсіювати всю вироблену освітленими фотоелектричними перетворювачами потужність, стрімко нагрівається і виходить з ладу. Для усунення цього ефекту паралельно з кожним елементом (або групою елементів) встановлюють шунтуючий діод (байпас-діод). Байпас-діоди, як правило, розміщуються в комутаційній коробці панелі.

Світлова вольт-амперна характеристика сонячної панелі має вигляд, аналогічний до одиничного сонячного елемента. На основі її аналізу визначають основні параметри панелі. Так, вираз для розрахунку ефективності панелі виглядатиме наступним чином:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{p_0 S} = \frac{I_m \cdot U_m}{p_0 S}, \quad (12.6.6)$$

де  $P_{\max}$  – максимальна електрична потужність панелі;  $I_m$  – струм у точці максимальної потужності;  $U_m$  – напруга в точці максимальної потужності;  $p_0$  – густина потужності випромінювання, що надходить на поверхню сонячної панелі;  $S$  – площа сонячної панелі.

Для визначення паспортних параметрів панелі її світлові вольт-амперні характеристики вимірюють у так званих стандартних умовах (STC). Ці умови передбачають опромінення спектром, який відповідає атмосферній масі AM1,5g, при густині потужності світлового потоку  $1000 \text{ Вт/м}^2$  та температурі панелі  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ці умови дозволяють порівнювати між собою панелі від різних виробників і є доволі ідеалізованими.

Для отримання інформації про електричні та енергетичні параметри сонячних панелей в умовах, наближених до реальних, доволі часто тестування

здійснюють ще й при нормальній робочій температурі (NOCT). В цьому випадку густина потужності потоку випромінювання становить  $800 \text{ Вт/м}^2$  при спектрі AM1,5g, температура оточуючого середовища дорівнює  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , а швидкість вітру  $1 \text{ м/с}$ . Кут нахилу панелі до горизонталі складає  $45^\circ$ .

Втім, і умови NOCT є лише певним орієнтиром, оскільки на реальні параметри сонячних панелей впливає ціла низка додаткових факторів, таких як: доза радіаційного опромінення панелі (тільки для космічних сонячних батарей); рівень освітленості панелі; затіненість приймальної поверхні сторонніми об'єктами; температура панелі; рівень механічних напружень у сонячній батареї, що виникають внаслідок циклічної зміни температури, тощо.

### ***Порядок виконання роботи***

1. Зіюрати схему для вимірювання світлових вольт-амперних характеристик (рис. 12.1.3).
2. Встановити на магазині опорів значення опору навантаження  $R_H = 0$ .
3. Подати живлення до джерела світлового потоку.
4. Орієнтувати сонячну панель на максимальний світловий потік, досягнувши максимальних значень струму за показаннями амперметра.
5. Поступово збільшуючи опір навантаження  $R_H$ , зробити відлік показань вольтметра і амперметра. Результати вимірів занести до табл. 12.6.1.
6. За даними табл. 12.6.1 побудувати світлову вольт-амперну характеристику сонячної панелі, відкладаючи на осі абсцис значення напруги у вольтах, а на осі ординат – значення сили струму в амперах.
7. За світловою вольт-амперною характеристикою визначити струм короткого замикання та напругу холостого ходу панелі. Результати занести до табл. 12.6.2.
8. Для кожної пари значень струму  $I$  та напруги  $U$  сонячної панелі розрахувати електричну потужність  $P = I \cdot U$ , яка виділяється на навантаженні  $R_H$ . Результати занести до табл. 12.6.1.

9. Побудувати залежність електричної потужності від напруги  $P = P(U)$ , за побудованим графіком знайти максимальну потужність панелі  $P_{\max}$ , а також напругу в точці максимальної потужності  $U_m$ . Результати занести до табл. 12.6.2.
10. Використовуючи знайдене значення  $U_m$ , за графіком світлової вольт-амперної характеристики визначити відповідний струм в точці максимальної потужності  $I_m$ . Результати занести до табл. 12.6.2.
11. Виміряти геометричні розміри панелі, розрахувати її площу  $S$ , занести отримане значення площі до табл. 12.6.2.
12. Розрахувати ефективність сонячної панелі  $\eta$  за формулою (12.6.6). Занести отримане значення ефективності до табл. 12.6.2.
13. Простежити електричну комутацію сонячних елементів у панелі, визначити кількість послідовно з'єднаних між собою елементів  $N$  у стрічці та кількість паралельних стрічок  $K$ , а також загальну кількість сонячних елементів в панелі  $M$ . Результати занести до табл. 12.6.2.
14. Зобразити електричну схему з'єднання сонячних елементів в панелі.
15. Вважаючи всі сонячні елементи в панелі однаковими, за формулою (12.6.3) визначити струм короткого замикання та струм в точці максимальної потужності для одного сонячного елемента у складі панелі. Результати занести до табл. 12.6.3.
16. За формулою (12.6.4) визначити напругу холостого ходу та напругу в точці максимальної потужності для одного сонячного елемента у складі панелі. Результати занести до табл. 12.6.3.
17. Розрахувати максимальну електричну потужність одного елемента в панелі, використовуючи вираз (12.6.5). Занести отриманий результат до табл. 12.6.3.
18. Порівняти отримані значення параметрів панелі та окремого сонячного елемента, зробити висновки.

Таблиця 12.6.1 - Результати вимірювання світлової вольт-амперної характеристики панелі

$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$P, \text{Вт}$
0		
1		
...		

Таблиця 12.6.2 – Параметри сонячної панелі

$I_{кз}, \text{А}$	$U_{хх}, \text{В}$	$P_{max}, \text{Вт}$	$I_m, \text{А}$	$U_m, \text{В}$	$\eta, \%$	$S, \text{м}^2$	$N$	$K$	$M$

Таблиця 12.6.3 – Параметри сонячного елемента в панелі

$I_{кз cell}, \text{А}$	$U_{хх cell}, \text{В}$	$P_{max cell}, \text{Вт}$	$I_m cell, \text{А}$	$U_m cell, \text{В}$

### **Контрольні питання**

1. *Опишіть типову будову сонячної панелі.*
2. *З яких міркувань обирають кількість послідовно з'єднаних сонячних елементів у стрічці при побудові панелі?*
3. *Як впливає кількість паралельно з'єднаних стрічок на параметри сонячної панелі?*
4. *Які фактори впливають на ефективність сонячної панелі?*
5. *В чому полягає "ефект гарячого плями"? Які технічні заходи застосовуються для уникнення цього ефекту?*
6. *Охарактеризуйте стандартні умови паспортизації сонячних батарей.*

## 12.8 Лабораторна робота №7. Визначення послідовного та шунтуючого опорів модуля сонячних елементів за прямою та зворотною гілками темної вольтамперної характеристики

**Мета роботи:** З вимірювань темної вольт-амперної характеристики визначити внутрішній послідовний і шунтуючий опори модулів сонячних елементів та оцінити внутрішній послідовний опір окремого елемента.

### *Короткі теоретичні відомості*

Для отримання оперативної інформації про значення послідовного  $R_s$  та шунтуючого  $R_{sh}$  опорів сонячних елементів доцільним є використання експрес-методики їх визначення, яку детально описано в теоретичній частині лабораторної роботи №4.

Застосування цієї методики дозволяє оцінити значення  $R_s$  та  $R_{sh}$  не лише з вимірювань темнових вольт-амперних характеристик окремих елементів, а й з вимірювань характеристик готових модулів, що складаються з певної кількості з'єднаних між собою фотоелектричних перетворювачів.

В даній роботі досліджуються модулі сонячних елементів, побудовані на основі фотоелектричних перетворювачів з монокристалічного кремнію з наступними параметрами при стандартних умовах тестування:

- струм короткого замикання  $I_{кз} = 150$  мА,
- напруга холостого ходу  $U_{хх} = 0,6$  В,
- струм в точці максимальної потужності  $I_m = 130$  мА,
- напруга в точці максимальної потужності  $U_m = 0,48$  В.

Цей сонячний елемент виготовлено на основі кремнієвої структури з емітерним шаром  $n^+$ - типу провідності та базовою областю  $p$ -типу. Фронтальна поверхня текстурована з окисним антивідбиваючим шаром. Фронтальний контакт гребеневої конфігурації, тильний – суцільний шар металізації. Розміри сонячного елемента становлять  $3 \times 1,5$  см<sup>2</sup>.

Модулі сформовано на текстолітовій підкладці з використанням паралельного (рис. 12.7.1, а), послідовного (рис. 12.7.1, б) та змішаного (рис. 12.7.1, в) з'єднання сонячних елементів.

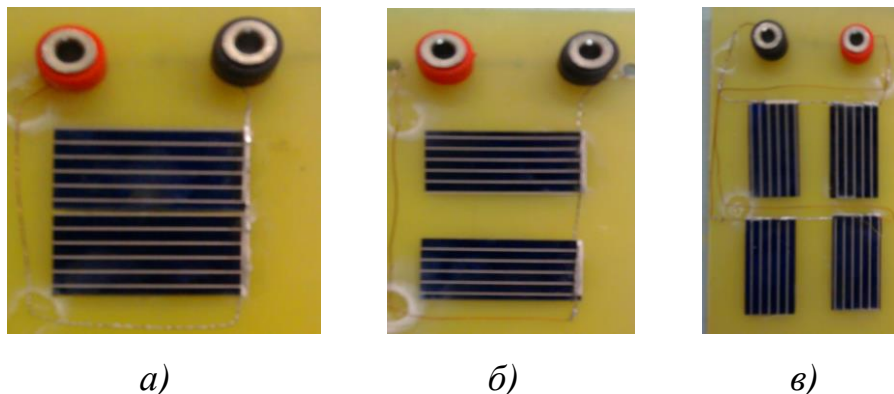


Рисунок 12.7.1 – Фотоелектричні модулі з паралельним (а), послідовним (б) та змішаним (в) з'єднанням сонячних елементів

Як і у випадку досліджень з окремим сонячним елементом, визначення внутрішнього послідовного опору модуля  $R_{SM}$  базується на аналізі нахилу лінійної ділянки прямої гілки його темної вольт-амперної характеристики (рис. 12.4.1):

$$R_{SM} = \Delta U_{np} / \Delta I_{np}. \quad (12.7.1)$$

Для визначення шунтуючого опору модуля  $R_{ShM}$  використовується зворотна гілка його темної вольт-амперної характеристики (рис. 4.1):

$$R_{ShM} = \Delta U_{36} / \Delta I_{36}. \quad (12.7.2)$$

Втім, визначивши внутрішній послідовний та шунтуючий опори модуля, можна оцінити їх значення для окремого сонячного елемента. Так, визначення внутрішнього послідовного опору окремого фотоелектричного перетворювача  $R_S$  у складі модуля суттєво спрощується, якщо покласти його шунтуючий опір

$R_{sh}$  нескінченно великим ( $R_{sh} = \infty$ ). Це припущення можна вважати виправданим, оскільки для сучасних фотоелектричних перетворювачів  $R_S \ll R_{sh}$ .

Тоді для випадку паралельного з'єднання двох однакових сонячних елементів у модуль (рис. 12.7.1, а) маємо:

$$\frac{1}{R_{SM}} = \frac{1}{R_S} + \frac{1}{R_S} = \frac{2}{R_S}; \quad (12.7.3)$$

$$R_S = 2R_{SM}, \quad (12.7.4)$$

тобто, при паралельному з'єднанні внутрішній послідовний опір модуля зменшується у порівнянні з опором окремого сонячного елемента.

При послідовному з'єднанні двох однакових сонячних елементів у модуль (рис. 12.7.1, б) його внутрішній послідовний опір становитиме:

$$R_{SM} = R_S + R_S = 2R_S; \quad (12.7.5)$$

$$R_S = R_{SM} / 2. \quad (12.7.6)$$

Отже, при послідовному з'єднанні внутрішній послідовний опір модуля збільшується у порівнянні з опором окремого сонячного елемента.

При змішаному з'єднанні чотирьох однакових сонячних елементів (2 паралельні стрічки по 2 послідовно з'єднаних елемента в кожній), як показано на рис. 12.7.1, в, внутрішній послідовний опір модуля становитиме:

$$\frac{1}{R_{SM}} = \frac{1}{2R_S} + \frac{1}{2R_S} = \frac{2}{2R_S} = \frac{1}{R_S}; \quad (12.7.7)$$

$$R_S = R_{SM}, \quad (12.7.8)$$

тобто, в даному конкретному випадку опір модуля співпадає з внутрішнім



послідовним опором окремого сонячного елемента.

### **Порядок виконання роботи**

1. Зібрати вимірювальну схему, показану на рис. 12.4.2, підключивши досліджуваний модуль з паралельно з'єднаними сонячними елементами (рис. 12.7.1, а) у прямому зміщенні та затінивши його фотоприймальну поверхню щільною тканиною.
2. Встановити регулятор напруги на джерелі живлення в положення «0», ввімкнути джерело живлення тумблером «Мережа».
3. Зняти пряму гілку темної вольт-амперної характеристики досліджуваного модуля, змінюючи напругу прямого зсуву в діапазоні від 0 до 2 В з кроком 0,1 В та здійснюючи запис показань амперметра та вольтметра до табл. 12.7.1.
4. Встановити регулятор напруги на джерелі живлення в положення «0».
5. За допомогою комутатора  $K$  (рис. 12.4.2) змінити полярність напруги на таку, що відповідає зворотному зміщенню р-п- переходів сонячних елементів у складі модуля.
6. Змінюючи напругу зворотнього зміщення в межах від 0 до 3 В з кроком 0,1 В, здійснити запис показань амперметра та вольтметра. Результати вимірювань зворотної гілки темної вольт-амперної характеристики модуля занести до табл. 12.7.1.
7. За даними табл. 12.7.1 на одній координатній площині побудувати графіки прямої та зворотної гілок темної вольт-амперної характеристики у вигляді залежностей  $I=I(U)$ .
8. Взявши пару точок на лінійній ділянці прямої гілки темної вольт-амперної характеристики (рис. 12.4.1), визначити внутрішній послідовний опір модуля  $R_{SM}$  за формулою (12.7.1).
9. За лінійною ділянкою зворотної гілки темної вольт-амперної характеристики, користуючись виразом (12.7.2), визначити шунтуючий опір модуля  $R_{ShM}$ .

10. Отримані значення внутрішнього послідовного та шунтуючого опорів занести до табл. 12.7.2.
11. Повторити пп. 1-10 для модулів з послідовним (рис. 12.7.1, б) та змішаним (рис. 12.7.1, в) з'єднанням сонячних елементів.
12. Проаналізувати дані табл. 12.7.2, встановивши закономірності зміни внутрішнього послідовного та шунтуючого опорів в залежності від комутації сонячних елементів у модулі.
13. З використанням даних табл. 12.7.2 оцінити внутрішній послідовний опір окремого сонячного елемента  $R_S$ , користуючись формулами (12.7.4), (12.7.6) та (12.7.8) для модулів з відповідною комутацією сонячних елементів. Результати занести до табл. 12.7.3.
14. Порівняти між собою значення внутрішнього послідовного опору сонячного елемента  $R_S$ , отримані для випадків різної комутації фотоелектричних перетворювачів у модулі. Зробити висновок.

Таблиця 12.7.1 – Результати вимірювань прямих та зворотних гілок темнових вольт-амперних характеристик модулів

Паралельне з'єднання				Послідовне з'єднання				Змішане з'єднання			
$U_{np}$ , В	$I_{np}$ , А	$-U_{зв}$ , В	$-I_{зв}$ , А	$U_{np}$ , В	$I_{np}$ , А	$-U_{зв}$ , В	$-I_{зв}$ , А	$U_{np}$ , В	$I_{np}$ , А	$-U_{зв}$ , В	$-I_{зв}$ , А
0		0		0		0		0		0	
0,1		0,1		0,1		0,1		0,1		0,1	
...		...		...		...		...		...	

Таблиця 12.7.2 – Внутрішній послідовний та шунтуючий опори модулів сонячних елементів

Компонента внутрішнього опору	Паралельне з'єднання	Послідовне з'єднання	Змішане з'єднання
$R_{SM}$ , Ом			
$R_{ShM}$ , Ом			

Таблиця 12.7.3 – Внутрішній послідовний опір сонячного елемента

Компонента внутрішнього опору	Паралельне з'єднання	Послідовне з'єднання	Змішане з'єднання
$R_s$ , Ом			

### **Контрольні питання**

1. Чим обумовлений внутрішній послідовний опір сонячного елемента?
2. Дайте визначення шунтуючого опору фотоелектричного перетворювача.
3. Як впливають значення внутрішнього послідовного та шунтуючого опорів на ефективність фотоелектричного модуля?
4. Як співвідносяться між собою величини внутрішнього послідовного та шунтуючого опорів у високоефективних сонячних елементах?
5. Поясніть, як змінюється внутрішній послідовний опір модуля при збільшенні кількості послідовно з'єднаних сонячних елементів.
6. Як впливає паралельне з'єднання сонячних елементів на внутрішній послідовний опір модуля?

## **12.9 Лабораторна робота №8. Визначення основних параметрів модуля сонячних елементів за світловою вольтамперною характеристикою**

**Мета роботи:** З аналізу світлових вольт-амперних характеристик визначити основні параметри модулів сонячних елементів та встановити закономірності щодо залежності цих параметрів від схеми комутації елементів у модулі.

### **Короткі теоретичні відомості**

Оскільки модулі сонячних елементів проектуються, зважаючи на їх практичне застосування, то необхідні електричних параметри, що їх має

забезпечувати модуль, досягаються шляхом електричної комутації окремих фотоелектричних перетворювачів за певною схемою. Так, послідовне з'єднання сонячних елементів у стрічку дозволяє забезпечити потрібне значення номінальної напруги, а паралельне з'єднання таких стрічок – необхідний струм, а отже, і номінальну потужність модуля.

При послідовному з'єднанні  $N$  абсолютно однакових за параметрами сонячних елементів у стрічку напруга модуля  $U_M$  становитиме:

$$U_M = U_{cell}N, \quad (12.8.1)$$

де  $U_{cell}$  – напруга, що генерує один сонячний елемент стрічки.

В той же час струм у стрічці  $I_c$  дорівнюватиме струму  $I_{cell}$ , що генерується кожним окремим сонячним елементом за даних умов освітлення:

$$I_c = I_{cell}. \quad (12.8.2)$$

Паралельне з'єднання  $K$  однакових стрічок дозволяє збільшити струм модуля:

$$I_M = I_c K = I_{cell} K. \quad (12.8.3)$$

Отже, електрична потужність модуля становитиме:

$$P_M = I_M U_M = I_{cell} K U_{cell} N = P_{cell} K N = P_{cell} M, \quad (12.8.4)$$

де  $P_{cell}$  – електрична потужність одного сонячного елемента у складі модуля;  $M$  – кількість сонячних елементів у модулі.

Ефективність модуля сонячних елементів може бути визначена за відомим рівнянням:

$$\eta = \frac{P_M}{p_0 S} = \frac{I_m \cdot U_m}{p_0 S}, \quad (12.8.5)$$

де  $I_m$  – струм у точці максимальної потужності модуля;  $U_m$  – напруга в точці максимальної потужності;  $p_0$  – густина потужності випромінювання, що надходить на поверхню модуля;  $S$  – площа модуля.

Параметри модуля  $P_M$ ,  $I_m$ ,  $U_m$ , що фігурують в формулі (12.8.4), знаходять експериментально на основі аналізу його світлової вольт-амперної характеристики, методика якого детально описана в лабораторній роботі №1.

В даній роботі досліджуються модулі сонячних елементів, побудовані на основі фотоелектричних перетворювачів з монокристалічного кремнію. Ці сонячні елементи за стандартних умов тестування демонструють наступні параметри:

- струм короткого замикання  $I_{кз} = 150$  мА,
- напруга холостого ходу  $U_{xx} = 0,6$  В,
- струм в точці максимальної потужності  $I_m = 130$  мА,
- напруга в точці максимальної потужності  $U_m = 0,48$  В.

Площа сонячного елемента становить  $3 \times 1,5$  см<sup>2</sup>.

Модулі сформовано на текстолітовій підкладці з використанням паралельного, послідовного та змішаного з'єднання сонячних елементів (рис. 12.7.1). Модулі з паралельним (рис. 12.7.1, а) та послідовним (рис. 12.7.1, б) з'єднанням складено з двох сонячних елементів, а модуль зі змішаною послідовно-паралельною комутацією (рис. 12.7.1, в) – з чотирьох елементів: дві паралельні стрічки по два послідовно з'єднаних елемента в кожній.

### ***Порядок виконання роботи***

1. Зібрати схему для вимірювання світлових вольт-амперних характеристик (рис. 12.1.3), встановивши в якості досліджуваного зразка модуль з

паралельною комутацією сонячних елементів (рис. 12.7.1, а).

2. Встановити на магазині опорів значення опору навантаження  $R_H = 0$ .
3. Подати живлення до джерела світлового потоку лабораторної установки.
4. Орієнтувати модуль на максимальний світловий потік, досягнувши максимальних значень струму в електричному колі.
5. Поступово збільшуючи опір навантаження  $R_H$ , зробити відлік показань вольтметра і міліамперметра. Результати вимірів занести в табл. 12.8.1.
6. Вимкнути живлення джерела світлового потоку лабораторної установки.
7. За даними табл. 12.8.1 побудувати світлову вольт-амперну характеристику модуля, відкладаючи по осі абсцис значення напруги у вольтах, а по осі ординат – значення сили струму в міліамперах.
8. За світловою вольт-амперною характеристикою визначити струм короткого замикання  $I_{кз}$  та напругу холостого ходу  $U_{хх}$  модуля. Результати занести до табл. 12.8.2.
9. Для кожної пари значень струму  $I$  та напруги  $U$  модуля розрахувати електричну потужність  $P = I \cdot U$ , яка виділяється на навантаженні  $R_H$ . Результати занести до табл. 12.8.1.
10. Побудувати залежність електричної потужності від напруги  $P = P(U)$ , за побудованим графіком знайти максимальну потужність модуля  $P_M$ , а також напругу в точці максимальної потужності  $U_m$ . Результати занести до табл. 12.8.2.
11. Використовуючи знайдене значення  $U_m$ , за графіком світлової вольт-амперної характеристики визначити відповідний струм в точці максимальної потужності  $I_m$ . Результати занести до табл. 12.8.2.
12. Визначити площу фотоактивної поверхні модуля  $S$ , помноживши площу одного сонячного елемента на кількість елементів у модулі. Занести отримане значення площі до табл. 12.8.2.
13. За формулою (12.8.5) розрахувати ефективність модуля сонячних елементів  $\eta$ , занести отримане значення до табл. 12.8.2.

14. Повторити пп. 1 – 13 для модулів з послідовною та змішаною комутацією сонячних елементів.
15. За формулами (12.8.1) – (12.8.4), зважаючи на відповідну комутацію сонячних елементів у модулі, розрахувати параметри одного елемента, а саме: струм короткого замикання  $I_{kz\ cell}$ , напругу холостого ходу  $U_{xx\ cell}$ , максимальну електричну потужність елемента  $P_{max\ cell}$ , струм  $I_m\ cell$  та напругу  $U_m\ cell$  в точці максимальної потужності. Результати занести до табл. 12.8.3.
16. Користуючись значеннями з табл. 12.8.3, порівняти між собою параметри окремого сонячного елемента, отримані для модулів з різною електричною комутацією. Зробити висновок.
17. Порівняти отримані параметри окремих сонячних елементів (табл. 12.8.3) з відповідними параметрами модулів на їх основі (табл. 12.8.2), зробити висновок щодо впливу способу електричної комутації на параметри фотоелектричних модулів.

Таблиця 12.8.1 – Результати вимірювань світлових вольт-амперних характеристик модулів

Паралельне з'єднання			Послідовне з'єднання			Змішане з'єднання		
$U$ , В	$I$ , мА	$P$ , мВт	$U$ , В	$I$ , мА	$P$ , мВт	$U$ , В	$I$ , мА	$P$ , мВт
0			0			0		
0,05			0,05			0,05		
...			...			...		

Таблиця 12.8.2 – Параметри модулів сонячних елементів

Модуль	$I_{kz}$ , мА	$U_{xx}$ , В	$P_M$ , мВт	$I_m$ , мА	$U_m$ , В	$S$ , см <sup>2</sup>	$\eta$ , %
Паралельне з'єднання							
Послідовне з'єднання							
Змішане з'єднання							

Таблиця 12.8.3 – Параметри окремого сонячного елемента в модулі

Модуль	$I_{kz\ cell}, A$	$U_{xx\ cell}, B$	$P_{max\ cell}, Bт$	$I_m\ cell, A$	$U_m\ cell, B$
Паралельне з'єднання					
Послідовне з'єднання					
Змішане з'єднання					

### **Контрольні питання**

1. Опишіть принципи, якими керуються при проектуванні модулів сонячних елементів.
2. Як залежать параметри модуля від типу з'єднання сонячних елементів?
3. Як співвідносяться між собою ефективність окремого сонячного елемента та модуля фотоелектричних перетворювачів?
4. Чим обумовлена різниця в ефективностях окремого сонячного елемента та фотоелектричного модуля?
5. Чи залежить електрична потужність модуля від способу комутації сонячних елементів в ньому? Відповідь обґрунтуйте.
6. Що розуміють під поняттям «фотоактивна площа модуля сонячних елементів»?

### **12.10 Лабораторна робота №9. Дослідження залежності параметрів фотоелектричних перетворювачів від інтенсивності світлового потоку**

**Мета роботи:** Встановити закономірності зміни параметрів напівпровідникових фотоелектричних перетворювачів від інтенсивності світлового потоку.

#### **Короткі теоретичні відомості**

Світлова вольт-амперна характеристика фотоелектричного



перетворювача (ФЕП) може бути представлена в однодіодній та дводіодній моделях. Найбільш поширеною є однодіодна модель, оскільки її використання дозволяє за мінімального набору параметрів задовільно описати експериментальні залежності струму  $I$  від напруги  $U$  сонячного елемента, хоча дводіодна вважається більш точною. У випадку однодіодної моделі, приймаючи за позитивний напрям струму фотострум, світлова вольт-амперна характеристика сонячного елемента без втрат, тобто з нульовим внутрішнім послідовним опором та нескінченно великим шунтуючим, записується у вигляді:

$$I = I_{\phi} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{eU}{AkT}\right) - 1 \right], \quad (12.9.1)$$

де  $I_{\phi}$  – фотострум;  $I_0$  – струм насичення діода;  $e$  – елементарний заряд;  $A$  – коефіцієнт ідеальності діоду;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – абсолютна температура.

В режимі короткого замикання  $U$  дорівнює нулю і, як слідує з рівняння (12.9.1), струм сонячного елемента дорівнює фотоструму. Отже, одним з параметрів сонячного елемента є *струм короткого замикання*  $I_{кз}$ :

$$I_{кз} = I_{\phi}. \quad (12.9.2)$$

В режимі холостого ходу  $I = 0$ , а *напруга холостого ходу*  $U_{хх}$  визначається з (12.9.1) наступним чином:

$$U_{хх} = \frac{AkT}{e} \ln\left(\frac{I_{\phi}}{I_0} + 1\right) \approx \frac{AkT}{e} \ln\left(\frac{I_{\phi}}{I_0}\right). \quad (12.9.3)$$

Тобто, напруга холостого ходу логарифмічно залежить від фотоструму, а отже, від струму короткого замикання.

Оскільки в режимах короткого замикання, коли опір навантаження є нульовим, та холостого ходу, коли ланцюг навантаження розімкнутий, корисна

потужність не генерується, то існує певний опір навантаження, при якому електрична потужність, що виділяється, є максимальною. Такий режим роботи, при якому за даних зовнішніх умов на навантаженні виділяється *максимальна потужність*  $P_m$ , називається режимом максимальної потужності. Максимальна потужність спостерігається при певному струмі  $I_m$  та напрузі  $U_m$ , які називають, відповідно, *струм* та *напруга в точці максимальної потужності*:

$$P_m = I_m \cdot U_m. \quad (12.9.4)$$

Відношення максимальної потужності до добутку струму короткого замикання і напруги холостого ходу називають *фактором заповнення* навантажувальної характеристики сонячного елемента:

$$FF = \frac{P_m}{I_{кз} \cdot U_{хх}}. \quad (12.9.5)$$

Фактор заповнення відображає ступінь наближення форми реальної навантажувальної ВАХ сонячного елемента до ідеальної прямокутної: чим більше значення  $FF$ , тим більш досконалим є сонячний елемент.

Ефективність перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію характеризують *коефіцієнтом корисної дії* (ККД):

$$\eta = \frac{P_m}{P_B}, \quad (12.9.6)$$

де  $P_B$  – потужність випромінювання, що падає на фотоприймальну поверхню сонячного елемента.

Зі збільшенням інтенсивності світлового потоку, що падає на фотоприймальну поверхню сонячного елемента, збільшується електрична потужність, що віддається до навантаження. Для кожного значення потужності

сонячного випромінювання встановлюється свій енергетичний баланс, пов'язаний з перерозподілом енергії випромінювання між корисною енергією, оптичними, рекомбінаційними та електричними втратами. Оскільки процеси, що відбуваються в напівпровідниковій структурі під час взаємодії зі світлом, взаємопов'язані, збільшення корисної потужності з підвищенням світлового потоку не обов'язково означає зростання ефективності перетворення, а залежність ККД від інтенсивності падаючого випромінювання має вигляд кривої з максимумом при певній освітленості. Отже, існує світловий потік, при якому сонячний елемент демонструє такі параметри, що ефективність перетворення випромінювання сягає максимуму. У зв'язку з цим, розглянемо залежність основних параметрів сонячних елементів від інтенсивності світлового потоку.

Щільність фотоструму визначається виразом:

$$j_{\Phi} = e \int_{E_g}^{\infty} [1 - R(h\nu)] N_c(h\nu) Q(h\nu) d(h\nu) , \quad (12.9.7)$$

де  $R(h\nu)$  – доля фотонів з енергією  $h\nu$ , що відбиваються від поверхні;  $N_c(h\nu)$  – кількість фотонів в одиничному інтервалі енергії, що падають на одиницю площі сонячного елемента в одиницю часу;  $Q(h\nu)$  – коефіцієнт збирання носіїв заряду, що утворились при поглинанні фотонів з енергією  $h\nu$ ;  $E_g$  – ширина забороненої зони напівпровідникового матеріалу.

Для ідеального сонячного елемента  $R(h\nu) = 0$  та  $Q(h\nu) = 1$  для всіх фотонів незалежно від їх енергії, тому:

$$j_{\Phi} = e \int_{E_g}^{\infty} N_c(h\nu) d(h\nu) , \quad (12.9.8)$$

тобто, фотострум прямо пропорційний кількості фотонів, що падають на

поверхню сонячного елемента. Тоді з урахуванням (12.9.2) струм короткого замикання прямо пропорційно зростає з потужністю світлового потоку  $P_B$ :

$$I_{кз} = I_{\phi} = j_{\phi} S \sim P_B, \quad (12.9.9)$$

де  $S$  – площа фотоприймальної поверхні сонячного елемента.

Напруга холостого ходу залежить логарифмічно від фотоструму, тому:

$$U_{хх} \sim \ln(P_B). \quad (12.9.10)$$

Залежність максимальної потужності від інтенсивності освітлення визначається лінійною залежністю струму сонячного елемента, тому вважається, що максимальна потужність збільшується пропорційно потужності випромінювання:

$$P_m \sim P_B. \quad (12.9.11)$$

Що стосується ККД сонячного елемента, то в ідеальному випадку, як це видно з (12.9.6), він не повинен залежати від інтенсивності освітлення, оскільки максимальна потужність лінійно зростає зі світловим потоком  $P_B$ . Фактор заповнення також має залишатися незмінним, зважаючи на вираз (12.9.5). Тобто, ідеальний сонячний елемент має однаково ефективно перетворювати світловий потік будь-якої інтенсивності.

Однак, на практиці зі збільшенням інтенсивності освітлення спостерігається й зростання негативного впливу від підвищення температури сонячного елемента. Тому зростання максимальної потужності дещо уповільнюється, стає сублінійним, що призводить до зменшення ККД. Крім того, зростання концентрації нерівноважних носіїв заряду при збільшенні світлового потоку призводить до поступового насичення рекомбінаційних каналів, внаслідок чого рекомбінаційні втрати в напівпровіднику зменшуються

і до певного рівня освітленості можуть перекривати збільшення електричних втрат, пов'язаних зі зростанням зворотного струму діода при підвищенні температури. Це обумовлює наявність максимуму на залежності ефективності сонячного елемента від інтенсивності світлового потоку.

Під час виконання лабораторної роботи використовується стенд з імітацією сонячного випромінювання, представлений на рис. 12.9.1.

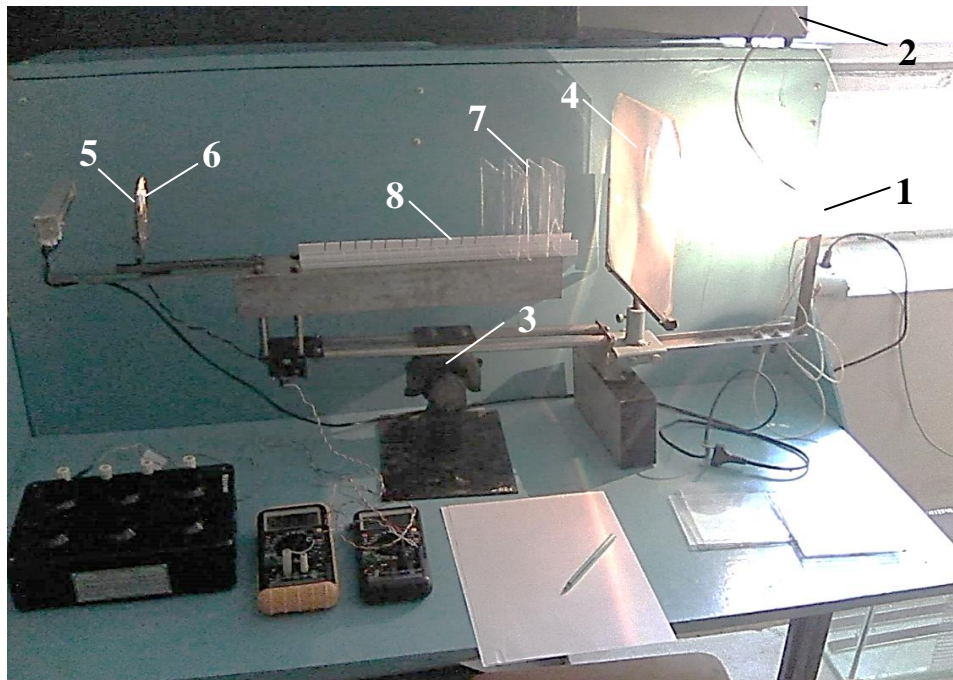


Рисунок 12.9.1 – Лабораторний стенд для дослідження залежності параметрів фотоелектричних перетворювачів в від інтенсивності світлового потоку: 1 – джерело світла (лампа розжарювання); 2 – блок живлення джерела світла; 3 – основа; 4 – лінза Френеля; 5 – предметний столик; 6 – дослідний зразок; 7 – поглинаючі пластини; 8 – тримач поглинаючих пластин

До складу стенду входить джерело світла 1, в якості якого використовувалась лампа розжарювання з напругою живлення 12 В, блок стабілізованого живлення лампи 2, основа 3, на якій, окрім джерела світла, кріпиться лінза Френеля 4 та предметний столик 5 з дослідним зразком сонячного елемента 6.

Для зміни світлового потоку застосовуються поглинаючі елементи 7 у

вигляді пластин з оргскла товщиною 1 мм, що встановлюються на шляху розповсюдження світла між лінзою Френеля та дослідним зразком сонячного елемента на спеціальному тримачі 8. Напряга живлення джерела світла під час дослідів залишається незмінною.

При відсутності поглинаючих пластин стенд забезпечує на поверхні дослідного зразка густину світлового потоку  $25 \text{ мВт/см}^2$  при рівномірності розподілу потоку не гірше  $\pm 5\%$  на площі  $4 \times 4 \text{ см}^2$ . Зменшення густини світлового потоку відносно вказаного значення відбувається дискретно шляхом збільшення кількості поглинаючих елементів в тримачі.

Електрична вимірювальна схема, що використовується для зняття світлових вольт-амперних характеристик при виконанні даної лабораторної роботи, є стандартною і представлена на рис. 12.1.3. В якості вольтметра та амперметра використовуються цифрові мультиметри DT9205A. Зміна опору навантаження під час зняття світлової ВАХ здійснюється магазином опорів P33 з дискретним набором номіналів в діапазоні від 0 до 99999,9 Ом.

### ***Порядок виконання роботи***

1. Зібрати вимірювальну схему для зняття світлових вольт-амперних характеристик у відповідності до рис. 1.3.
2. Визначити площу  $S$  досліджуваного зразка сонячного елемента шляхом вимірювання його лінійних розмірів.
3. На предметному столику лабораторної установки закріпити досліджуваний сонячний елемент.
4. На магазині опорів встановити номінал 0 Ом.
5. Увімкнути джерело живлення лампи і витримати освітлений зразок не менше 5 хвилин для його термалізації.
6. Шляхом повороту предметного столика в горизонтальній площині досягти максимальних показань міліамперметра, що свідчатиме про надходження до фотоприймальної поверхні сонячного елемента максимального світлового потоку.

7. Дискретно збільшуючи номінал опору навантаження, послідовно встановлювати на магазині опорів значення в діапазоні від 0 до 99999,9 Ом, і фіксувати при кожному номіналі опору показання міліамперметра та вольтметра. Результати вимірювань занести до табл. 12.9.1.
8. У відповідності до п. 7 повторити вимірювання світлової вольт-амперної характеристики при незмінному світловому потоці не менше трьох разів, заносючи результати до відповідних комірок табл. 12.9.1.
9. Зменшити світловий потік встановленням поглинаючої пластини у тримач і повторити вимірювання у відповідності до пп. 7-8.
10. Збільшити кількість поглинаючих пластин у тримачі і повторити вимірювання світлових вольт-амперних характеристик.
11. Для кожного фіксованого значення світлового потоку за результатами повторних вимірювань знайти середні значення струмів та напруг, занести їх до табл. 12.9.1.
12. За середніми значеннями струмів та напруг (табл. 12.9.1) для кожного фіксованого світлового потоку побудувати в середовищі MS Excel відповідні світлові вольт-амперні характеристики у вигляді залежності струму від напруги сонячного елемента. За точками перетину отриманих графіків з віссю абсцис (віссю напруг) визначити напругу холостого ходу  $U_{xx}$ , а з віссю ординат – струм короткого замикання  $I_{кз}$ . Результати занести до табл. 12.9.2.
13. Розрахувати електричну потужність, що виділяється на навантаженні, як добуток відповідних середніх значень струму та напруги  $P = I \cdot U$  при кожному значенні опору навантаження та фіксованому світловому потоці. Результати розрахунку занести до табл. 12.9.1.
14. Для кожної фіксованої інтенсивності світлового потоку в середовищі MS Excel побудувати характеристики потужності у вигляді залежностей потужності від напруги  $P = P(U)$ , і за максимумами отриманих залежностей визначити максимальну потужність  $P_m$  сонячного елемента та

- напругу в точці максимальної потужності  $U_m$ . Отримані значення занести до табл. 12.9.2.
15. Знаючи  $U_m$ , за відповідною світловою вольт-амперною характеристикою визначити струм  $I_m$  в точці максимальної потужності для кожної фіксованої інтенсивності світлового потоку. Результати занести до табл. 12.9.2.
  16. Користуючись формулою (12.9.5), розрахувати значення фактору заповнення  $FF$  для кожної інтенсивності світлового потоку. Результати занести до табл. 12.9.2.
  17. Визначити інтенсивності світлового потоку  $P_B$  для кожної кількості поглинаючих пластин, приймаючи до уваги, що  $P_B = P_0 \frac{I_{кз}}{I_{кз0}} S$ , густина потужності випромінювання у випадку відсутності поглинаючих пластин становить  $P_0 = 25 \text{ мВт/см}^2$ ,  $I_{кз0}$  – струм короткого замикання для випадку відсутності поглинаючих пластин,  $I_{кз}$  – поточне значення струму короткого замикання сонячного елемента з площею  $S$ . Результати розрахунку інтенсивності світлового потоку занести до табл. 12.9.2.
  18. Розрахувати ККД сонячного елемента при кожній інтенсивності світлового потоку за формулою (12.9.6). Результати розрахунку занести до табл. 12.9.2.
  19. За даними табл. 12.9.2 в середовищі MS Excel побудувати залежності таких параметрів сонячного елемента, як  $I_{кз}$ ,  $U_{хх}$ ,  $I_m$ ,  $U_m$ ,  $P_m$ ,  $FF$  та  $\eta$  від інтенсивності випромінювання  $P_B$  у вигляді окремих точкових графіків.
  20. Для кожного з побудованих графіків підібрати із стандартного списку такий вид лінії тренду, який найточніше описує отримані експериментальні залежності параметрів сонячних елементів від інтенсивності світлового потоку (під час підбору орієнтуватися на отримані значення параметру детермінації  $R^2$ ).
  21. Проаналізувати отримані залежності параметрів сонячних елементів від інтенсивності падаючого випромінювання, виписати до табл. 12.9.3 рівняння підібраних ліній тренду разом з відповідними коефіцієнтами  $R^2$ ,



зробити висновок щодо характеру залежності кожного з параметрів від інтенсивності світлового потоку.

Таблиця 12.9.1 – Результати вимірювань світлових вольт-амперних характеристик

<i>1. Кількість поглинаючих пластин в тримачі: 0</i>									
$R_{н}, \text{ Ом}$	$I, \text{ мА}$				$U, \text{ В}$				$P, \text{ мВт}$
	Вимір 1	Вимір 2	Вимір 3	Середнє значення	Вимір 1	Вимір 2	Вимір 3	Середнє значення	
0									
0,1									
0,2									
...									
99999,9									
<i>2. Кількість поглинаючих пластин в тримачі: 1</i>									
$R_{н}, \text{ Ом}$	$I, \text{ мА}$				$U, \text{ В}$				$P, \text{ мВт}$
	Вимір 1	Вимір 2	Вимір 3	Середнє значення	Вимір 1	Вимір 2	Вимір 3	Середнє значення	
0 (к.з.)									
0,1									
0,2									
...									
99999,9 (х.х.)									
<i>3. Кількість поглинаючих пластин в тримачі: 2</i>									
...									
...									

Таблиця 12.9.2 – Параметри сонячного елемента при різних інтенсивностях світлового потоку

Кількість пластин	$P_{в}, \text{ мВт}$	$I_{кз}, \text{ мА}$	$U_{хх}, \text{ В}$	$I_{м}, \text{ мА}$	$U_{м}, \text{ В}$	$P_{м}, \text{ мВт}$	$FF, \text{ од.}$	$\eta, \text{ од.}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
7								
6								
5								

Продовження таблиці 12.9.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4								
3								
2								
1								
0								

Таблиця 12.9.3 – Рівняння, що описують залежності параметрів сонячного елемента від інтенсивності світлового потоку

<i>Параметр</i>	<i>Рівняння</i>	<i>R<sup>2</sup></i>
$I_{кз}$		
$U_{хх}$		
$I_m$		
$U_m$		
$P_m$		
$FF$		
$\eta$		

**Контрольні питання**

1. Назвіть основні параметри сонячного елемента.
2. Яке значення густини потоку сонячного випромінювання встановлюється у відповідності зі стандартними умовами тестування?
3. Який характер має залежність ефективності сонячного елемента від інтенсивності світлового потоку?
4. Назвіть фізичні процеси, що відбуваються в напівпровідниковій структурі зі збільшенням інтенсивності падаючого світлового потоку.
5. Як змінюються основні параметри сонячного елемента при збільшенні інтенсивності потоку сонячного випромінювання?
6. Запишіть рівняння, що пов'язує струм короткого замикання та напругу холостого ходу сонячного елемента, та поясніть логарифмічний характер залежності напруги холостого ходу від інтенсивності світлового потоку.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

### Основна література

1. Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с.
2. Колонтаєвський Ю.П. Фотоенергетика: навч. посібник / Ю.П. Колонтаєвський, Д.В. Тугай, С.В. Котелевець. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2019. – 160 с.
3. Kalogirou S.A. Solar Energy Engineering. Processes and Systems: Second edition / S.A. Kalogirou. – Elsevier, 2014. – 819 p.
4. Фолькер К. Системы возобновляемых источников энергии / К. Фолькер. – Астана: Фолиант, 2013. – 432 с.
5. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: підручник / С.О. Кудря. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 492 с.

### Додаткова література

6. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. – 82 с.
7. Розрахунок геліосистеми з фотоелектричними перетворювачами [Текст]: метод. рек. до викон. розрахункової роботи для студ. спеціальності 144 «Теплоенергетика» / Уклад: В. І. Шкляр, В. В. Дубровська, – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 52 с.
8. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth edition / J.A. Duffie, W.A. Beckman. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. – 910 p.
9. Соловей О.І. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії: Навчальний посібник / О.І. Соловей, Ю.Г. Лета, В.П. Розен, О.О. Ситник, А.В.Чернявський, Г.В. Курбака; За заг. ред. О.І. Солов'я. - Черкаси: ЧДТУ, 2007. – 490 с.

10. Стриха В.И. Солнечные элементы на основе контакта металл-полупроводник / В.И. Стриха, С.С. Кильчицкая. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург.отд-ние, 1991. – 136 с.
11. Твайделл Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл, А. Уэйр. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 386 с.
12. Андреев В.М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / В.М. Андреев, В.А. Грилихес, В.Д. Румянцев. – Л.: Наука, 1989. – 310 с.
13. Колтун М.М. Солнечные элементы / М.М. Колтун. – М.: Наука, 1987. – 192 с.
14. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов / М.М. Колтун. – М.: Наука, 1985. – 280 с.
15. Копил О.І. Термоелектричний генератор з імпульсним перетворювачем / О.І. Копил, С.І. Кособуцький, О.І. Середюк, І.С. Термена, М.М. Чуботару // Науковий вісник Чернівецького університету. – 2005. – Вип. 268. – С. 69-72.
16. Кайбе Х.Т. Компанія Комацу та її діяльність / Х.Т. Кайбе, И. Аояма, С. Сано // Термоелектрика. – 2009. – №1. – С. 60-67.
17. Карпаш О.М. Використання термоелектрики для перетворення сонячної та теплової енергії в електричну для умов України / О.М. Карпаш, В.С. Цих, А.В. Яворський // Нафтогазова енергетика. – 2011. – №1(14). – 7 с.
18. Вілінський О.О. Термоелектричний перетворювач сонячного випромінювання в електроенергію / О.О. Вілінський, Л.Ю. Цибульський // Матеріали XI-ї науково-практичної конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки», КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, 6-7 квітня 2017. – Київ, 2017. – С. 145-150.
19. Андропова О.В. Моделювання роботи фототермоелектричного перетворювача / О.В. Андропова, В.В. Курак, С.С. Григоренко // Вісник ХНТУ. – 2022. – №1(80). – С. 11-20.

20. Курак В.В. Експериментальне визначення потоку сонячного випромінювання із застосуванням паспортних параметрів модуля фотоелектричних перетворювачів / В.В. Курак, О.В. Андропова // Вісник ХНТУ. – 2021. – №1(76). – С.35-42.
21. Цуканов О.В. Методика визначення електричних параметрів діодів Шотткі / О.В. Цуканов, Ю.В. Діденко, Д.Д. Татарчук, О.Г. Драмарецький // MicrosystElectronAcoust. – 2021. – Vol. 26, №3. – Р. 239868-1 – 239868-8.
22. Андропова О.В. Моделювання роботи фотоелектричних панелей з використанням середовища MATLAB/Simulink / О.В. Андропова, В.В. Курак, Н.Л. Дон // Вісник ХНТУ. – 2021. – №3(78). – С. 11-19.
23. Шаповалов В.А. Проблемы получения чистого кремния для солнечной энергетики / В.А. Шаповалов, И.В. Шейко, Ю.А. Никитенко, В.В. Якуша, В.В. Степаненко // Сучасна електрометалургія. – 2012. – №3. – С. 48-53.
24. Мазур Т.М. Сонячні елементи на основі тонких плівок CdTe (II частина) / Т.М. Мазур, М.П. Мазур, І.В. Вакалюк // Physics and Chemistry of Solid State. – 2023. – Vol. 24, №1. – Р. 134-145.
25. Харченко Н.М. Оптимизация технологии “хлоридной” обработки тонких пленок халькогенидов кадмия / Н.М. Харченко, Г.С. Хрипунов, Т.А. Ли // Фізична інженерія поверхні. – 2008. – Т.6, №3-4. – С. 128-133.
26. Косяченко Л.А. Перспективи застосування тонкоплівкового телуриду кадмію в сонячній енергетиці / Л.А. Косяченко, Є.В. Грушко // Український фізичний журнал. Огляди. – 2012. – Т. 7, №1. – С. 3 – 30.

### **Інформаційні ресурси**

27. POWER. Data Access Viewer [Електронний ресурс] // NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources [сайт]. – Режим доступу: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (дата звернення: 12.07.2023). – Назва з екрану.
28. NREL [сайт]. – Режим доступу: <https://www.nrel.gov/index.html> (дата звернення: 16.08.2023). – Назва з екрану.

29. Avenston. Публікації [Електронний ресурс] // Avenston [сайт]. – Режим доступу: <https://avenston.com/articles/> (дата звернення: 22.08.2023). – Назва з екрану.
30. Industrial Silicon Solar Cells / M.C. Raval, S.M. Reddy [Electronic resource] // IntechOpen [Site]. – Access mode: <https://www.intechopen.com/chapters/67140> (last access: 10.09.23). - Title from the screen.
31. Silicon Wafer Production [Electronic resource] // DS New Energy [Site]. – Access mode: <https://www.dsneg.com/info/silicon-wafer-production-49720212.html> (last access: 10.09.23). - Title from the screen.
32. Огляд сучасних технологій сонячних панелей [Електронний ресурс] // Eco Tech Ukraine [сайт]. – Режим доступу: <https://eco-tech.com.ua/ua/a470336-obzor-sovremennyh-tehnologij.html> (дата звернення: 15.09.2023). – Назва з екрану.
33. N Type IBC Solar Cell [Electronic resource] // DS New Energy [Site]. – Access mode: <https://www.dsneg.com/solar-cells/n-type/n-type-ibc-solar-cell.html> (last access: 20.09.23). - Title from the screen.
34. CdTe Thin Films: Deposition Techniques and Applications / A. Arce-Plaza et al. [Electronic resource] // IntechOpen [Site]. – Access mode: <https://www.intechopen.com/chapters/62664> (last access: 22.09.23). - Title from the screen.
35. What Are Cadmium Telluride (CdTe) Solar Panels? [Electronic resource] // Solarbuy.com [Site]. – Access mode: <https://solarbuy.com/solar-101/cdte-cadmium-telluride-solar-panels/> (last access: 22.09.23). - Title from the screen.
36. CIGS Solar Cell Technology [Electronic resource] // DS New Energy [Site]. – Access mode: <https://www.dsneg.com/info/cigs-solar-cell-technology-32692187.html> (last access: 24.09.23). - Title from the screen.
37. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния [Електронний ресурс] // MSD.com.ua [сайт]. – Режим доступу: <https://msd.com.ua/tonkoplenochnye-solnechnye-elementy-na-osnove-kremniya/> (дата звернення: 15.10.2023). – Назва з екрану.

38. Органічні сонячні панелі – нова технологія [Електронний ресурс] // Solar Garden [сайт]. – Режим доступу: <https://www.solargarden.com.ua/organichni-sonyachni-paneli-nova-tehnologiya/> (дата звернення: 12.11.2023). – Назва з екрану.
39. Комірка Гретцеля [Електронний ресурс] // Інтеллект [сайт]. – Режим доступу: <https://intellect.icu/yachejka-grettselya-sensibilizirovannyj-krasitelem-solnechnyj-element-dssc-9133> (дата звернення: 12.11.2023). – Назва з екрану.
40. Перспективні технології фотоелектричної сонячної енергетики [Електронний ресурс] // Разумков Центр [сайт]. – Режим доступу: <https://razumkov.org.ua/statti/perspektyvni-tekhnologii-fotoelektrychnoi-soniachnoi-energetyky> (дата звернення: 15.11.2023). – Назва з екрану.
41. An Introduction To Perovskites And Perovskite Solar Cells [Electronic resource] // DS New Energy [Site]. – Access mode: <https://www.dsneg.com/info/an-introduction-to-perovskites-and-perovskite-35149539.html> (last access: 20.11.23). - Title from the screen.
42. PbS Colloidal Quantum Dot Inks for Infrared Solar Cells [Electronic resource] // Science Direct [Site]. – Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004220309500> (last access: 22.11.23). – Title from the screen.
43. Прорив у ефективності кремнієвих панелей [Електронний ресурс] // AW Term [сайт]. – Режим доступу: [https://aw-therm.com.ua/kremniyevi-paneli-proriv-u-efektivnosti?fbclid=IwAR15GyScTKgd\\_fLVS](https://aw-therm.com.ua/kremniyevi-paneli-proriv-u-efektivnosti?fbclid=IwAR15GyScTKgd_fLVS) (дата звернення: 22.11.2023). – Назва з екрану.
44. Типи сонячних батареї та їх ККД [Електронний ресурс] // Енергія природи. Інформаційний портал про альтернативні джерела енергії у світі та Україні [сайт]. – Режим доступу: <https://alternative-energy.com.ua/uk/tipi-sonyachnih-batarej-ta-ih-kkd/> (дата звернення: 28.11.2023). – Назва з екрану.
45. LG290N1C-G3. Product Specifications [Electronic resource]. – Access mode: <https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMC384/2019-2020/3%CE%BF%20%CE%9C%CE%AC%CE%B8%CE%B7%CE%BC%CE>

- %B1%20-%20PVLIV%20I/MonoX-Neon-LG290N1C-G3-20140915.pdf (last access: 28.11.23). – Title from the screen.
46. Вплив тіні на роботу сонячних батарей [Електронний ресурс] / SolarSoul.net [Сайт]. – Режим доступу: <https://solarsoul.net/vliyanie-teni-na-rabotu-solnechnux-batarej> (дата звернення: 28.11.23). – Назва з екрану.
47. Сонячні батареї з Half-Cell модулями: основні переваги [Електронний ресурс] / Grand Overon [Сайт]. – Режим доступу: <https://grand-overon.in.ua/alternativnaja-jenergetika-stati/sonyachn-batare-z-half-cell-modulyami-osnovn-perevagi.html> (дата звернення: 30.11.23). – Назва з екрану.
48. Статті [Електронний ресурс] / Solar-Tech [Сайт]. – Режим доступу: <https://solar-tech.com.ua/ua/articles/> (дата звернення: 1.12.23). – Назва з екрану.
49. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Офіційний вебпортал Регулятора [Сайт] – Режим доступу: <https://www.nerc.gov.ua/> (дата звернення: 1.12.23). – Назва з екрану.
50. Автономна сонячна електростанція 170 Вт для дачі [Електронний ресурс] / Solar-master [Сайт]. – Режим доступу: <https://solar-master.com.ua/ua/p1164657391-solnechnaya-avtonomnaya-elektrostantsiya.html> (дата звернення: 1.12.23). – Назва з екрану.
51. Портативні сонячні панелі для автономного електроживлення [Електронний ресурс] / Jackery Ukraine [Сайт]. – Режим доступу: <https://jackery.pro/soniachni-paneli/> (дата звернення: 2.12.23). – Назва з екрану.



## ДОДАТОК

### Правила техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт

#### I. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Причинами нещасних випадків найчастіше є недотримання правил з охорони праці та неуважне або безвідповідальне ставлення до роботи, що виконується.

1.1. Дана інструкція розроблена для студентів у відповідності з «Положенням про розробку інструкцій у ХНТУ» і діє в лабораторіях кафедри енергетики, електротехніки і фізики при виконанні лабораторних робіт.

1.2. Викладач (лаборант або інженер) зобов'язаний перед початком виконання лабораторних робіт ознайомити студентів з даною інструкцією, про що має бути зроблено запис у «Журналі реєстрації інструктажу з охорони праці», завірений підписом кожного студента і підписом особи, яка проводила інструктаж. Особи, які не пройшли вступний та первинний інструктаж не допускаються до виконання лабораторних робіт.

1.3. Робоче місце повинне бути чистим і вільним від зайвого інструменту, матеріалів, портфелів, сумок тощо.

1.4. Перед виконанням лабораторної роботи викладач зобов'язаний ознайомити студентів з методами правильної і безпечної роботи на робочому місці, указати небезпечні зони працюючих приладів та обладнання.

1.5. При роботі з нагрівальними приладами слід дотримуватись заходів протипожежної і електробезпеки.

1.6. Не дозволяється працювати в одязі з широкими і довгими рукавами, а також працювати з хімічними речовинами без засобів індивідуального захисту (халати, нарукавники, гумові рукавички, захисні окуляри, респіратори).

1.7. Забороняється зберігати, приймати їжу, палити, використовувати косметику у лабораторіях кафедри.

#### II. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ПЕРЕД ПОЧАТКОМ РОБОТИ

2.1. Усі питання, що пов'язані з роботою у лабораторії, необхідно

вирішувати з викладачем, інженером або лаборантом, чітко визначати порядок і правила безпечного проведення дослідів. Будь-які роботи виконуються тільки в присутності викладача або інженера (лаборанта).

2.2. Забороняється перебування студентів у лабораторіях і службових приміщеннях кафедри фізичної електроніки та енергетики без викладача або інженера (лаборанта).

2.3. Всі прилади, інструменти, хімічні речовини і реактиви, необхідні для виконання поточної лабораторної роботи, студентам видає завідувач лабораторією або старший лаборант в кількостях, необхідних для виконання цієї роботи.

2.4. Перед включенням обладнання необхідно прибрати будь-які речі та інструменти, які можуть заважати його роботі.

2.5. Включення приладів та обладнання студентами допускається тільки з дозволу викладача або інженера (лаборанта), під керівництвом і постійним наглядом за виконанням роботи студентами.

2.6. Про виявлені недоліки або несправності в роботі обладнання тощо, негайно доповідайте викладачу або інженеру (лаборанту).

### III. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС РОБОТИ

3.1. Необхідно виконувати лабораторну роботу тільки у тій послідовності, яка викладена в затверджених належним чином методичних вказівках до даної роботи.

3.2. Під час роботи на епітаксійних печах, установках вакуумного осадження, термокомпресійного зварювання, фотолітографії, лазерах, користуванням вимірювальними приладами тощо, викладач повинен ознайомити студентів з небезпечними зонами цих установок, якими можуть бути: теплові труби, нагрівальні елементи, струмоведучі частини, джерела когерентного випромінювання, а також ємності зі зрідженими та стисненими газами, вакуумні камери, шланги та місця їх з'єднання.

3.3. Студентам не дозволяється самостійно користуватись балонами зі зрідженими та стисненими газами, а також установками, що працюють з

використанням цих газів.

3.4. Забороняється користуватись несправними інструментами та вимірювальними приладами.

3.5. Забороняється використовувати електрообладнання відкритого типу а також не промислового виготовлення.

3.6. Забороняється використовувати електрообладнання, яке не має захисного заземлення або занулення. При виявленні їх відсутності негайно доповідайте викладачу або інженеру (лаборанту).

3.7. Забороняється класти на електричні прилади особисті речі та одяг.

3.8. Забороняється дивитись у вихідні отвори лазерних резонаторів.

3.9. Під час роботи з обладнанням, яке містить скляні деталі, або з виробами зі скла необхідно:

- користуватися скляними трубками, що мають оплавлені краї;
- використовувати скляні деталі та посуд без тріщин;
- не допускати різких змін температури і механічних ударів.

3.10. При виявленні несправностей обладнання, іскріння електродротів, витоку газів, запаху гарі, диму тощо слід негайно повідомити викладача або інженера (лаборанта).

3.11. Студентам забороняється самостійно усувати будь-яку несправність обладнання.

#### IV. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ

4.1. Після закінчення роботи студенти під контролем викладача або інженера (лаборанта) зобов'язані вимкнути обладнання та прилади, що використовувались під час лабораторної роботи.

4.2. Студенти зобов'язані прибрати інструменти, прилади, матеріали на місце їх зберігання.

4.3. Студенти мають привести в належний стан робочі місця та сповістити про закінчення лабораторної роботи викладача або інженера (лаборанта).

4.4. Про виявлені недоліки докласти викладачеві або інженеру (лаборанту).

## V. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ В АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1. При виникненні загорання в приміщенні лабораторії необхідно відразу ліквідувати його за допомогою вогнегасника, води, вогнетривкого покривала, тощо.

5.2. У разі виникнення пожежі необхідно:

- повідомити викладача або інженера (лаборанта);
- зачинити вікна і двері, щоб вогонь не поширювався до сусідніх приміщень;
- за допомогою викладача повідомити пожежну охорону за телефоном «101»;
- приступити до ліквідації осередку вогню.

5.3. Ліквідацією осередку вогню, в разі можливості, займаються викладачі, інженери та лаборанти. Студенти не приймають участь у гасінні вогню. Вони повинні якомога швидше залишити приміщення і спокійно рухатись у напрямку виходу з будівлі, не створюючи перешкоджань на шляхах евакуації.

5.4. Електропроводку під напругою гасити водою або пінним вогнегасником **забороняється**, її слід гасити піском, вогнетривким покривалом або порошковим вогнегасником. Знеструмлену електропроводку можна гасити будь-яким вогнегасником.

5.5. У разі травмування (поранення, опіки, тощо) або при виникненні недомагання слід негайно повідомити викладача або інженера (лаборанта).

*Навчальне електронне видання*

Курак Владислав Володимирович  
Андропова Олена Валеріївна  
Дон Наталя Леонідівна

## **ОСНОВИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ**

**Навчальний посібник**  
для студентів спеціальності  
141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ISBN 978-617-8187-07-1 (електронне видання)**

Відповідальний за випуск: Дон Н.Л.

Підписано до видання 29.02.2024 р. Формат 60×84/8.

Гарнітура Times.

Ум. друк. арк. 32,16. Обл.-вид. арк. 34,58.

Замовлення №3091.



Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С.  
Свідоцтво про внесення до державного реєстру суб'єктів видавничої справи:  
Серія ХС №48 від 14.04.2005 р.  
Видано Управлінням у справах преси та інформації  
73000, Україна, м. Херсон, вул. Соборна, 2.  
Тел. +38(050)133-10-13  
e-mail: printvvs@gmail.com