

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем  
Кафедра електроніки та наносистем

## **ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему Сонячна панель на базі наноструктурних елементів. Частина 1.  
Дослідження та розробка структури сонячного елемента на наноструктурній  
основі  
08-05.МКР.171.07.000

Виконав: студент 2-го курсу, групи ЕЛ-18м,  
спеціальності 171 – «Електроніка»

(шифр і назва спеціальності)

Проворов Є. С.

(Прізвище та ініціали)

Керівник, к.ф.-м.н., професор

Кравченко Ю. С.

(Прізвище та ініціали)

Рецензент, к.т.н., професор кафедри ТКСТБ

Барась С. Т.

(Прізвище та ініціали)

Вінниця – 2019 р.

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем  
Кафедра електроніки та наносистем  
Освітньо-кваліфікаційний рівень – магістр  
Спеціальність 171 – «Електроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
завідувач кафедри ЕНС  
д.т.н., проф. Білинський Й.Й

---

«3» вересня 2019р.

**ЗАВДАННЯ**  
**ДО МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

Проворову Єгору Сергійовичу

1. Тема МКР: Сонячна панель на базі наноструктурних елементів. Частина 1. Дослідження та розробка структури сонячного елемента на наноструктурній основі

науковий керівник роботи Кравченко Ю. С. к.ф.-м.н., професор

затверджено наказом ВНТУ від «3» вересня року №.254

2. Строк подання студентом роботи: 11.12.2019

3. Вихідні дані для виконання роботи:

Дослідити та розробити структуру сонячного елемента з використанням чорного кремнію, гетеропереходів на основі NiO та TiO<sub>2</sub>, прозорих провідних оксидів SiO<sub>2</sub> та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Провести моделювання запропонованої структури сонячного елемента на предмет досягнення ефективності сонячного елемента на рівні не гірше, ніж 25%. Запропонувати технологію виготовлення даних сонячних елементів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз сучасного стану сонячних панелей; схематичне зображення

структури сонячного елемента, методи та технології виготовлення сонячної панелі; заходи з охорони праці та навколишнього середовища, розрахунки з економіки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):  
структура сонячного елемента, енергетичні діаграми, параметри та характеристики сонячного елемента.

6. Консультанти розділів МК роботи

1. Науковий керівник \_\_\_\_\_ канд. фіз.-мат. наук, професор кафедри ЕНС  
(підпис) наук. ступінь, вчене звання (посада)

Ю. С. Кравченко

ініціали та прізвище

2. Економічна частина \_\_\_\_\_  
(підпис)

ст. викл. кафедри ЕПВМ

наук. ступінь, вчене звання (посада)

В. В. Кавецький

ініціали та прізвище

3. Охорона праці \_\_\_\_\_  
(підпис)

канд. техн. наук, доц. кафедри БЖДПБ

наук. ступінь, вчене звання (посада)

О. В. Березюк

ініціали та прізвище

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Дата попереднього захисту «11» вересня 2019 р.

Рецензент \_\_\_\_\_  
(підпис)

канд. техн. наук, професор кафедри ТКСТБ  
наук. ступінь, вчене звання (посада)

С. Т. Барась

ініціали та прізвище

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Завдання видав

науковий керівник \_\_\_\_\_ Ю. С. Кравченко, к.ф.-м.н., професор  
(підпис)

«02» вересня 2019 р.

Завдання отримав магістрант \_\_\_\_\_ Є. С. Проворов  
(підпис)

«02» вересня 2019 р.

## РЕФЕРАТ

### **Проворов Єгор Сергійович**

«Сонячна панель на базі наноструктурних елементів. Частина 1. Дослідження та розробка структури сонячного елемента на наноструктурній основі». Магістерська кваліфікаційна робота – 72 використаних джерела, - 115 с, - 8 додатків.

У роботі розглянуто основні структури сонячних елементів, а також були виділені основні їх недоліки та можливе вирішення їх. Запропоновано структуру сонячного елемента та технологію виготовлення його основних складових компонентів. В роботі наведені основні енергетичні діаграми та характеристики запропонованого сонячного елемента. Проведена оцінка ефективності даного сонячного елемента, яка за розрахунками дорівнює приблизно 28%. При моделюванні використовувалися проекти ISIS Proteus та ARES PCB Layout та MatLab.

## ABSTRACT

### **Provorov Yehor**

« Nano-based solar panel. Part 1. Research and development of nanostructured solar cell structure ». Master's qualification work - 72 sources used, - 115 p, - 8 applications.

The basic structures of solar cells are considered in the work, as well as their main shortcomings and possible solutions are highlighted. The structure of the solar cell and the manufacturing technology of its main constituent components are proposed. The main energy diagrams and characteristics of the proposed solar cell are presented in the paper. The efficiency of this solar cell is estimated to be approximately 28%. ISIS Proteus and ARES PCB Layout and MatLab projects were used in the simulation.

## ЗМІСТ

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Оглавление                                                                                         | 7  |
| ВСТУП                                                                                              | 7  |
| 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЩОДО РОЗРОБКИ ТА ВИКОРИСТАННЯ<br>СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ НА НАНОСТРУКТУРНІЙ ОСНОВІ | 10 |
| 1.1 Загальна характеристика сонячних панелей                                                       | 11 |
| 1.1.1 Сонячні панелі на базі кремнієвих структур                                                   | 11 |
| 1.1.2 Порівняння сонячних кремнієвих панелей                                                       | 12 |
| 1.2 Сучасний стан технології кремнієвих сонячних батарей                                           | 17 |
| 1.2.1 Технологія р-n легованого гомопереходу                                                       | 17 |
| 1.2.2 Технологія гетеропереходу аморфного кремнію                                                  | 18 |
| 1.2.3 Технологія гетеропереходу метал оксид-кремній                                                | 20 |
| 1.3 Використання наноструктур для підвищення ефективності<br>енергоперетворення сонячних елементів | 22 |
| 1.3.1 Використання поруватого кремнію                                                              | 22 |
| 1.3.2 Використання чорного кремнію                                                                 | 25 |
| 1.4 Оцінювання наукового, технічного та економічного рівня науково-<br>дослідної роботи            | 27 |
| 1.5 Оцінювання комерційного потенціалу розробки                                                    | 29 |
| 1.6 Прогнозування витрат на виконання НДДКР                                                        | 32 |
| 1.7 Доцільність науково-дослідної роботи                                                           | 35 |
| 1.8 Висновки                                                                                       | 36 |
| 2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА НА<br>НАНОСТРУКТУРНІЙ ОСНОВІ                               | 38 |
| 2.1 Фізичні основи роботи сонячних елементів                                                       | 38 |
| 2.1.1 Фотоелектричний ефект                                                                        | 38 |
| 2.1.2 Принципи розподілу заряду                                                                    | 41 |
| 2.1.3 Кремній як домінуючий енергетичний елемент                                                   | 45 |
| 2.2 Процес наноструктурування чорного кремнію                                                      | 48 |
| 2.3 Морфологія та властивості чорного кремнію                                                      | 52 |
| 2.4 Поверхнева пасивація $Al_2O_3$                                                                 | 54 |
| 2.4.1 Опис процесу ALD                                                                             | 54 |
| 2.4.2 ALD процес для $Al_2O_3$                                                                     | 56 |
| 2.5 Утворення гетеропереходу та нанесення $TiO_2$                                                  | 59 |
| 2.6 $NiO$ як несучий селективний контакт р-типу                                                    | 61 |
| 2.7 Формування кінцевої структури сонячного елемента та опис результатів                           | 64 |
| 3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ                                                | 69 |
| 3.1 Гігієна праці та виробнича санітарія                                                           | 69 |
| 3.1.1 Склад повітря робочої зони та мікроклімат                                                    | 69 |
| 3.1.2 Виробниче освітлення                                                                         | 70 |
| 3.1.3 Виробничі віброакустичні коливання                                                           | 76 |
| 3.1.4 Виробничі випромінювання                                                                     | 77 |
| 3.2 Промислова та пожежна безпека при проведенні дослідження                                       | 77 |

|                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.1 Безпека щодо організації робочих місць.....                                                                                             | 77  |
| 3.2.2 Електробезпека.....                                                                                                                     | 78  |
| 3.2.3 Пожежна безпека.....                                                                                                                    | 78  |
| 3.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи сонячної панелі в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій..... | 79  |
| 3.3.1 Дослідження безпеки роботи сонячної панелі в умовах дії іонізуючих випромінювань.....                                                   | 80  |
| 3.3.2 Дослідження безпеки роботи сонячної панелі в умовах дії електромагнітного імпульсу.....                                                 | 81  |
| 3.4 Висновки.....                                                                                                                             | 83  |
| 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....                                                                                                                     | 84  |
| 4.1 Розрахунок витрат на проведення НДДКР стосовно дослідження та розробки структури сонячного елемента на наноструктурній основі.....        | 84  |
| 4.2 Нарахування на заробітну плату дослідників та працівників.....                                                                            | 87  |
| 4.3 Амортизація обладнання для проведення досліджень.....                                                                                     | 89  |
| 4.4 Визначення коефіцієнта наукової значимості отриманих результатів науково-дослідної роботи.....                                            | 92  |
| 4.5 Внесок дослідника в досягнення отриманих результатів НДР.....                                                                             | 93  |
| 4.6 Висновки до розділу.....                                                                                                                  | 94  |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                                                                 | 95  |
| СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                                                                               | 96  |
| Додаток А Технічне завдання.....                                                                                                              | 104 |
| Додаток Б Процес RIE для формування наноструктур чорного кремнію.....                                                                         | 107 |
| Додаток В Процес ALD.....                                                                                                                     | 108 |
| Додаток Г Результати пасивації для вирощених плівок $Al_2O_3$ .....                                                                           | 109 |
| Додаток Д Процес утворення структури сонячного елемента.....                                                                                  | 110 |
| Додаток Е Енергетична зонна діаграма сонячного елемента.....                                                                                  | 111 |
| Додаток Є Сонячний елемент.....                                                                                                               | 112 |
| Додаток Ж Допустимі значення виробничих чинників.....                                                                                         | 113 |

## **ВСТУП**

### **Актуальність теми**

Одним із перспективних напрямів відновлювальних джерел енергії, що в останні роки дуже активно впроваджуються в світову промисловість і побут – є сонячна енергетика. Матеріали, які використовуються в даний час для фотовольтаїки, включають монокристалічний, полікристалічний, аморфний кремній. Крім кремнієвих використовуються різновиди арсенід-галієвих, органічних і багат шарові типи батарей.

За останні роки фотоенергетика отримала значний розвиток завдяки прогресу у вирішенні основних проблем: підвищення ККД сонячних фотоперетворювачів та зменшення вартості їх виробництва. Це досягається за рахунок підвищення антивідбивних властивостей або ефективного розподілу зарядів.

Підвищення рівня антивідбивних властивостей сонячного елемента можливе за рахунок використання голкоподібної структури, а для ефективного розподілу зарядів можливе використання гетеропереходів.

### **Мета дослідження**

Метою роботи є підвищення ефективності сонячного елемента

### **Задачі дослідження:**

проаналізувати існуючі сонячні елементи, виявити їх переваги та недоліки та обрати найбільш оптимальний принцип побудови структури;  
запропонувати структуру сонячного елемента;  
провести дослідження структури запропонованого сонячного елемента та проаналізувати його ефективність в реальних умовах використання;  
навести аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів у виробничому приміщенні.

розглянути деякі питання економічної доцільності та провести відповідні розрахунки.

**Об'єктом дослідження** є процес перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію.

**Предметом дослідження** є параметри та характеристики сонячного елемента.

**Методи дослідження:**

аналіз літературних джерел;  
математичне моделювання з використанням пакету ISIS PROTEUS та ARES PCB Layout, MatLab.

**Апробація результатів роботи**

Апробація результатів даної роботи пройшла на XV Міжнародній науково-практичній конференції «Вісті сучасної науки - 2019» Шефїлд, Publishing House “Science and Education”, 2019. – 3 с., на XLVII Науково-технічній конференції факультету інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем Вінницького національного технічного університету 22 березня 2018 року та на XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні наукові досягнення - 2018». Тези доповідей опубліковані [1-3].



## **Наукова новизна роботи**

Вперше запропоновано структуру сонячного елемента на основі використання чорного кремнію та гетеропереходів на базі використання використання прозорих провідних оксидів.

## **Структура роботи**

Магістерська класифікаційна робота складається з чотирьох розділів. В першому розділі проведено аналіз існуючих сонячних елементів, відзначені переваги та недоліки тих чи інших варіантів їх реалізації, а також особливості їх структурного виконання. В другому розділі були розглянуті основні питання фізики процесу роботи фотоелементів, було розглянуто технологію виготовлення сонячної панелі на наноструктурній основі та запропоновано її структуру. Третій розділ містить рекомендації щодо поліпшення умов роботи, розраховує і вибирає метод захисту від переважаючого шкідливого чи небезпечного фактору виробництва і включає в себе норми пожежної безпеки. В п'ятому розділі було розглянуто питання економічної доцільності, як зростання чистого прибутку, абсолютна і відносна ефективність вкладених інвестицій та термін їх окупності.

## **1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЩОДО РОЗРОБКИ ТА ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ НА НАНОСТРУКТУРНІЙ ОСНОВІ**

XXI століття стало віком інформації, про що свідчить значний розвиток обчислювальної техніки, персональних мобільних пристроїв, різноманітних методів та систем оперативної обробки даних, телекомунікацій та мережевих інформаційних технологій в середовищі Internet. Також прогнози експертів світового ринку щодо щорічного збільшення на 10-15% споживання енергоресурсів в сукупності із значним подорошанням вартості енергоресурсів свідчать і про те, що XXI століття стає епохою енергозбереження та енергоощадних технологій, що дозволяють не тільки заощаджувати природні ресурси і забезпечувати енергетичну автономність і стабільність, але й також дозволяють значно зменшити негативний вплив індустріалізації на навколишнє середовище і його екосистеми [4].

Одним із перспективних напрямів відновлювальних джерел енергії, що в останні роки дуже активно впроваджуються в світову промисловість і побут – є сонячна енергетика. Завдяки «зеленим» технологіям сонячні енергетичні системи і пристрої дозволяють здійснювати ефективний виробіток електричної і теплової енергії, завдяки природнім, практично не вичерпним можливостям світлового випромінювання Сонця із найменшим впливом на екологічний стан довкілля. Розробки і промислова продукція в цій області на сьогодні дуже активно розвиваються в таких країнах як Німеччина, США,

Великобританія, Японія, Корея та Китай і становлять вагомий відсоток енергетичного виробітку в світі [4].

Сучасна сонячна енергетика ділиться на дві галузі:

- сонячна теплоенергетика, що передбачає використання теплового випромінювання енергії безпосередньо від сонця для нагрівання теплоносія та подальшої подачі його на об'єкти обігріву (пристрої, які використовуються при цьому називають сонячними тепловими колекторами, в якості носія у них використовується здебільшого вода);

- сонячна електроенергетика або фотовольтаїка – передбачає перетворення спектрального випромінювання сонця безпосередньо в електричну енергію, шляхом використання внутрішнього фотоефекту в напівпровідникових фотоелектричних перетворювачах (ФЕП) та їх конструкцій – сонячних батарей та модулів з великою активною площею.

Фотоелектричне перетворення сонячної енергії в даний час є одним із пріоритетних напрямів використання сонячної енергії, що обумовлюється наступним:

- можливістю отримання електроенергії практично в будь-якому районі;
- екологічною чистотою перетворення енергії;
- значним терміном роботи;
- невеликими затратами на обслуговування;
- незалежністю ефективності перетворення сонячної енергії від встановленої потужності.

За останні роки фотоенергетика отримала значний розвиток завдяки прогресу у вирішенні основних проблем: підвищення ККД сонячних фотоперетворювачів та зменшення вартості їх виробництва [5].

## **Загальна характеристика сонячних панелей**

### **1.1.1 Сонячні панелі на базі кремнієвих структур**

Сонячні панелі можна класифікувати по інтенсивності збирання світла, по хімічному складу, товщині й кристалічній структурі шарів, кількості сполучених на одній підкладці елементів і т.д.

За кристалічним складом поглинаючого матеріалу сонячні елементи підрозділяються на монокристалічні, мультикристалічні, полікристалічні, мікрокристалічні, нанокристалічні [6]. Монокристалічні сонячні елементи являють собою сонячні елементи з поглиначем у вигляді цільного кристала напівпровідникової речовини. Мульти-, полі-, мікро- і нанокристалічні СЕ мають у якості поглинаючої речовини суміш напівпровідникових кристалітів з різною орієнтацією, структурою й формою, розмір яких і визначає тип сонячного елемента при розмірах кристалітів від 1 до 100 мм речовину називають мультикристалічною, від 1 до 1000 мкм – полікристалічною, менш 1 мкм – мікрокристалічною, менш 1 нм – нанокристалічною [7].

Залежно від товщини світлопоглинаючого матеріалу сонячні елементи підрозділяються на тонкоплівкові й товстоплівкові. Тонкоплівкові сонячні елементи мають товщину в декілька мкм, товстоплівкові – у десятки або сотні мкм.

### 1.1.2 Порівняння сонячних кремнієвих панелей

Таблиця 1.1 - Переваги і недоліки фотоелектричних перетворювачів

| Тип ФЕП | Переваги | Недоліки | Область використання |
|---------|----------|----------|----------------------|
|---------|----------|----------|----------------------|

|                                                       |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ФЕП на основі монокристалічного кремнію Si (рис. 1.1) | Високий ККД (17- 19%); висока надійність (25-50 років роботи); стабільність параметрів протягом тривалого часу (падіння потужності до 80% від максим за 25 років експл.) | Більш висока вартість (2.5-3.3\$/Вт); менша технологічність; вища чутливість до рівня та кута джерела світла висока вартість отримання та енергозатратність технології виготовлення | Професійні сонячні енергосистеми; сонячні електростанції; 3) системи живлення космічних апаратів; 4) високоякісні приватні сонячні системи |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Продовження таблиці 1.1

|                                                          |                                                                                                                                    |                                                                                             |                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ФЕП на основі полікристалічного кремнію (рис. 1.2)       | нижча вартість (2.1-2.8\$/Вт); висока технологічність; стабільність параметрів (падіння пот. до 80% від максим за 25 років експл.) | дещо нижчий ККД (15-17%); -менша стабільність параметрів                                    | 1) широко поширені якісні сонячні енергосистеми; 2) малі електростанції; 3) покриття дахів будинків; 4) фотоелектричні побутові пристрої (зарядні пристрої моб. тел., ноутбуків, вимірювальна техніка)      |
| Тонкоплівкові ФЕП на основі аморфного кремнію (рис. 1.3) | висока технологічність низька вартість (1.5-2.4\$/Вт)                                                                              | низький ККД (7- 11%); нестабільність параметрів; низька надійність (строк служби 5-8 років) | 1) поширені більш дешеві приватні сонячні енергосистеми; 2) системи світлодіодного побутового освітлення; 3) побутові пристрої (калькулятори, аудіоплеєри, ліхтарики на сонячній батареї, зарядні пристрої) |



Рисунок 1.1 – Фотоелектричні перетворювачі на основі монокристалічного кремнію [8]

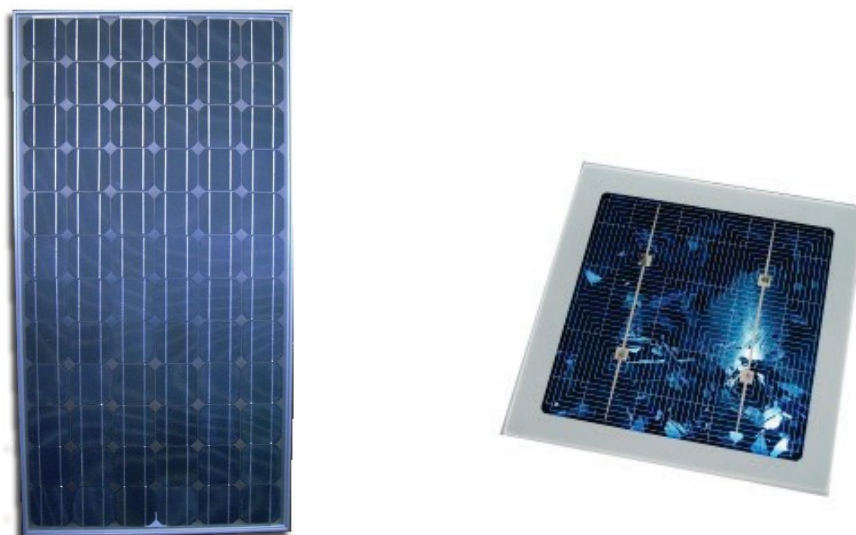


Рисунок 1.2 – Фотоелектричні перетворювачі на основі полікристалічного кремнію [17]



Рисунок 1.3 – Тонкоплівкові модулі ФЕП на основі аморфного кремнію

Кожен модуль сонячної батареї складається з 36, 72 або 96 окремих елементів ФЕП. Приведені на рисунках фотографії сонячних батарей для промислового і домашнього використання найчастіше застосовуються у вигляді модульних конструкцій, що монтуються на технологічні площадки і дахи будівель. В залежності від ККД матеріалу, різні типи сонячних панелей будуть мати різні площі робочі площі для отримання одного для всіх умовного значення потужності [9].

Промислові батареї збираються з окремих елементів, що з'єднуються проводами, після чого розміщуються між скляними пластинами і полімерними плівками для захисту. Тонкоплівкові елементи випускають вже в готових матрицях, іноді навіть у готових герметизованих корпусах, що забезпечують автоматичне позиціонування комірок ФЕП [18].

На рис. 1.4 і 1.5 приведено порівняння умовних площ батарей на 3-х різних типах фотоелементах, що необхідні для вироблення 1000 Вт (1кВт) електроенергії [10].

Сонячні батареї з аморфного кремнію монтують рідше в професійних системах, основна причина – занадто низькі ККД і надійність. Але ці сонячні батареї мають також і деякі переваги в порівнянні з кристалічним кремнієм:

менша товщина (активний шар до 100 разів тонший за кристалічний); тонкоплівкові ФЕП можуть приймати розсіяне і слабе сонячне світло (робота в затемнених місцях).

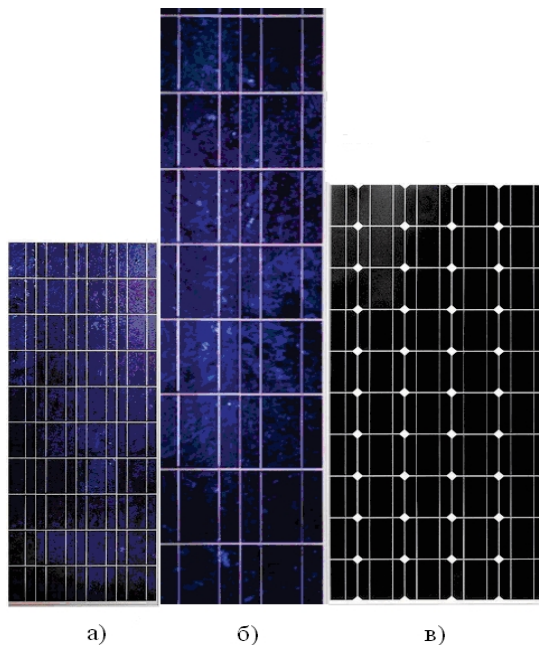


Рисунок 1.4 – Порівняння умовних площ модулів 3-х типів ФЕП для вироблення 1кВт електроенергії:

а) монокристалічного; б) полікристалічного; в) тонкоплівкового



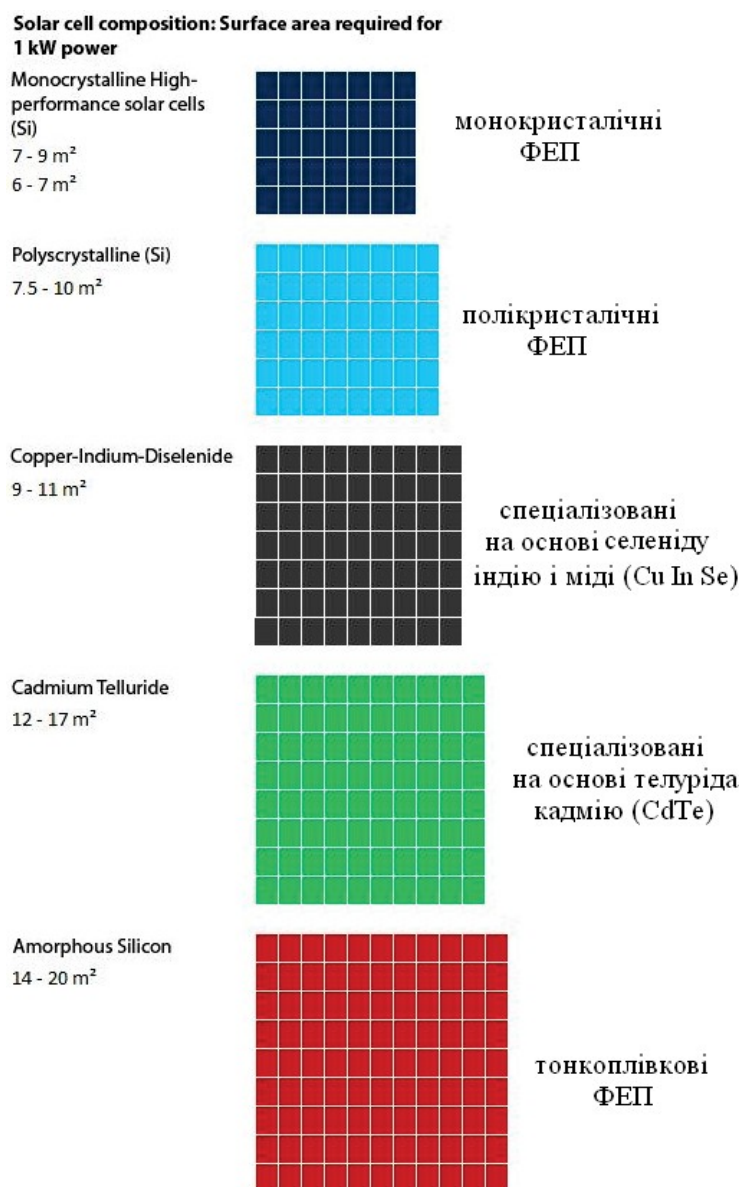


Рисунок 1.5 – Порівняння площ сонячних батарей на різних типах ФЕП для отримання 1кВт електроенергії: для монокристалічного 6-9 м<sup>2</sup>; полікристалічного 7.5- 10 м<sup>2</sup>; тонкоплівкового 14-20 м<sup>2</sup>

Тонкоплівкові батареї набагато толерантніше відносяться до затемнення та до вищих робочих температур, що характерні для роботи під яскравим сонцем. Але в тонкоплівкових ФЕП є вагомий недолік – щоб одержати такий же рівень енергії, як у кристалічних батарей, потрібно велика площа поверхні, через невисокий ККД [11].

## Сучасний стан технології кремнієвих сонячних батарей

### 1.2.1 Технологія p-n легованого гомопереходу

Технологія сонячних батарей гомопереходу Si була домінуючою протягом кількох десятиліть з 1954 року і перша ефективність 6% дозволила досягти 25% ефективності в 2000 році в університеті Нового Південного Уельсу в Австралії після багатьох випробувань і досліджень з їх відомою PERL(пасивований задній розсіювальний випромінювач) і більш пізньою PERC(пасивований задній розсіювальний випромінювальний контакт) архітектурою сонячних елементів [12], структуру яких показано на рис. 1.6 (а). В елементі PERL було кілька ключових технологічних особливостей:

- p-n гомоперехід утворився при високотемпературній (900-1000 C°) дифузії атомів фосфору в Si p-типу в верхній частині елементу PERL (рис. 1.6 (б), (г));
- місцеві анодні контакти в задній частині елементу були сформовані за допомогою оптичної літографії;
- при високотемпературній дифузії атомів бору в задню частину Si був сформований p<sup>+</sup>-р перехід і поле задньої поверхні (BSF).
- дифузія фосфору використовується для формування n<sup>+</sup>-р-переходу і поля передньої поверхні (FSF).
- Покращене уловлювання світла було досягнуто за допомогою методів оптичної літографії і анізотропного травлення для освітлення перевернутих пірамід на поверхні сонячного елементу.
- Селективний підхід випромінювача був реалізований з утворенням отворів для контактів в високоякісний, термічно вирощений діоксид кремнію для чудовою поверхневої пасивації.

## 1.2.2 Технологія гетеропереходу аморфного кремнію

Через складні технологічні етапи, такі як дифузія, пасивація оксиду, фотолітографія і висока температура обробки (до 1000 С°), найбільш актуальні сонячні елементи використовують технологію гетеропереходу Si (рис. 1.6 (b, d)). Перший успішний сонячний елемент досяг 20% ефективності перетворення енергії і був виготовлений на основі гетеропереходу з технологією тонкого внутрішнього шару (НІТ) в 2000 р. (рис. 1.6 (b)) [13], а потім з 23% ефективності до 24,7% в 2014 році із застосуванням гідрованого аморфного Si (a-Si: H) в якості пасивуючого і гетероперехідного матеріалу. З 2000 року багато приватних компаній і дослідні інститути починають концентруватися на технології сонячних елементів з гетеропереходів Si. Це була дуже перспективна технологія, що дозволяла значно знизити собівартість продукції і дозволити їй конкурувати за сонячні елементи з ВИКОПНИМ ПАЛИВОМ.

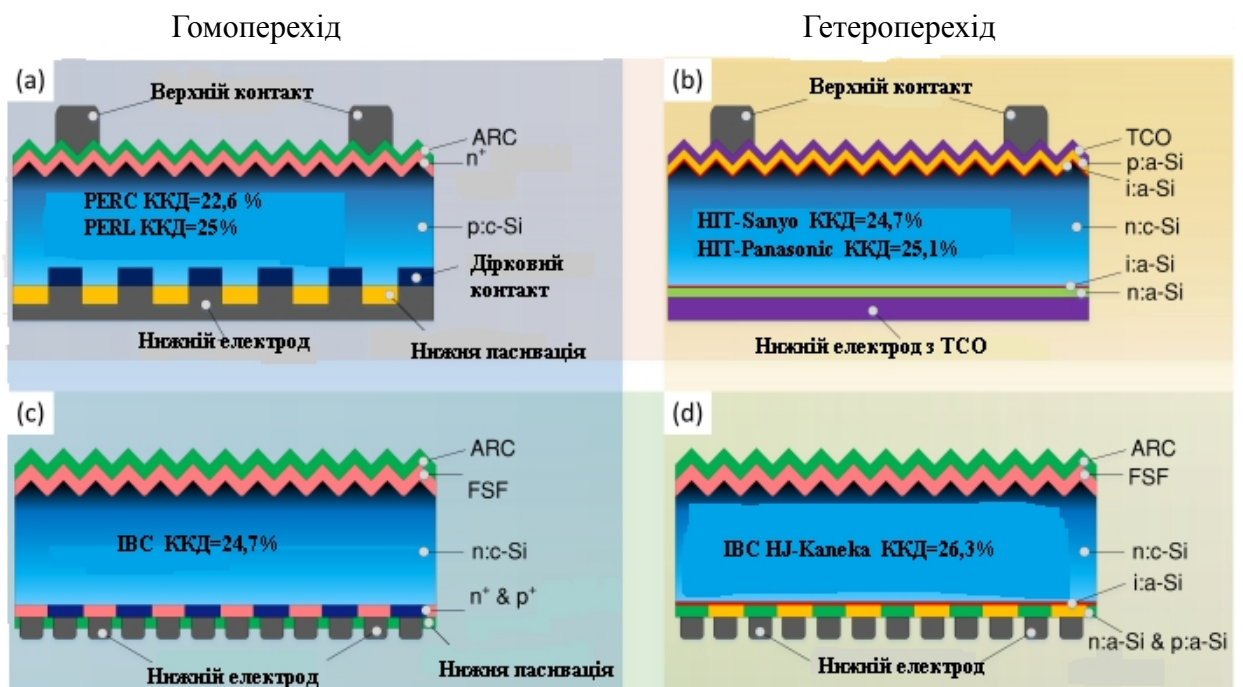


Рисунок 1.6 – Схематичне зображення структури типових сонячних елементів c-Si

Наступний рекорд НІТ-елементу був представлений Panasonic з 25,6% ефективністю в тому ж 2014 році [14] і зберігався він більше 2 років. З тих пір почалася нова гонка досліджень сонячних елементів. Японська компанія Kaneka в середині 2016 року повідомили, що вони встановили новий рекорд 26,3% з використанням великої площі (180 см<sup>2</sup>), c-Si сонячний елемент зі структурою зустрічного зворотного контакту (IBC) і несучими вибірковими контактами a-Si / c-Si.

Цей рекорд доводить, що гетероперехід стає домінуючою технологією і дає можливість використовувати доступну відновлювальну сонячну енергію. Технологія гетероперехідних елементів є успішною завдяки багатьом факторам і пропонує не тільки високу ефективність; вона також забезпечує значно спрощену послідовність виробничого процесу, що складається з 6 етапів процесу в порівнянні з 9 етапами в стандартній технології з гомопереходом. Технологія обробки гетеропереходів має в якості основного методу плазмове хімічне осадження парів (PECVD), яке дозволяє осадження шарів a-Si і метод фізичного осадження парів (PVD) для нанесення прозорих провідних оксидних шарів (TCO).

Рекорд сонячних батарей на основі технології гетеропереходу від Sanyo, потім Panasonic і, нарешті, компаній Kaneka стало можливим досягти за допомогою реалізації несучих селективних контактів(CSC) [15] на основі носіїв заряду a-Si: H / c-Si (електрони або дірки) з поглинача (наприклад, кремній). Така схема поділу носіїв трохи відрізняється від звичайного дифузійного p-n гомопереходу, оскільки рух електронів і дірок відповідає одному і тому ж фізичному закону. Однак ці схеми відрізняються в технологіях обробки, технологія гетеропереходів дозволяє домогтися високої ефективності перетворення енергії за нижчою ціною.

На сьогоднішній день найбільше широко використовується CSC у фотоелектричній технології аморфного гідрованого Si (a-Si: H), нанесений методом PECVD при температурі близько 200 С° на тонкі пасивуючі прослойки (власний a-Si: H або SiO<sub>2</sub>). Включення CSC у сонячні елементи

забезпечує безпечну технологію пасивації, зручну конструкцію та надійність процесу. Хоча CSC на основі a-Si: H і SiO<sub>2</sub> показали якісні характеристики, такі технології мають деякі фундаментальні проблеми, пов'язані з термостабільністю і паразитним поглинанням фотонів в плівках a-Si: H, складний процес осадження і досить високі виробничі затрати. Насправді існує цікава зацікавленість у розробці високоякісних CSC, які можуть бути легко осаджені з низькими затратами і з мінімальним використанням небезпечних матеріалів.

### 1.2.3 Технологія гетеропереходу метал оксид-кремній

Одною з найбільш перспективних груп матеріалів для CSC є оксиди перехідних металів (ТМО). ТМО були вперше використані в органічних та перовскітних сонячних елементах [16]. CSC показали потенціал в якості альтернативних CSC в кремнієвих фотоелектричних пристроях із-за низької вартості обробки включних процесів (атомні шари, термічне випаровування, розпилення, нанесені покриття методом центрифугування або розпилення). В якості дірково-селективного оксиду молібдена CSC (MoO<sub>x</sub>), оксиду нікеля (NiO<sub>x</sub>), оксиду ванадія (VO<sub>x</sub>) та оксиду вольфрама (WO<sub>x</sub>) [16] були досліджені у якості заміни слою a-Si: H p-типу у кремнієвих сонячних елементах із рекордною ефективністю: 22,5% і демонстрували подальший сприятливий прогрес, як видно з рис. 1.7.

Для електронно-селективного CSC n-типу TiO<sub>2</sub> є найбільш перспективним матеріалом в сонячних елементах на основі гетеропереходу [17]. TiO<sub>2</sub> має енергію забороненої зони 3.2 eV. TiO<sub>2</sub> інтенсивно досліджувався як дірковий шар в кремнієвих сонячних елементах. Єдиний гетероперехідний кремнієвий сонячний елемент з блокуванням задньої стінки TiO<sub>2</sub>-шар досяг ефективності 21,6%. Всі перераховані вище успіхи з ТМО CSCs наведені в таблиці нижче на рис. 1.7. Згідно з цим графіком ТМО вже успішно конкурували з технологіями гомопереходу і гетеропереходу

аморфного кремнію. Приблизно через 3 роки сонячні елементи на основі ТМО CSCs досягли прогресу в розвитку з рекордним ККД від 7% до 21% для базових пристроїв  $\text{TiO}_2$  і  $\text{MoO}_x$  [18].

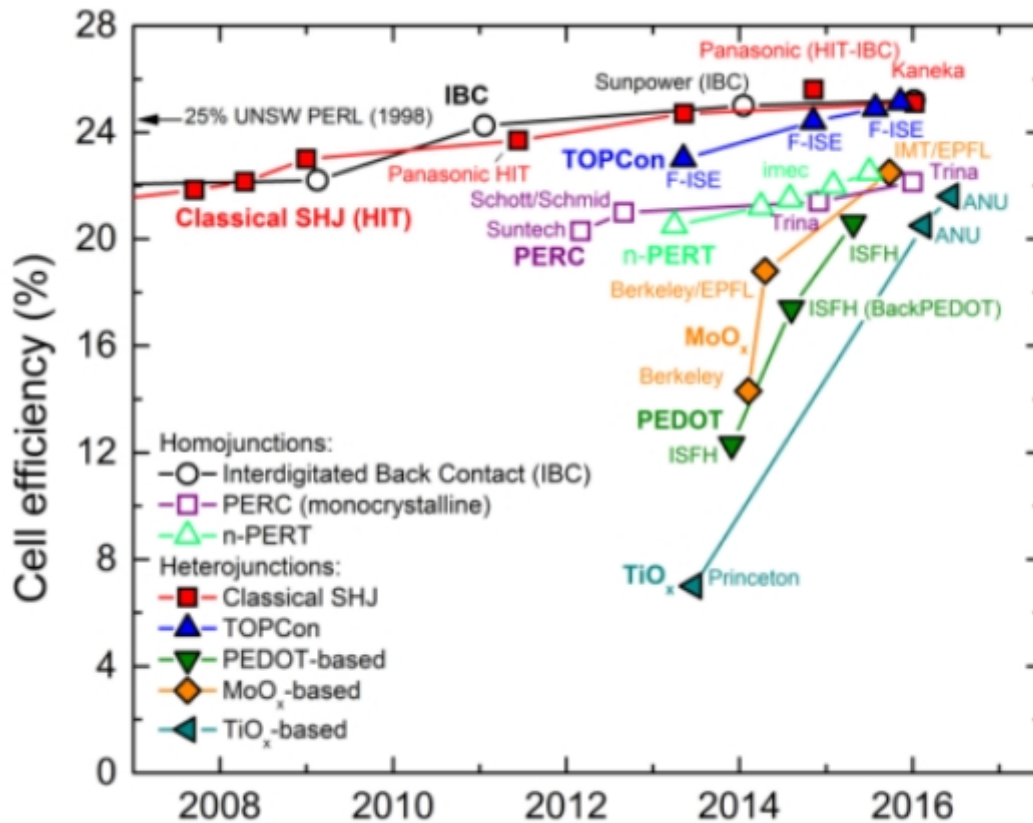


Рисунок 1.7 – Узагальнюючий графік рекордів ефективності для вибраного c-Si

Крім того, оксидні плівки покриті металом методом нанесення атомного шару (ALD) гарантують чудові пасивуючі властивості на поверхні зі складною морфологією. Стає можливим виготовити сонячні елементи з використанням ALD або інших низькотемпературних методів і зниження рівня витрат [18]. В поєднанні з передовими технологіями уловлювання світла, такими як реактивне іонне травлення для наноструктури чорного кремнію, сонячні елементи з гетеропереходів Si з CSC можуть бути сильним конкурентом для a-Si: H технології гетеропереходів. Основні переваги в

основному засновані на поєднанні цих матеріалів з технікою ALD, що також призводить до низької токсичності і низькотемпературному процесу осадження і в принципі можливість нанесення всіх функціональних тонких плівок в одній машині ALD. Такі переваги можуть спростити технологічний процес, знизити собівартість продукції в межах виробничої лінії і бюджету.

### **1.3 Використання наноструктур для підвищення ефективності енергоперетворення сонячних елементів**

#### **1.3.1 Використання поруватого кремнію**

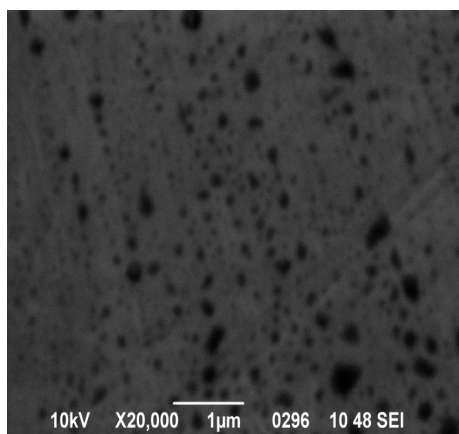
Можна використовувати в якості фронтальної поверхні сонячного елемента кремній мультипористої текстури. Метод «гібридної» технології на основі розвиненої кратеро- і колонообразної морфології кремнієвої поверхні дозволяє змінювати тип і розмірність мультипористої текстури в широкому діапазоні. Як хімічна, так і електрохімічна технологія, не вимагає термостабілізації, так як поруватий кремній формується при кімнатній температурі [19].

Поруватий кремній знаходить своє широке застосування для оптоелектронних пристроїв завдяки властивості антивідблиску. Цей матеріал має свої переваги, такі як: розширення забороненої зони, широкий спектр поглинання і високий діапазон оптичної передачі – 700-1000 нм. Високий ступінь шорсткості поверхні поруватого кремнію передбачає можливість його застосування в якості просвітлюючого покриття, фактурна поверхня зменшує відбиття світла. Крім того, розсіювання в  $\text{por-Si}$  можливе за рахунок шорсткості по відношенню до товщини пористого шару. Існують виготовлені сонячні елементи на основі  $\text{por-Si}$  з ККД 15,5 %. Підготовлені зразки шарів  $\text{por-Si}$  з різною пористістю були використані для виготовлення сонячних елементів, використовуючи наступну процедуру. Зразки були покриті фоторезистом. Потім безпосередньо над шарами пористого кремнію була

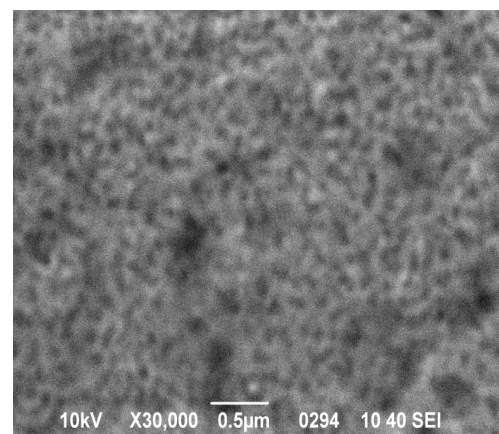
поміщена маска. Зразки піддавали дії УФ-випромінювання протягом 40 сек для утворення візерункового покриття. N- і P-тип легування було досягнуто за допомогою способу нанесення покриття шляхом розміщення розчину фосфору і бору в центрі шарів  $\text{por-Si}$ , а потім нанесення покриття центрифугуванням при кімнатній температурі зі швидкістю 1000 обертів на хвилину протягом 10 сек. Потім шари поруватого кремнію помістили в піч при температурі  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  протягом 15 хв для видалення вологи [20].

Подолання ряду проблем стає можливим за умови наноструктурування напівпровідників, а саме формування поруватого шару на поверхні пластин. Така технологія здатна значно поліпшити електрофізичні властивості сонячних елементів завдяки багаторазовому збільшенню робочої площі пластини (через присутність величезного числа пор на поверхні). Крім того, очікується значне збільшення ККД сонячних елементів, а також їх інтенсивності поглинання світла, можливість накопичення великих обсягів енергії, більш довгим терміном експлуатації (підвищення часу життя пристрою) тощо.

Поруваті поверхні формувалися методом фотоелектрохімічного травлення. Обирали пластини напівпровідників Si, InP, GaP, GaAs n-типу провідності з орієнтацією поверхні (111). Час травлення для всіх зразків обирався однаковий – 10 хв, щільність струму –  $150\text{ mA/cm}^2$ .

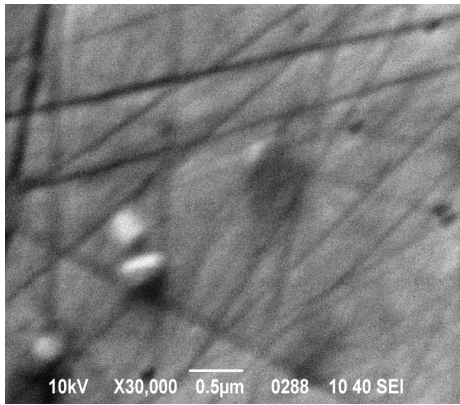


а

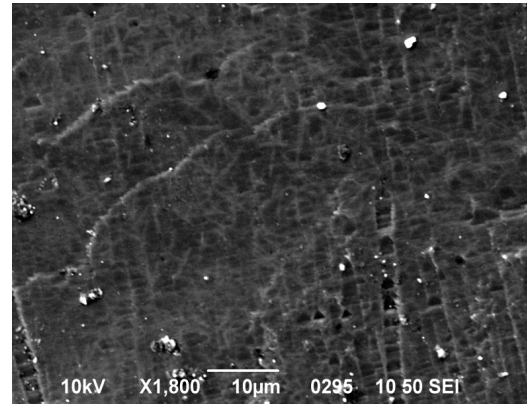


б





В



Г

Рисунок 1.8 –Зображення поруватих структур на поверхні напівпровідників, отриманих методом електрохімічного травлення при щільності струму 150 мА/см<sup>2</sup> протягом 10 хв у розчині електроліту HF: H<sub>2</sub>O=1:1: а – por-Si; б – por-InP; в – por-GaAs, г – por-GaP [20]

Слід відмітити, що вище представлено найбільш загальні закономірності формування поруватих шарів на поверхні напівпровідників. Процеси пороутворення різняться для різних кристалів. На сьогодні не існує єдиної моделі формування наноструктур. Однак для усіх випадків можна зробити деякі узагальнення:

- товщина поруватого шару корелює з часом травлення кристалу. При цьому існує критичний час, за якого пороутворення припиняється і відбуваються альтернативні процеси (видалення поруватого шару з поверхні, полірування тощо). Для кожного напівпровідника цей час є індивідуальним показником;

- щільність струму, при якій спостерігаються процеси пороутворення знаходиться у діапазоні від 20 до 200 мА/см<sup>2</sup>. При меншій щільності струму відбувається лише локальне розтравлювання деформованих областей пластини, при надмірно високому показнику цього параметру спостерігається полірування пластин;

- на форму пор та густину поруватого шару також сильно впливають параметри самого кристалу – тип провідності, орієнтація поверхні, ступінь легованості пластин, кількість точкових дефектів та дислокацій тощо [20].

### **1.3.2 Використання чорного кремнію**

Чорний кремній - це випадково текстуровані наноструктури, які здаються помітно чорними завдяки ефективному придушенню відображення та одночасного посилення поглинання і розсіяння світла в об'ємному Si.

Модифікація була виявлена в 1980 - х роках як небажаний побічний ефект реактивного іонного травлення (RIE). У 1999 році Гарвардського університету група під керівництвом Еріка Мазура розробили процес, в якому чорний кремній був отриманий при опроміненні кремнію фемтосекундними лазерними імпульсами [21]. Після опромінення в присутності газу, що містить гексафторид сірки та інші легуючі добавки, поверхня кремнію розвиває самоорганізовану мікроскопічну структуру мікронних розмірів конусів. Отриманий матеріал володіє багатьма чудовими властивостями, такими як поглинання, який простягається до інфрачервоного діапазону, нижче забороненої зони кремнію, отже має здатність поглинати довші довжини хвиль.

Завдяки тому, що наноструктури мають конусоподібну або голчасту будову, вони здатні захоплювати світло під найменшим кутом. Це може бути хорошим способом для підвищення ефективності сонячних панелей, особливо в країнах полярних широт. Крім цього, чорні комірки кремнію також можуть бути дешевшими, оскільки немає необхідності покривати їх антивідбивним покриттям, яке використовується багатьма іншими типами сонячних елементів.

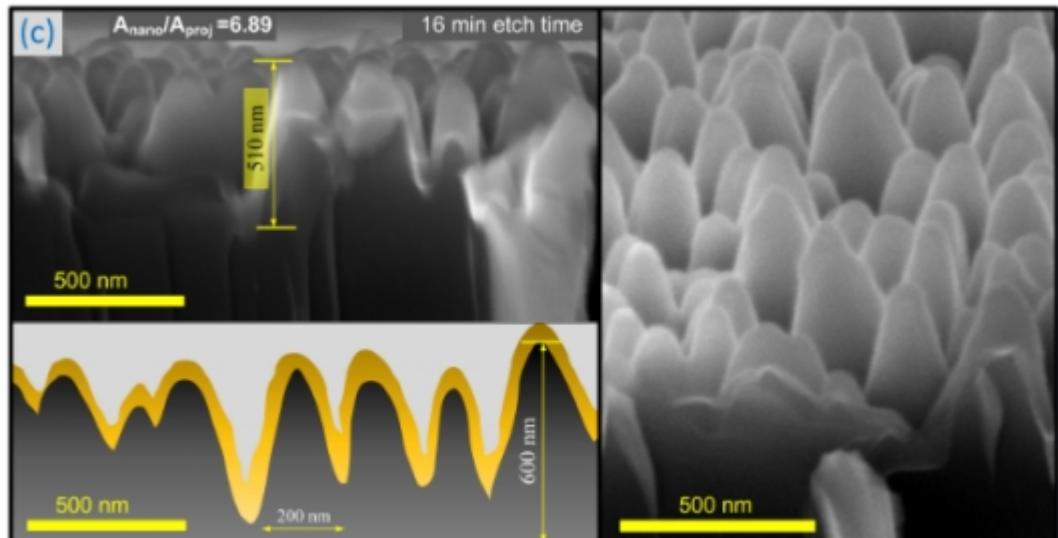


Рисунок 1.9 – Наноструктури чорного Si у вигляді  
SEM-зображень

Основною проблемою, яка гальмує прогрес чорних кремнієвих елементів є те, що називається, рекомбінацією носіїв. Коли фотон потрапляє в атом кремнію всередині сонячної комірки, надлишкова енергія звільняє електрон, який в подальшому використовується для вироблення електроенергії. Однак, електрон просто воз'єднується (рекомбінує) з атомом кремнію, ефективно розсіюючи енергію, надану фотоном. Рекомбінація пропорційна площі поверхні кремнію, а голки на поверхні чорного кремнію збільшують поверхню настільки, що майже половина з звільнених таким чином електронів «губляться». Через відсутність технологічних рішень для нанесення високоякісних плівок з оксиду металу ця технологія повільно розвивалася до 2000-х років. Технологія атомно-шарового осадження (ALD) дозволила прискорити дослідження тонких плівок оксидів металів та їх застосування в фотовольтаїці [21].

Група з Національної лабораторії поновлюваних джерел енергії виготовила чорні кремнієві сонячні елементи з ефективністю 18,2%. Поверхня чорного кремнію була сформована за допомогою процесу травлення металу при взаємодії з використанням нано частинок срібла. У травні 2015 року дослідники з Фінляндії з університету Аалто, працюючи з

дослідниками з Політехнічного університету Каталонії оголосили, що вони створили чорні кремнієві сонячні елементи з ККД 22,1%, застосовуючи тонку пасивуючу плівку на наноструктурах з атомного обложеного шару і за рахунок інтеграції всіх металевих контактів на задній стороні елемента [23].

#### **1.4 Оцінювання наукового, технічного та економічного рівня науково-дослідної роботи**

На сьогоднішній день індустрія, яка пов'язана з виробництвом сонячних батарей, переживає неабиякий бум. На відміну від інших приладів мікроелектроніки, виробництво сонячних елементів у світі не тільки не скорочується, а характеризується щорічним 15% приростом протягом останніх 6 років. На наукові дослідження в області сонячної енергетики щорічно витрачаються сотні мільйонів доларів.

Багато дослідників показали, що сонячні батареї можна зробити більш ефективним за рахунок застосування нано-технологій. Низько-розмірні нанокompatитні структури, що побудовані на квантових точках та нанорозмірних кластерах напівпровідників мають нові модифіковані оптоелектронні властивості. Вони можуть бути застосовані в сонячних елементах, де смуги поглинання можуть бути оптимально пристосовані до довжини хвилі опромінюючого світла. Такі структури можуть привести до підвищення ефективності перетворення сонячної енергії більш ніж 65 % теоретично, що може подвоїти практично існуючу ефективність сонячних батарей. Проте, поточний стан світових досліджень ще далекий від цього значення.

Проаналізуємо рівень науково-дослідної роботи яка пов'язана з дослідженням та розробкою структури сонячного елемента на наноструктурній основі. Виходячи з відповідних вимог НТП, доцільно орієнтуватися на час проведення НДДКР не більше 2 років (+2), при чому технічні показники результатів плануються на рівні кращих світових зразків

(0); передбачаються можливості отримання авторських свідоцтв (0); а строк окупності витрат 2 роки і менше (+3).

В таблиці 1.1 наведено критерії та бальна оцінка для визначення наукового та технічного рівня науково-дослідної роботи

Таблиця 1.1 – Критерії та бальна оцінка для визначення наукового, технічного та економічного рівня науково-дослідної роботи

| Критерії оцінки                                     | Шкала критеріїв                             | Індекс оцінки |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------|
| Час, необхідний для проведення НДР                  | 2 роки і менше                              | +2            |
|                                                     | 3 роки                                      | +1            |
|                                                     | 4 роки                                      | 0             |
|                                                     | 5-6 років                                   | -1            |
|                                                     | 7 років і більше                            | -2            |
| Технічні показники результатів розробки             | Вище рівня кращих світових зразків          | +2            |
|                                                     | На рівні кращих світових зразків            | 0             |
|                                                     | Нижче рівня кращих світових зразків         | -2            |
| Можливості отримання авторських свідоцтв на винахід | Впевненість в отриманні авторських свідоцтв | +2            |
|                                                     | Часткові можливості                         | 0             |
|                                                     | Можливості немає                            | -1            |
| Строк окупності витрат                              | 2 роки і менше                              | +3            |
|                                                     | 3-4 роки                                    | +2            |
|                                                     | 5 років                                     | 0             |
|                                                     | 6-7 років                                   | -1            |
|                                                     | 8 років і більше                            | -2            |

В таблиці 1.2 наведено можливі результати оцінки теми НДДКР.

Таблиця 1.2 – Можливі результати оцінки теми НДДКР

| Сума індексів | Оцінка теми                     |
|---------------|---------------------------------|
| Позитивна(+)  | Розробка є досить перспективною |
| Задовільна(0) | Розробка перспективна           |
| Негативна(-)  | Розробка не перспективна        |

Проаналізувавши дані таблиць 1.1 та 1.2, та підрахувавши загальну суму балів  $+2 + 0 + 0 + 3 = +5$ , робимо висновок, що дана науково-дослідна робота є досить перспективною.

## 1.5 Оцінювання комерційного потенціалу розробки

Метою проведення технологічного аудиту є оцінювання комерційного потенціалу результатів НДДКР. В результаті оцінювання можна зробити висновок щодо напрямів (особливостей) організації подальшого впровадження результатів з врахуванням встановленого рейтингу.

Рекомендується здійснювати оцінювання комерційного потенціалу розробки за 12-ма критеріями, наведеними в таблиці 1.3. [22]

Таблиця 1.3 - Рекомендовані критерії оцінювання комерційного потенціалу розробки та їх можлива бальна оцінка

| Бали (за 5-ти бальною шкалою)     |                                                                        |                                                                       |                                                                 |                                                                       |                                                                        |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Критерій                          | 0                                                                      | 1                                                                     | 2                                                               | 3                                                                     | 4                                                                      |
| Технічна здійсненність концепції: |                                                                        |                                                                       |                                                                 |                                                                       |                                                                        |
| 1                                 | Достовірність концепції не підтверджена                                | Концепція підтверджена експертними висновками                         | Концепція підтверджена розрахунками                             | Концепція перевірена на практиці                                      | Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах                  |
| Ринкові переваги (недоліки):      |                                                                        |                                                                       |                                                                 |                                                                       |                                                                        |
| 2                                 | Багато аналогів на малому ринку                                        | Мало аналогів на малому ринку                                         | Кілька аналогів на великому ринку                               | Один аналог на великому ринку                                         | Продукт не має аналогів на великому ринку                              |
| 3                                 | Ціна продукту значно вища за ціни аналогів                             | Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів                              | Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів                 | Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів                             | Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів                            |
| 4                                 | Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів | Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів | Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів     | Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів | Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів |
| 5                                 | Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів                     | Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів                      | Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів | Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів                    | Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів                    |

## Продовження таблиці 1.3

| Ринкові перспективи     |                                                                                                                              |                                                                                                                                      |                                                                                                                   |                                                                                           |                                                                                     |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 6                       | Ринок малий і не має позитивної                                                                                              | Ринок малий, але має позитивну динаміку                                                                                              | Середній ринок з позитивною динамікою                                                                             | Великий стабільний ринок                                                                  | Великий ринок з позитивною динамікою                                                |
| 7                       | Активна конкуренція великих компаній на                                                                                      | Активна конкуренція                                                                                                                  | Помірна конкуренція                                                                                               | Незначна конкуренція                                                                      | Конкуренція немає                                                                   |
| Практична здійсненність |                                                                                                                              |                                                                                                                                      |                                                                                                                   |                                                                                           |                                                                                     |
| 8                       | Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї                                                         | Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців                                            | Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату                                                       | Необхідне незначне навчання фахівців                                                      | Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї              |
| 9                       | Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні                                          | Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні                                                                   | Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є                                                         | Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є                               | Не потребує додаткового фінансування                                                |
| 10                      | Необхідна розробка нових матеріалів                                                                                          | Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі                                                           | Потрібні дорогі матеріали                                                                                         | Потрібні досяжні та дешеві матеріали                                                      | Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві    |
| 11                      | Термін реалізації ідеї більший за 10 років                                                                                   | Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років                                            | Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років                       | Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років | Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років |
| 12                      | Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію | Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу | Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу | Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту  | Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту       |

Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки зведемо до таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

| Критерії                                 | експерт                      |    |    |
|------------------------------------------|------------------------------|----|----|
|                                          | 1                            | 2  | 3  |
|                                          | Бали, виставлені експертами: |    |    |
| 1                                        | 2                            | 2  | 2  |
| 2                                        | 4                            | 4  | 4  |
| 3                                        | 2                            | 3  | 3  |
| 4                                        | 3                            | 3  | 3  |
| 5                                        | 3                            | 3  | 3  |
| 6                                        | 4                            | 4  | 4  |
| 7                                        | 4                            | 2  | 4  |
| 8                                        | 3                            | 3  | 4  |
| 9                                        | 2                            | 2  | 2  |
| 10                                       | 4                            | 2  | 2  |
| 11                                       | 2                            | 3  | 3  |
| 12                                       | 2                            | 3  | 3  |
| Сума балів                               | 35                           | 34 | 36 |
| Середньоарифметична сума балів <u>СБ</u> | <u>35</u>                    |    |    |

За даними таблиці 1.4 зробимо висновок щодо рівня комерційного потенціалу дослідження. При цьому доцільно користуватися рекомендаціями, наведеними в таблиці 1.5. [22]

Таблиця 1.5 - Рівні комерційного потенціалу розробки

| Середньоарифметична сума балів СБ ,<br>розрахована на основі висновків експертів | Рівень комерційного потенціалу розробки |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 0 - 10                                                                           | Низький                                 |
| 11 - 20                                                                          | Нижче середнього                        |
| 21 - 30                                                                          | Середній                                |
| 31 - 40                                                                          | Вище середнього                         |
| 41 - 48                                                                          | Високий                                 |

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки становить 35 балів, що, згідно таблиці 1.5, свідчить про комерційну



важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

### 1.6 Прогнозування витрат на виконання НДДКР

Для детального обґрунтування доцільності проведення дослідження та розробки структури сонячного елемента на наноструктурній основі необхідно провести попередній розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи. Для визначення суми витрат на проведення НДДКР передбачено складання приблизного кошторису цих витрат [22].

Таблиця 1.6 – Основна заробітна плата дослідників та розробників

| Найменування посади                       | Місячний посадовий оклад, грн. | Оплата за робочий день, грн. | Число днів роботи | Витрати на заробітну плату, грн. |
|-------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------|----------------------------------|
| 1. Керівник проекту                       | 10720,00                       | 510,48                       | 35                | 17866,67                         |
| 2. Ст. науковий співробітник              | 10055,00                       | 478,81                       | 21                | 10055,00                         |
| 3. Науковий співробітник                  | 9700,00                        | 461,90                       | 21                | 9700,00                          |
| 4. Інженер-конструктор електронних систем | 9570,00                        | 455,71                       | 21                | 9570,00                          |
| 5. Технік                                 | 6400,00                        | 304,76                       | 35                | 10666,67                         |
| Разом приблизно                           |                                |                              |                   | 57858,00                         |

Витрати на основну заробітну плату працівників (Зр), що здійснюють підготовку робочих місць необхідних для дослідження та розробка структури сонячного елемента на наноструктурній основі, підготовку та формування пакетів даних, підготовку та монтаж дослідного обладнання складе в межах 6300,00 грн.

Додаткова заробітна плата (10%) дослідників складе приблизно 6500,00 грн. Нарахування на заробітну плату (22%) дослідників складуть приблизно 15500,00 грн.

Таблиця 1.7 – Витрати на основні матеріали

| Найменування матеріалу, марка, тип, сорт                                                                                                                           | Одиниця виміру | Ціна за одиницю, грн. | Витрачено | Вартість витраченого матеріалу, грн. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------|-----------|--------------------------------------|
| Папір офісний А4 білий (80%)                                                                                                                                       | уп.            | 112,00                | 6,0       | 672,00                               |
| Диск оптичний (CD-R)                                                                                                                                               | шт.            | 10,25                 | 6,0       | 61,50                                |
| Органайзер офісний ЕКО-81ВІС                                                                                                                                       | уп.            | 85,00                 | 6,0       | 510,00                               |
| Канцелярське приладдя                                                                                                                                              | компл.         | 194,00                | 5,0       | 970,00                               |
| Картридж змінний Canon 216AF                                                                                                                                       | шт             | 985,00                | 2,0       | 1970,00                              |
| FLASH-пам'ять 32Gb                                                                                                                                                 | шт.            | 350,00                | 2,0       | 700,00                               |
| Композитна структура SnO <sub>2</sub> :F/ p-Si/                                                                                                                    | компл.         | 6500,00               | 2,0       | 13000,00                             |
| Тонкі провідні оксиди (ТПО), наприклад, In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SnO <sub>2</sub> , ZnO, In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , CdO, ITO, IFO | компл.         | 7200,00               | 1,0       | 7200,00                              |
| Електроліт                                                                                                                                                         | л              | 56,00                 | 2,0       | 112,00                               |
| Всього приблизно                                                                                                                                                   |                |                       |           | 25195,00                             |

Таблиця 1.8 – Витрати на комплектуючі для проведення НДР

| Найменування комплектуючих         | Кількість, шт. | Ціна за штуку, грн. | Сума, грн. |
|------------------------------------|----------------|---------------------|------------|
| Пристій електрохімічного травлення | 1              | 7500,00             | 7500,00    |
| Система спреї-піролізу             | 1              | 8320,00             | 8320,00    |
| Компресор                          | 1              | 4130,00             | 4130,00    |
| Аерограф                           | 4              | 284,00              | 1136,00    |
| Термопара                          | 2              | 562,00              | 1124,00    |
| Нагрівач                           | 2              | 487,00              | 974,00     |
| Електродвигун                      | 1              | 1276,00             | 1276,00    |
| Всього                             |                |                     | 24460,00   |

Таблиця 1.9 - Величина амортизаційних відрахувань

| Найменування обладнання                          | Балансова вартість, грн | Строк корисного використання, років | Термін використання обладнання, міс. | Величина амортизаційних відрахувань, грн |
|--------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|
| Комп'ютеризований програмно-аналітичний комплекс | 21807,00                | 5                                   | 2                                    | 726,90                                   |
| Метрологічний комплекс МСХ13-А54                 | 12046,00                | 5                                   | 2                                    | 401,53                                   |
| Люксометр FITCH-32                               | 7580,00                 | 4                                   | 2                                    | 315,83                                   |
| Спектрогеліограф                                 | 22830,00                | 5                                   | 2                                    | 761,00                                   |
| Вольтметр                                        | 6500,00                 | 5                                   | 2                                    | 216,67                                   |
| Осцилограф                                       | 7320,00                 | 5                                   | 2                                    | 244,00                                   |
| Амперметр                                        | 6890,00                 | 5                                   | 2                                    | 229,67                                   |
| Програмне забезпечення аналізу числових даних    | 16568,00                | 3                                   | 2                                    | 920,44                                   |
| Місце оператора спеціалізоване                   | 9780,00                 | 5                                   | 2                                    | 326,00                                   |
| Офісна оргтехніка                                | 12300,00                | 4                                   | 2                                    | 512,50                                   |
| Дослідницька лабораторія                         | 200000,00               | 25                                  | 2                                    | 1333,33                                  |
| Всього приблизно                                 |                         |                                     |                                      | 5987,00                                  |

Таблиця 1.10 – Витрати на електроенергію при проведенні досліджень

| Найменування обладнання                          | Кількість годин роботи обладнання, год. | Встановлена потужність, кВт | Коефіцієнт використання потужності | Величина оплати |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------|
| Комп'ютеризований програмно-аналітичний комплекс | 240,0                                   | 0,52                        | 1                                  | 312,00          |
| Метрологічний комплекс МСХ13-А54                 | 180,0                                   | 0,76                        | 1                                  | 342,00          |
| Люксометр FITCH-32                               | 15,0                                    | 0,06                        | 1                                  | 2,25            |
| Спектрогеліограф                                 | 15,0                                    | 0,08                        | 0,8                                | 2,40            |

Продовження таблиці 1.10

|                                    |       |      |   |         |
|------------------------------------|-------|------|---|---------|
| Вольтметр                          | 35,0  | 0,12 | 1 | 10,50   |
| Осцилограф                         | 35,0  | 0,2  | 1 | 17,50   |
| Амперметр                          | 35,0  | 0,12 | 1 | 10,50   |
| Місце оператора спеціалізоване     | 240,0 | 0,32 | 1 | 192,00  |
| Офісна оргтехніка                  | 42,0  | 0,96 | 1 | 100,80  |
| Пристій електрохімічного травлення | 12,0  | 0,32 | 1 | 9,60    |
| Система спреї-піролізу             | 12,0  | 0,15 | 1 | 4,50    |
| Компресор                          | 12,0  | 0,2  | 1 | 6,00    |
| Нагрівач                           | 6,0   | 0,72 | 1 | 10,80   |
| Електродвигун                      | 6,0   | 0,27 | 1 | 4,05    |
| Всього                             |       |      |   | 1024,00 |

Інші витрати складуть в межах 130000,00 грн.

Загальні витрати на проведення дослідження та розробка структури сонячного елемента на наноструктурній основі.

$$B = 57858,00 + 6300,00 + 6500,00 + 15500,00 + 25195,00 + 24460,00 + 5987,00 + 1024,00 + 130000,00 = 272284,00 \text{ (грн.)}$$

### 1.7 Доцільність науково-дослідної роботи

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у практичну діяльність, величину витрат на роботу.

Комплексний показник  $K_p$  рівня НДДКР розраховується за формулою [22]:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (1.1)$$

де  $I$  - коефіцієнт важливості роботи,  $I = 2 \dots 5$ ;

$n$  - коефіцієнт використання результатів роботи;  $n = 0$ , коли результати роботи не будуть використовуватись;  $n = 1$ , коли результати роботи будуть використовуватись частково;  $n = 2$ , коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках;  $n = 3$ , коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок;

$T_c$  - коефіцієнт складності роботи,  $T_c = 1 \dots 3$ ;

$R$  - коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то  $R = 4$ ; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то  $R = 3$ ; якщо нижче відомих результатів, то  $R = 1$ ;

$B$  – вартість НДР, (тис. грн.)  $B = 382,2$  тис. грн;

$t$  - час дослідження роботи, років.

Підставляючи числові дані в ( 1.1 ) отримаємо

$$K_p = \frac{4^3 \cdot 3 \cdot 4}{272,3 \cdot \frac{2}{12}} = 15,23$$

Оскільки  $K_p > 1$ , тому науково-дослідну роботу з дослідження та розробки структури сонячного елемента на наноструктурній основі можна вважати економічно доцільною з достатньо високим науковим, технічним та економічним рівнем.

## 1.8 Висновки

Проведено аналіз сучасного стану розвитку сонячних панелей, з'ясовано основні задачі, що ставляться перед ними та розглянуто способи їх реалізації за допомогою сучасних технічних засобів. На основі літературних джерел визначено переваги та недоліки сонячних панелей та фотоперетворювачів, розглянуто варіанти їх покращення та удосконалення.

Розглянувши існуючі технології по виготовленню сонячних панелей, стає зрозуміло, що найбільш успішним є застосування низькотемпературного гетеропереходу. Проте це не є досконалим, оскільки є втрати, пов'язані з технологічними процесами та самим процесом поглинання фотонів. Альтернативою є застосування як поглинача поруватого кремнію, проте і там є свої особливості при виготовленні, а також ще немає чіткої технології.

Тому пропонується використати технологію низькотемпературного гетеропереходу, сформованого з тонких плівок оксиду металів ( $\text{TiO}_2$  і  $\text{NiO}$ ) в якості селективних контактів пасивуючого носія на наноструктурованих поверхнях чорного кремнію.

Згідно проведеного аналізу рівень комерційного потенціалу розробки становить 35 балів, що свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього). До того ж комплексний показник рівня НДДКР ( $K_p > 1$ ) свідчить про те, що науково-дослідну роботу з роботи з дослідження та розробки структури сонячного елемента на наноструктурній основі можна вважати економічно доцільною з достатньо високим науковим, технічним та економічним рівнем.

## **РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА НА НАНОСТРУКТУРНІЙ ОСНОВІ**

## Фізичні основи роботи сонячних елементів

### 2.1.1 Фотоелектричний ефект

Видиме світло - це лише мала частина великого спектра випромінювання. Як відомо, що світло рухається як хвиля і потрібно характеризувати світлове випромінювання параметрами, пов'язаними з довжиною хвилі, частотою і енергією відповідно до зв'язку Планка-Ейнштейна:

де  $h$  - постійна Планка,  $\nu$  - частота фотонів,  $c$  - швидкість світла, а  $\lambda$  - довжина хвилі фотона. Це твердження є основою фотовольтаїчного ефекту; французький фізик Олександр-Едмон Беккерель був першим, хто відкрив це [24]. Він був першим, хто спостерігав зміщення струму і напруги на освітленому платиновому електроді, зануреному в кислотний розчин. Він назвав це явище фотоелектричним ефектом і тому в своєму експерименті винайшов перший сонячний елемент. Звичайно, в той час він не думав про його ефективність. В даний час відомо, що фотоелектричний ефект виникає в різних системах, виготовлених з напівпровідників, електрохімічних речовин, органічних матеріалів та ін.

Сучасні сонячні елементи в більшості засновані на напівпровідникових переходах, складних структурах і теоріях. Щоб зрозуміти принцип роботи фотоелемента і його структуру, коротко пояснимо найбільш важливі принципи перетворення енергії фотона в електричну. Перший принцип говорить, що є дворівнева система, де електрони можуть здійснити перехід з нижнього (спокійного) у верхній (збуджений) стан енергії при попаданні світла [24, 25]. У напівпровіднику кожен атом має певний енергетичний рівень і, оскільки об'ємний матеріал має  $10^{22}$  атомів/см<sup>3</sup>, то ці енергетичні

рівні утворюють безперервні енергетичні зони. Нижня смуга називається валентною зоною, верхня – зоною провідності (рис. 2.1). Розрив між цими смугами називається забороненою зоною, а електрони не можуть існувати там.

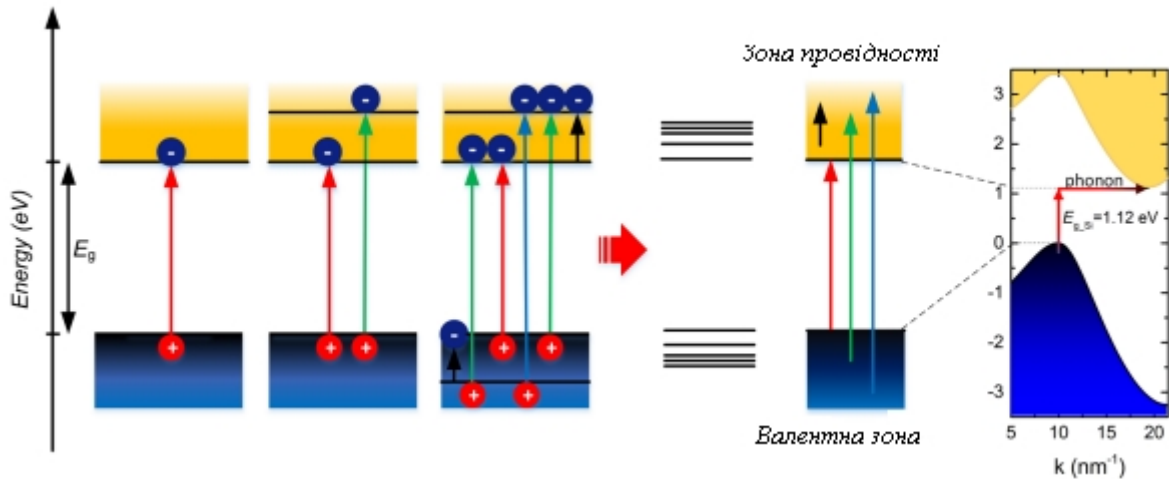


Рисунок 2.1 – Пояснення процесу переходу електронів з одного стану в інший

Напівпровідник, такий як Si, може поглинати світло тільки при енергії фотонів, що перевищує заборонену зону  $E_g = 1,12$  eV. Фотони, енергія яких нижче  $E_g$  не можуть бути поглинені, так як вони матимуть мало вільних електронів, щоб перестрибнути через заборонену зону. Оскільки енергія забороненої зони кремнію 1,12 eV відповідає енергії інфрачервоного випромінювання, сонячні елементи не можуть виробляти багато електрики з тепла, а тільки від видимого світла і ближнього інфрачервоного випромінювання. Також на електрони впливають кристалічна структура і енергія імпульсу в площині кристала. Цей ефект створює різницю між валентністю і зоною провідності [25].

Також існує два типи напівпровідників з прямою забороненою зоною і непрямою, як кремній. У разі прямого напівпровідника електрон може легко пройти від валентної зони до зони провідності, але в непрямому напівпровіднику, в нашому випадку Si, збуджений електрон вимагає також



енергії імпульсу, що забезпечується коливаннями в кристалічній решітці (фонони). Фонон генерується з поглинанням низької енергії фотона ( $> 1$  eV), це енергія коливання решітки або тепло.

Якщо припустити, що кожен поглинений фотон збуджує один електрон, і всі ці електрони течуть до контакту, можна розрахувати максимальну щільність струму генеровану фотоном:

де  $e$  - заряд електрона,  $\Phi$  - спектральна щільність потоку фотонів. Максимально генерована щільність струму для сонячного елемента Si становить  $46 \text{ mA} / \text{cm}^2$ , тобто близько  $10^{17}$  фотонів/см/с поглине сонячний елемент. Енергія забороненої зони Si дорівнює  $1,12$  eV і згідно з формулою (2.1) це відповідає довжині хвилі  $1,11$  мкм. Таким чином, Si є непрямим напівпровідником, поглинає фотон з енергією  $1,12$  eV для збудження електрона з валентної зони і деякої додаткової енергії для компенсації імпульсу та досягнення зони провідності. Це пояснює, чому Si має ширший спектр поглинання в порівнянні з напівпровідниками груп II-VI, III-IV, такі як GaAs та ін [26].

Коли фотон поглинається в напівпровіднику, його енергія перетворюється в електрохімічний потенціал і електричну енергію шляхом генерації пари електронів і дірок або навпаки в носії заряду і електричний струм. Електрон - це негативний заряд. Збуджений електрон переходить в зону провідності, залишаючи позитивний ковалентний зв'язок, так звану дірку. Оскільки електрон і дірка мають протилежні заряди, вони мають тенденцію анігілювати або рекомбінувати, створюючи кванти енергії. Отже, основною характеристикою сонячного елемента є ефективне розділення електрону і дірки, щоб уникнути рекомбінації і зробити корисну роботу.

### 2.1.2 Принципи розподілу заряду

Звичайні сонячні елементи Si використовують кілька механізмів розподілу заряду. Починаючи з першого винаходу сонячного елемента, найбільш часто використовуваний механізм - це легований p-n гомоперехід з польовим ефектом і дифузією, індукованої струмом заряду (рис. 2.2 (б-г, д, є)). Іншими словами Si – це об'ємний матеріал з легуванням n-типу (для наприклад, фосфора), який легується добавкою p-типу (наприклад, бором), утворюючи різні легуючі рівні і p-n-перехід близько до однієї з поверхонь. Різниця в рівнях легування призводить до поділу енергії в концентрації заряду в зоні провідності і валентній зоні, відомої як квазі-Фермі рівні для електрона  $E_{Fn}$  і дірки  $E_{Fp}$ , які утворюють енергетичні бар'єри у напівпровіднику для поділу електронів і дірок, як показано на рис. 2.2 (є, ж) [27].

Другий і більш кращий механізм поділу заряду являє собою гетероперехід, утворений осадженням матеріалу з різними енергетичними забороненими зонами. Гетероперехід на кремній може бути утворений при осадженні іншого матеріалу з більш широкою забороненою зоною, такого як аморфний Si (a-Si) із енергією забороненої зони 1,5-1,7 eV [27], оксиди перехідних металів із енергією забороненої зони 2,6-3,6 eV [28], діелектричні тунельні плівки із енергією забороненої зони вище 4 eV [28] і т. д. (Рис. 2.2 (є, ж)).

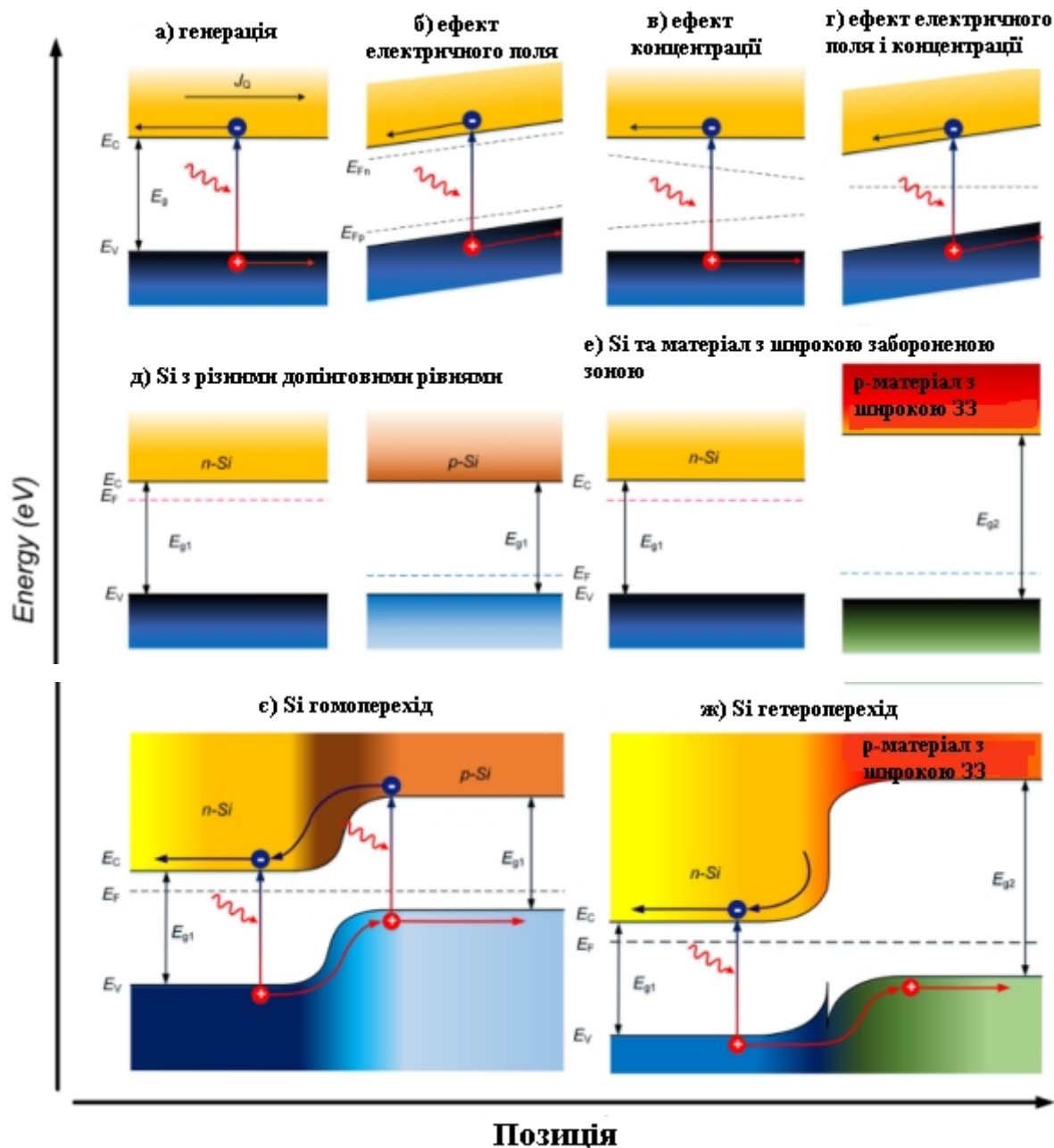


Рисунок 2.2 – Механізми переносу і розподілу заряду в сонячних елементах Si

Ефективний поділ заряду призводить до ефективного переносу заряду на електричні клеми під зміщене електричне поле і ефективної роботи сонячного елемента. Всі механізми поділу заряду в сонячних елементах мають перехід, який перетворює сонячний елемент в діодний пристрій або більш конкретно в фотодіод. Тому, щоб оцінити продуктивність сонячного

елемента, потрібно знати його внутрішні і зовнішні характеристики, набір різних параметрів діода. Найбільш важливими параметрами, які характеризують роботу сонячного елемента, є загальна густина електричного струму  $J$  (2.3), густина струму короткого замикання  $J_{SC}$  (2.4), густина темного струму  $J_D$  (2.5), напруга розімкнутого ланцюга  $V_{OC}$  (2.6), максимальна генерована потужність  $P_{max}$  (2.7), ККД перетворення потужності (2.9) і номінальна температура робочого елемента (НТРЕ).

Загальна густина електричного струму в сонячному елементі є різницею між густиною струму короткого замикання  $J_{SC}$  і темновим струмом  $J_D$ .

Густина струму короткого  $J_{SC}$  замикання являє собою максимальний струм від сонячного елемента, коли напруга на елементі рівна нулю [29].  $J_{SC}$  пов'язано з поглинутим спектром фотонів шляхом вимірювання квантової ефективності елемента (КЕ), яка є ймовірністю фотона енергії  $E$ , який буде поглинений і перетворений в зібрані носії заряду.

де  $E$  - енергія фотона,  $E_g$  - ширина забороненої зони поглинача (тобто Si),  $\Phi$  - щільність падаючого спектрального фотона,  $EQE(E)$  - зовнішня квантова ефективність.

Очевидно, що густина струму короткого замикання дозволяє діагностувати поглинаючу поведінку сонячних елементів. При цьому густина темного струму  $J_D$  є залежною від напруги густини струму рекомбінації. В ідеалі струм короткого замикання  $J_{SC}$  є величиною, більшою нуля при нульовій нарузі. В умовах темряви,  $J_{SC} = 0$  і вольт-амперна характеристика сонячного елемента така ж, як p-n перехідний діод.

Напруга холостого ходу  $V_{OC}$  є максимальною напругою, доступною від сонячного елемента при нульовому струмі ( $J = 0$ ). Напруга холостого ходу  $V_{OC}$  визначається як:

Тут  $T$  - номінальна температура робочого елемента (НТРЕ),  $J_0$  і  $n$  - темновой струм насичення і діодний фактор ідеальності відповідно. НТРЕ є температурою роботи елемента в електричному полі. Максимальна потужність може бути залучена шляхом зміщення сонячного елемента при певній напрузі, де буде максимальним. Цю напругу позначено як  $V_{max}$ , а відповідно густина струму позначена як  $J_{max}$ . Треба звернути увагу, що максимальна густина струму і напругане збігаються з щільністю струму короткого замикання і значеннями напруги розімкнутого ланцюга [29]. Тоді точка максимальної потужності визначається як:

де  $A$  - площа сонячного елемента.

Іншим важливим параметром продуктивності сонячного елемента є коефіцієнт заповнення  $FF$ .  $FF$  визначається як відношення максимальної потужності сонячного елемента до значення відкритої напруги ланцюга  $V_{OC}$  і струму короткого замикання  $J_{SC}$ . Коефіцієнт заповнення визначається:

Ефективність перетворення енергії або просто ефективність сонячного елемента  $\eta$  є найбільш поширеним параметром, який використовується для оцінки продуктивності сонячного елемента і порівняння з іншими елементами. Ефективність дана як відношення перетвореної електроенергії до вхідної потужності від Сонця:

### 2.1.3 Кремній як домінуючий енергетичний елемент

Більше 90% всіх комерційних сонячних елементів виготовляється із кремнію, хоча інші матеріали, тобто напівпровідники III-V групи, теоретично більш кращі із-за прямого поглинання забороненої зони. Причини, чому Si все ще домінуючий матеріал для виробництва сонячних елементів є те, що він є другим за поширеністю матеріалом на Землі (28%), він забезпечує стабільність матеріалу, добре розвинене промислове виробництво і технологія виготовлення сонячних елементів. І що більш важливо, він має відносно високу ефективність перетворення енергії. Ці факти призводять до конкурентоспроможної низької вартості сонячних елементів Si в порівнянні з іншими технологіями сонячних елементів. Рекордна ефективність для монокристалічного кремнієвого сонячного елемента рівна 26,3% [30] і 20,8% для полікристалічного. Ці ефективності записи дуже близькі до теоретичної межі ефективності Si, відомої як межа Шоклі-Кейссера, рівної 29% в кремнієво-одноперехідному з'єднанні при одному сонячному освітленні при кімнатній температурі [30].

Будь-яке збільшення ефективності перетворення вище теоретичної межі неможливо. Напівпровідниковий одноперехідний сонячний елемент, освітлений при спектральному освітленні AM1.5, може поглинати тільки фотон в цій межі. Через фундаментальні властивості матеріалу, таких як твердження Больцмана, Карно, внутрішня емісія, термалізація, передача

(фотони з енергією нижче енергії забороненої зони) і втрати коефіцієнта заповнення є причинами того, що сонячні елементи не можуть бути на 100% ефективними, так як показано на рис. 2.3 (б).

ККД монокристалічного кремнію (с-Si) в сонячних елементах обмежений 29% через обмеження термодинаміки і квантової механіки, як зазначено вище і відповідно до рис. 2.3. Однак межа 29% може бути досягнута, якщо припустити, що всі втрати ідеалізовані, наприклад поглинання наближається до одиниці з ідеальною внутрішньою квантовою ефективністю, а також механізм розподілу та переносу заряду без втрат, крім власного випромінювання і рекомбінація. Пам'ятаючи про це, реальні обмеження в сонячних елементах Si представлені нижче [31].

Одним з істотних обмежень в сонячному елементі Si є дуже високий показник заломлення с-Si ( $\sim 3,5$ ). В середньому полірована пластина кремнію має більш 30% відбитого падаючого світла. У всіх структури сонячних елементів, які будуть представлені далі, включаючи високоефективні сонячні елементи з гомопереходом і гетеропереходом, ця проблема вирішується шляхом нанесення ефективних антивідбивних (AR) покриттів. По-друге, Si як непрямий напівпровідник із слабким поглинанням світла закриває енергетичну зону. Рішення полягає в тому, щоб включити механізм ефективного уловлювання світла (LT) для досягнення максимально можливого поглинання з внутрішньою мультирозсіюваною здатністю, поки світло повністю не поглинається в обсязі Si. З ефективним механізмом захоплення світла, оптична поглинаюча здатність максимізується, що призводить до основних втрат в результаті переносу заряду. Крім того, згадані внутрішні межі, поверхневі і кристалічні дефекти є сильними причинами втрат через рекомбінацію. Втрати кристалічних дефектів можна знехтувати з більш тонкими і якісними пластинами. Однак якість структури у верхньої і нижньої поверхні набуває все більшого значення [32].

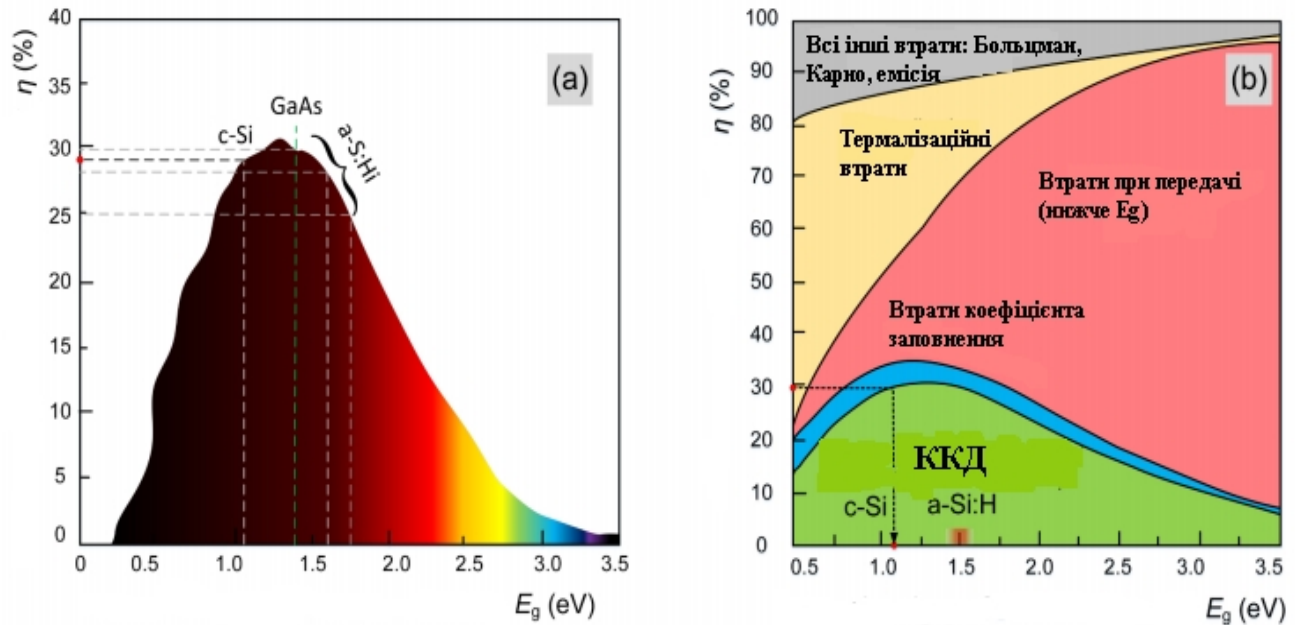


Рисунок 2.3 – Теоретична межа ефективності перетворення енергії сонячних елементів: а) межі ефективності перетворення енергії, яка має найбільшу ймовірність поглинання в напівпровіднику; б) сумарний потенціал перетворення і втрати в напівпровідникових матеріалах, включаючи Si

Друге основне обмеження, згідно з Грінгом [32], в сонячних елементах кристалічного кремнію (c-Si) є внутрішнє обмеження по оже-рекомбінації. Ефективність сонячного елемента може бути поліпшена за рахунок зменшення швидкості поверхневої рекомбінації (SRV). SRV залежить від швидкості рекомбінації на поверхнях і надлишкової густини неосновних носіїв і, як очікується, буде невеликою ( $S = 4$  см / с) для товстих пластин (400 мкм) з великим об'ємним часом життя (10 нс). Напруга холостого ходу,  $V_{oc}$ , має логарифмічну залежність від рекомбінації в активній області сонячного елемента і сильну залежність від SRV – більше 10 см / с, але вона повністю не залежить від оптичного поглинання. Навпаки, густина струму короткого замикання  $J_{sc}$  залежить від оптичного поглинання і є постійною, якщо SRV нижче 10<sup>3</sup> см / с. Це означає, що оптичне поглинання стає обмежуючим фактором в кремнієвих сонячних елементах. Потім добуток



$V_{OC} \times J_{SC}$ , який сприяє максимальній потужності і ефективності, залежить від оптичного поглинання і оже-рекомбінації, тобто SRV. Оптичне поглинання пластин c-Si можна поліпшити текстуруванням поверхні Si. Анізотропне лужне травлення є сучасним в промисловому виробництві високоефективних сонячних елементів Si. Лужне травлення створює мікроструктури, які використовують геометричне уловлювання світла, але зберігають поверхневе відображення близько 10 % [33].

Отже, антивідбивне покриття (ARC) наноситься поверх мікроструктур, щоб зменшити відбивну здатність до кількох відсотків. Проте, через півхвилі, які заважають інтерференції хвиль, ARC ефективно тільки для вузького діапазону спектру поглинання Si. Рішення полягає в тому, щоб використовувати шар з декількох плівкових покриттів з різними показниками заломлення. Однак такі укладальні плівки досить дороги. Крім того, геометричні структури з покриттями ARC вимагають багатоетапної обробки, включаючи фотолітографію і різні методи нанесення плівок [34]. Однак існує більш просте одностадійне технологічне рішення для подолання оптичних втрат лужного текстурування. Сухе реактивне іонне травлення (RIE) кремнію задовольняє попит і пропонує антивідбивні властивості і властивості уловлювання світла для поверхонь Si, створення оптично чорних наноструктур, так званий чорний кремній [34].

## 2.2 Процес наноструктурування чорного кремнію

Сухе реактивне іонне травлення (RIE) або також відомий як процес плазмового травлення показав дуже багатообіцяючі результати для заміни методів мокрого травлення. Для цього є дві основні причини.

Першою причиною є хімічно активні речовини, що утворюються в плазмі, які є більш енергійні. Друга причина полягає в тому, що плазмове травлення дає високий рівень можливості спрямованого або анізотропного травлення через присутність іонних частинок в плазмі і електричного поля,

яке контролює напрямок процесу травлення [35]. Існують різні промислові системи RIE для плазми травлення кремнію. Тут буде показана система глибокого реактивного іонного травлення SPTS Pegasus (рис. 2.4). Процес RIE дозволяє створити випадково впорядковану наноструктуровану поверхню кремнію з поверхневою відбивною здатністю (нижче 1%) і отримати так званий чорний кремній (b-Si).

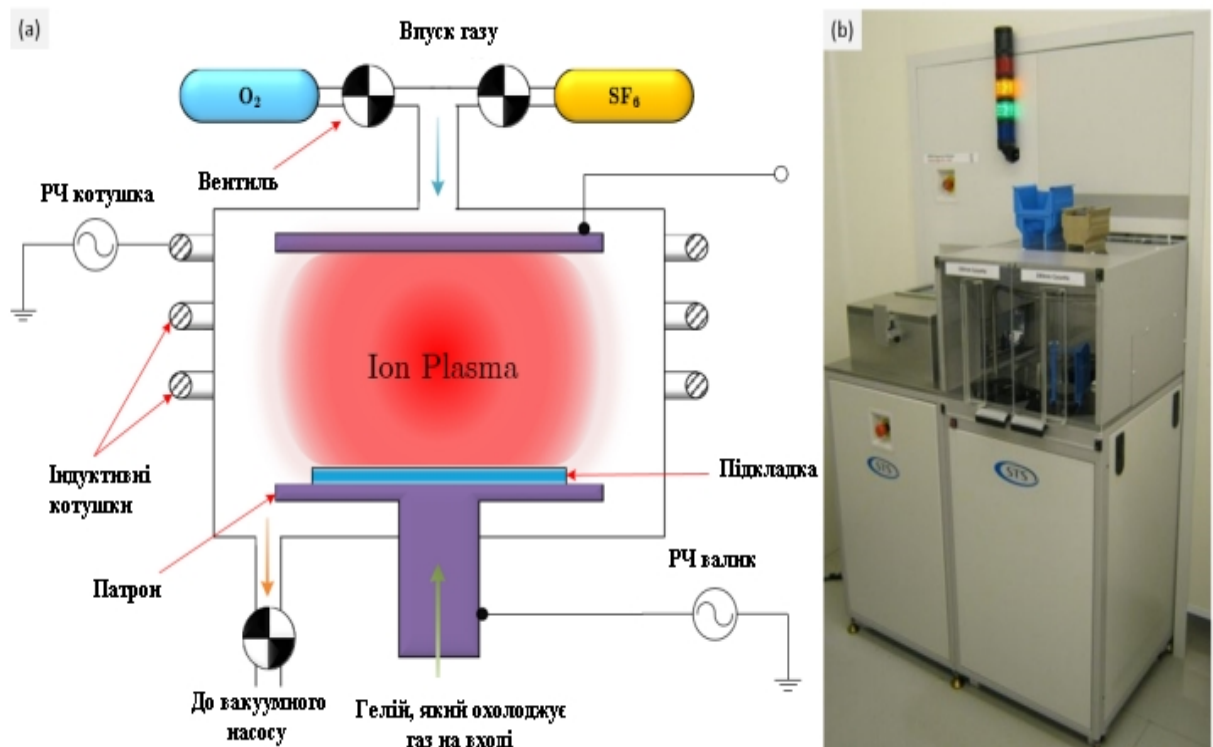


Рисунок 2.4 – Індуктивно-пов'язана плазмова система, яка використовується для процесу RIE: (а) схема камери RIE; (б) фотозображення системи SPTS Pegasus RIE

Процес наноструктурування чорного Si складається з трьох основних етапів, що відбуваються при низькій температурі: формування пасивуючого шару, травлення пасивуючого шару і травлення Si, які повторюються з дискретним кроком часу, поки не буде досягнутий остаточний результат.

Процес наноструктурування проводиться в наступному порядку, як показано на рис. 2.5. Процес травлення контролює параметри, такі як парціальний тиск  $SF_6$  і  $O_2$ , температура процесу і напруга зсуву постійного струму вимірюється на стадії вафлі. Щоб зрозуміти глибше утворення чорного Si і спланувати подальшу оптимізацію, процес RIE був проаналізований за допомогою теоретичної моделі, представленої Saab et al.[35].

Процес травлення пасивуючого шару можна описати таким чином: зразок пластини завантажують в камеру RIE і охолоджують до  $-20\text{ C}^\circ$  (етап 1 на рис. 2.5).  $SF_6$  газ був поставлений в камеру і радикали фтору швидко атакували Si і зруйнували нативний оксид на верх пластини, що утворює летучий  $SiF_4$  (етапи 2-3 на рис. 2.5). Потім пасивуючий шар формується знову з киснем і  $SF_6$ , потім в камеру подаються (етап 4 на рис. 2.5) кисневі радикали, які з  $SF_6$  утворюють кремній-оксифторид, який діє як пасивуючий шар:



$SiO_xF_y$  діє як обмежувач травлення для  $F^*$  і пасивуючої поверхні зразка. Після пасивації шар утворених газів  $SF_6$  продувають і витравлюючи радикали  $F^*$ , витравлюють оксифторид кремнію і кремній та утворюють структуровану поверхню (етап 5 на рис. 2.5) [36].

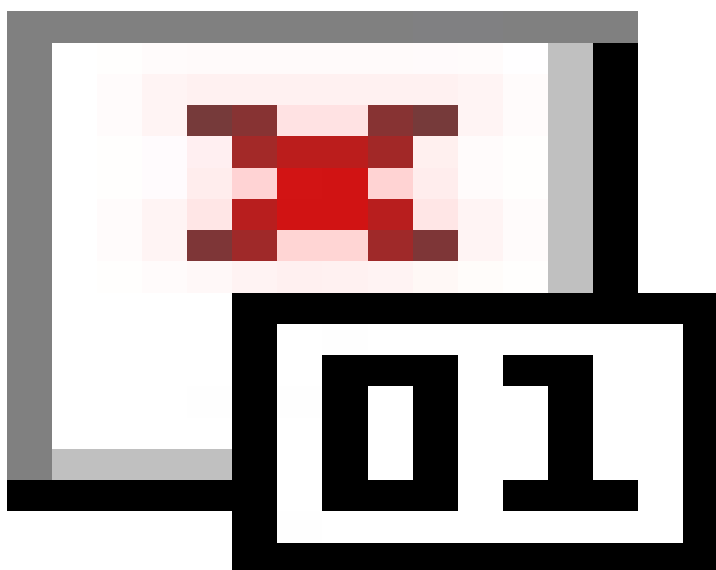


Рисунок 2.5 – Схематичне зображення процесу RIE для формування наноструктур чорного кремнію

Кожен новий цикл основних етапів (етап 1-5 на рис. 2.5) залежить від геометричного поглинання і може бути пропорційний локальному тілесному куту прямого впливу плазми. З іншого боку, травлення пасивуючого шару залежить перш за все від прискорених іонів, спрямованих на зразок плазмою самозміщеної постійної напруги. Ці високоенергетичні іони з вертикальною траєкторією фізично видаляють пасивуючий шар. Таким чином, швидкість травлення стає функцією зміщення постійного струму плазми, але не геометричного поглинання. Ефективна товщина пасивації залежить від локального нормального кута поверхні, оскільки утворення пасивуючого шару є конформним процесом з сильно спрямованим травленням [36].

Отже, швидкість травлення пасивуючого шару на горизонтальних поверхнях вище, ніж на стінах, близьких до вертикальних. Форми таких

наноструктур спостерігали Янсен і ін. [37] і можуть бути змінені в залежності від параметрів процесу. Форма може бути змінена з параболічної на випадково розподілені ямки травлення, які в кінцевому підсумку перекриваються і залишають голкоподібні особливості Si між ними відповідно до моделюванням, проведеним Saab et al. Співвідношення сторін наноструктур можна контролювати за допомогою тиску газу, який визначає спрямованість іонів. Ця спрямованість впливає на фізичний компонент травлення, форму наноструктур і їх пропорції.

### 2.3 Морфологія та властивості чорного кремнію

Походження оптичних ефектів наноструктур чорного Si можна зрозуміти з морфологічних досліджень поверхонь. Кінцеві наноструктури, показані на рис. 2.6 (а)-(с) у вигляді поперечних перерізів SEM та SEM зображень під кутом  $30^\circ$ . Травлення RIE проводили з кроком 4 хв, починаючи з 8 хв (8, 12 і 16 хв), щоб знайти мінімальну відбивну здатність наноструктур кремнію в повному спектральному діапазоні поглинання. Для кожного часу травлення висота і крок наноструктур варіювався, а крок відповідав швидкості травлення 30 нм / хв [38].





Рисунок 2.6 – Наноструктури чорного Si, представлені у вигляді зображень SEM і намальованих профілів поперечних перерізів, а також як зображення SEM під кутом  $30^\circ$

Як видно ширина наноструктур менша, ніж довжина хвилі падаючого світла, тому відбувається мінімальне відображення, а також падаюча хвиля відчуває поступової зміни показника заломлення, який залежить від об'ємної частки Si. Цей ефект також відомий як ефективна теорія середовища [38].

## 2.4 Поверхнева пасивація $Al_2O_3$

### 2.4.1 Опис процесу ALD

Технологія ALD (атомно-шарове осадження) була розроблена і запатентована ще в 1970-х роках компанією Suntola і її колегами з Фінляндії [39]. Метою було розробка тонкоплівкового покриття в електролюмінесцентних дисплеях. В якості альтернативи традиційним методам, ALD запропонувала можливість виробляти високоякісні, щільні і без проколів плівки з чудовою однорідністю і конформністю з відмінним контролем товщини і складу на атомному рівні.

Докладний огляд процесів і додатків ALD добре описаний Puurunen і багатьма іншими фахівцями в даній області [39]. Процес ALD складається з послідовності продувки газу-реагенту-попередника і стадії вакуумування газів. Кожен прекурсор газової продувки відокремлюється продувкою інертним газом або вакуумуванням реакційної камери (рис. 2.7 (б)), щоб підтримувати окрему половинну реакцію для кожного попередника. Така півреакція становить один цикл – це створює моношар бажаних матеріалів. Щоб виростити певну товщину, процес зростання певну слід повторити кількість циклів, яка визначається швидкістю осадження за цикл. Принципова схема ALD зображена на рис. 2.7 (а), де процес складається з двох попередників, які продуваються окремими імпульсами продувки інертним газом.

На першому етапі технологічна камера ALD стабілізується при необхідній температурі, щоб підтримувати стабільне, прийнятне вікно осадження. Далі камера промивається кілька разів, щоб видалити будь-які забруднюючі гази і частинки. Хімічний процес починається з впливу поверхні підкладки на імпульс першого попередника і його хемосорбція на наявні поверхневі ділянки (ОН групи) до поверхні, насиченою радикалами попередника. Насичення хемосорбції призводить до самообмеження реакції,

що дозволяє виростити плівку зі стабільною товщиною моношару при певній температурі. Після продувки інертним газом надлишок попередника і побічні продукти реакції видаляються з камери.

По-друге, півреакція починається з того, що поверхня піддається впливу другого попередника з аналогічним ефектом насичення, що призводить до самообмеження другої півреакції. Нарешті, після повного циклу камера продувається інертним газом дщоб усунути залишки другого попередника і побічних продуктів.

Важливо відзначити, що процес, який містить лише один попередник, чи не кваліфікується як ALD. Загальний процес зростання складається з  $n$ -циклів і є відносно повільним через періодів продувки. Діапазон температур з постійною швидкістю осадження називається прийнятним вікном, як показано на рис. 2.7 (в) [40, 41]. Більш важливим фактором успіху в процесі ALD є правильний збіг хімічного складу прекурсора, наприклад швидкі і повні поверхневі реакції.

Ритала і співавт. [41] підсумував деякі функції, які можуть привести до надійного процесу ALD. Самообмежувальний процес зростання дає:

- точний контроль товщини плівки по числу нанесених циклів;
- немає необхідності контролювати потік реагенту;
- відмінна однорідність і конформність;
- можливість обробляти великі площі зразків і партій;
- плоскі, однорідні та без дірок плівки;
- контроль складу атомного шару;
- широкий діапазон робочих температур (від 400 C° і вище).



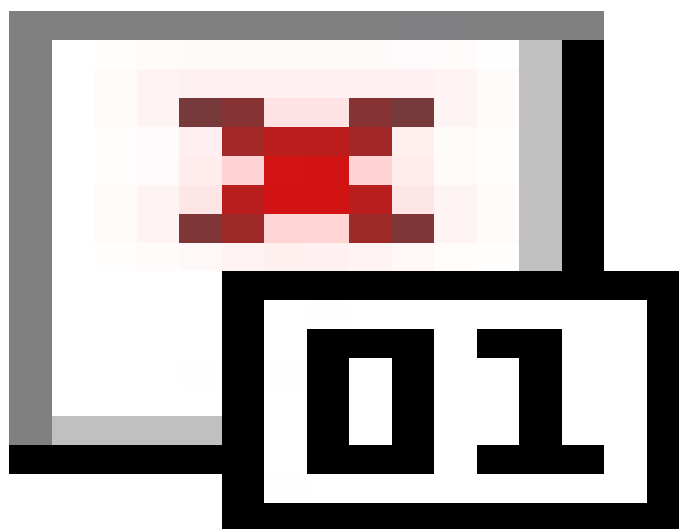


Рисунок 2.7 – Зображення процесу ALD

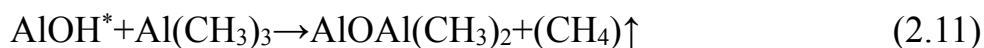
#### 2.4.2 ALD процес для $\text{Al}_2\text{O}_3$

Перед обговоренням схем і результатів пасивації важливо підкреслити вимоги до пасивуючим шарів на поверхнях чорного Si, узагальнені Отто [42]. По-перше, пасивуючі матеріали повинні відповідати орієнтації кристалів c-Si і його рівня легування, забезпечувати чудову якість хімічної пасивації і викликати сильну пасивацію за допомогою польового ефекту. По-друге, наноструктуровані гофровані поверхні повинні мати висококонформне покриття, щоб уникнути будь-яких отворів, включень або дефектів. По-третє, покриття повинне мати мінімальний вплив на оптичні властивості наноструктури. По-четверте, найвища температура процесу ALD повинна бути збережена, щоб уникнути дифузії забруднюючих речовин від наноструктурованої поверхні в об'єм Si і для забезпечення повних реакцій

поверхні ALD. По-п'яте, необхідно очистити кремнієву поверхню і нанесення шкоди процесом травлення повинно бути зведеним до мінімуму [42].

Після процесу наноструктурування всі зразки були очищені з використанням стандартного RCA процесу. Докладні параметри і етапи процесу RCA можна знайти в [43]. Згодом пластини покривали 380 циклами ALD  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , синтезованого з TMA і  $\text{H}_2\text{O}$  в основному при  $200\text{ C}^\circ$ . Таким чином, для дослідницьких цілей були проведені процеси осадження ALD при  $120\text{ C}^\circ$ ,  $150\text{ C}^\circ$  і  $200\text{ C}^\circ$ .

Puurunen et al. [43] дав докладний опис механізму реакції в 2005 році. Процес осадження заснований на хімічних послідовних реакціях, як показано нижче:



Після завершення першої половини циклу поверхня пасивується групами  $\text{CH}_3$ . Далі стадія очистки видаляє надлишок TMA і метану, наступна стадія реакції:



Тут  $\text{H}_2\text{O}$  реагує з групами  $\text{CH}_3$ , в той час як  $\text{CH}_4$  залишає камеру, а моношар  $\text{Al}_2\text{O}_3$  синтезується. Загальна послідовність повторюється до тих пір, поки плівка необхідної товщини не виросте.

Таким чином, чиста реакція:



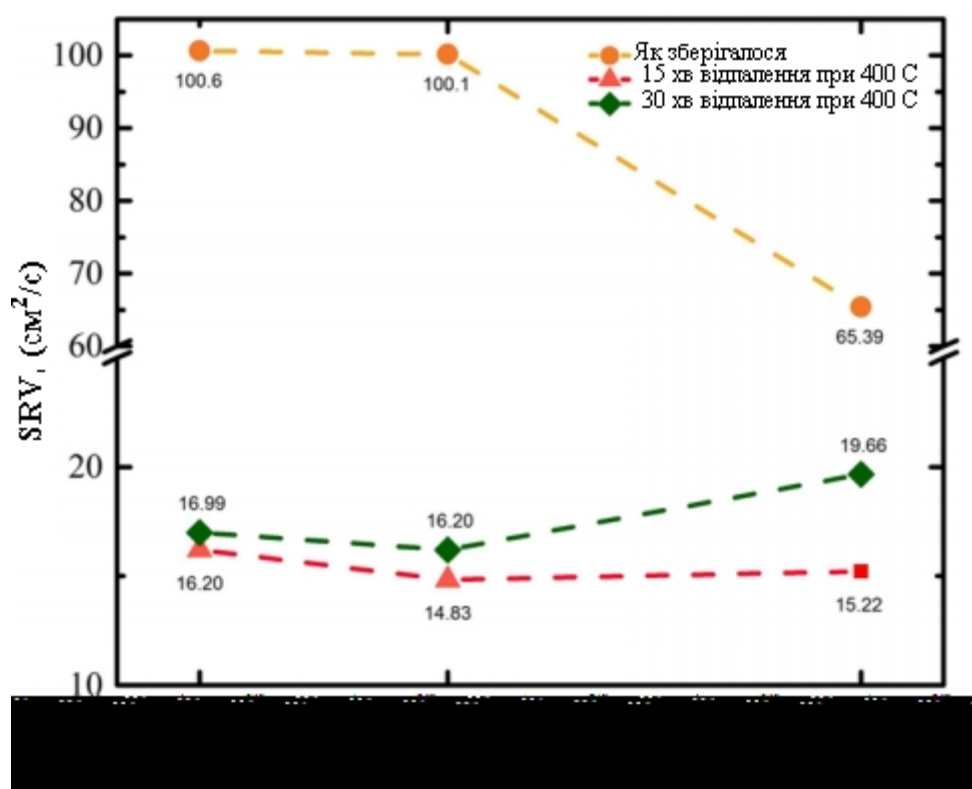
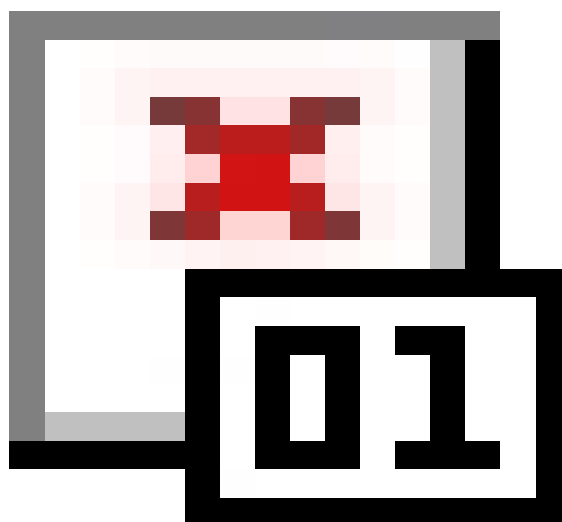


Рисунок 2.8 – Результати пасивації  $\text{Al}_2\text{O}_3$  для вирощених плівок при 120 °C, 150 °C, 200 °C:

а) ефективний час життя; б) швидкість поверхневої рекомбінації [44]

## 2.5 Утворення гетеропереходу та нанесення $\text{TiO}_2$

Оксид титану ( $\text{TiO}_2$ ) вже широко використовується в фотоелектричній промисловості в якості антивідбивного покриття [45]. Тим не менш подальші застосування обмежувалися технологією нанесення тонких плівок до тих пір, поки не були застосовані методи хімічного осадження з парової фази (CVD), зокрема ALD.

ALD технологія заснована на самообмеженні процесі росту, що дозволяє отримати високу точність товщини плівки, однорідність, відсутність дірок і в цілому чудові кристалічні властивості ультратонких плівок  $\text{TiO}_2$  [45]. Як наслідок,  $\text{TiO}_2$  став цікавим кандидатом в якості носія селективного контакту з його широкою енергетичною забороненою зоною і практично ідеальним збігом зони провідності з Si.

Як електронно-селективний контакт n-типу в гетеропереході Si (SHJ) сонячного елемента,  $\text{TiO}_2$  вже довів, що є відмінним носієм селективних контактів. Оксид титану має енергію забороненої зони 3,2 eV з невеликим зсувом зони провідності на кремній ( $\Delta E_c = 0,05$  eV), що дозволяє електрону проходити із зони провідності кремнію через шар  $\text{TiO}_2$ ; крім того, він має великий зсув валентної зони (вище  $E_v = 2$  eV), яка блокує перенесення дірок через шар  $\text{TiO}_2$  [46], як показано на рис. 2.9. Сонячний елемент SHJ з блокуванням задньої стінки шаром  $\text{TiO}_2$  досяг ефективності 21,6%. Крім того,  $\text{TiO}_2$  також показав чудові пасивуючі властивості на поверхнях c-Si. ALD  $\text{TiO}_2$  добре сумісне з одночасним осадженням  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в тій же системі осадження [47]. Обидві плівки  $\text{TiO}_2$  і  $\text{Al}_2\text{O}_3$  є матеріалами з фіксованим негативним зарядом з ідеальними оптичними властивостями (низьке оптичне поглинання у видимому діапазоні і показники заломлення 2,4 і 1,65 відповідно).

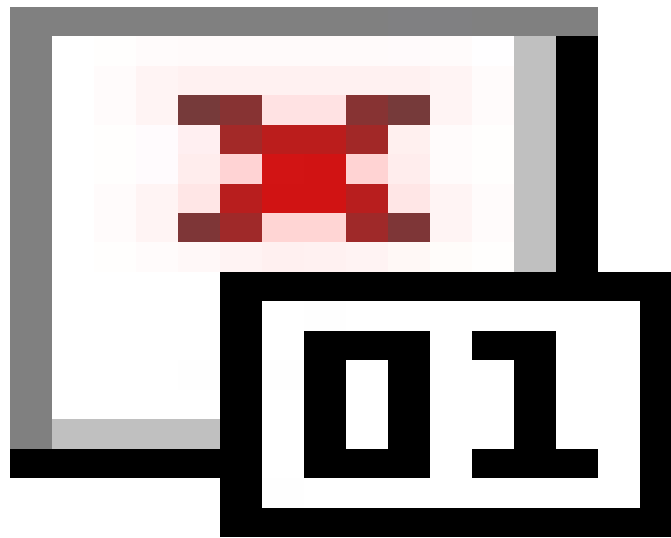


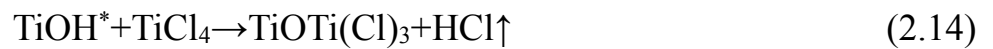
Рисунок 2.9 –Енергетична діаграма гетеропереходу  $\text{TiO}_2\text{-Si}$ :

a) n-p структура, b) n-n структура

ALD процес оксиду титану ( $\text{TiO}_2$ ) добре описаний у багатьох публікаціях [48, 49]. Плівка  $\text{TiO}_2$  була нанесена на поверхню пластини c-Si термічним методом ALD (Picosun R200). Для зростання хімічного шару  $\text{SiO}_2$  як окислювач використовувалася кислота  $\text{HNO}_3$ , що нагрівається до  $95^\circ\text{C}$  в скляному стакані для окислення пластини протягом 10 хвилин. Кінцева товщина шару  $\text{SiO}_2$  рівна 1,38 нм, яка була виміряна методом еліпсометрії з апроксимацією Тауца-Лоренца. Для зростання прошарку  $\text{Al}_2\text{O}_3$  була використана та ж система ALD Picosun R200. Плівка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  була синтезована з попередника триметилалюмінію (ТМА) і окислювача  $\text{H}_2\text{O}$  в 10 циклів при  $200^\circ\text{C}$  (детальніше описано в п. 2.4).

Плівки  $\text{TiO}_2$  були синтезовані з використанням попередника  $\text{TiCl}_4$  і  $\text{H}_2\text{O}$  в якості окислювача. Процес ALD  $\text{TiO}_2$  заснований на наступній хімічній реакції, яка відбувається в циклах після того, як кожен попередник був

дозований в камері. Насправді ця реакція здійснюється шляхом поділу бінарних реакцій на окремі півреакції:



Після завершення першої півреакції поверхня пасивується групами  $\text{TiCl}^*$ . Потім на етапі продувки видаляють надлишок  $\text{TiCl}_4$  і хлористого водню. Наступна стадія реакції:



Тут  $\text{H}_2\text{O}$  реагує з групами  $\text{TiCl}^*$ , а  $\text{HCl}$  залишає камеру і синтезується  $\text{TiO}_2$ . Загальна послідовність повторюється до тих пір, поки плівка необхідної товщини не буде вирощена [49]. Отже, реакція така:



Також після осадження ALD  $\text{TiO}_2$  осаджували 15 нм напівпрозорої плівки Al. Верхній контакт Al був сформований з електронного променя або методом термічного випаровування через тіньову маску з круговою формою діаметром 8 мм. Спочатку електронно-променевої метод використовувався для осадження Al, однак, щоб зменшити радіаційне пошкодження тонкої плівки  $\text{TiO}_2$ , алюміній згодом був осаджений теплове випаровування.

## 2.6 NiO як несучий селективний контакт р-типу

Однією з найбільш багатообіцяючих і важливих концепцій було використання розробка дірково-селективних контактів на основі гетеропереходу NiO-Si. Оксид нікелю (II) або NiO недавно привернув увагу як потенційний носій селективного контакту в сонячних елементах [50]. NiO

є оптично прозорим напівпровідниковим матеріалом з широкою забороненою зоною з високою роботою виходу ( $> 5$  eV) ( $E_g = 3,6$  eV), має відмінну рівність валентної зони з кремнієм і високе зміщення зони провідності ( $\Delta E_c = 2,6$  eV) (див. рис. 2.10). Крім того, NiO хімічно стабільний і має одну стабільну кристалічну фазу [51]. В результаті NiO діє як прозорий дірково-провідний контакт для сонячних елементів SHJ.



Рисунок 2.10 –Енергетична діаграма гетеропереходу NiO-Si:  
п-р структура, (б) n-n структура

Існують різні методи нанесення, які можуть гарантувати високу якість плівок NiO. Серед них RF і DC розпорошення від мішені NiO [52] і окислення частинок Ni в кисневій плазмі, електронно-пучкове осадження від мішені NiO і ALD зростання NiO [53] і т. д. Кожен з цих методів можуть працювати при низьких температурах, що дає додаткову перевагу в порівнянні з високотемпературним процесом. Ці методи мають свої переваги і недоліки. Синтезовані плівки були нанесені для формування гетероперехода NiO-Si, щоб досліджувати властивості пасивації NiO, ізотипічні та анізотипічні властивості гетеропереходу. Експерименти з розвитку

гетероперехода NiO і c-Si з властивостями електронного блокування проводилися з метою вивчення селективного контакту носіїв поля задньої поверхні, випрямлення селективного контакту носіїв і пасивації плівок NiO в гетероперехід NiO-Si.

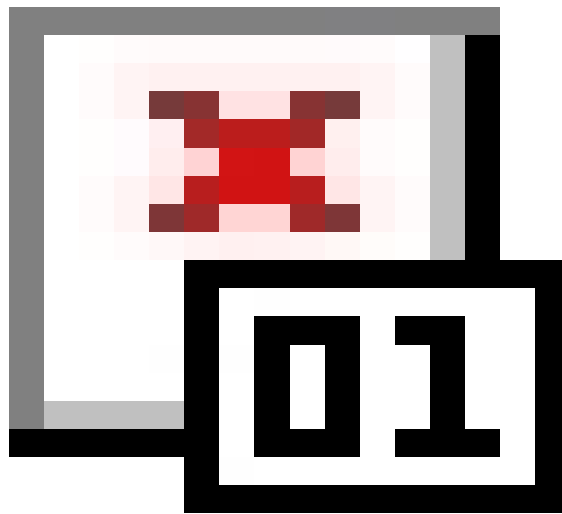


Рисунок 2.11 – Ефективний час життя носіїв

Всі методи дозволили осаджувати плівки NiO з утворенням структур NiO-Si (p). Тим не менш, була виявлена величезна різниця між методами радіочастотного розпилення і ALD. Добре відомо, що процеси РЧ-розпилення викликають пошкодження поверхні через енергетичні іони. З іншого боку, процес ALD використовує поверхневу реакцію атомного масштабу і дозволяє дуже точно осаджувати NiO без пошкоджень. Кількісний аналіз методів нанесення було зроблено на основі вимірів ефективного терміну служби з вимірюванням терміну служби (MDP метод), представлених на рис. 2.11 [52].



## 2.7 Формування кінцевої структури сонячного елемента та опис результатів

В якості кроку (1) для кремнієвої пластини використовувався текстурований струм короткого замикання. Чорний кремній був отриманий за допомогою методу реактивного іонного травлення з часом травлення - 14 хв; тиск 38 мТорр; потужність котушки 3000 Вт; потужність столу 10 Вт, швидкість травлення - 98 нм / хв. Другий (2) етап полягав в нанесенні шару  $\text{Al}_2\text{O}_3$  за допомогою методу атомно-шарового осадження (ALD) для покращення пасивації та зменшення рекомбінації носіїв на кордоні розділу. Процес ALD  $\text{Al}_2\text{O}_3$  був проведений з ТМА і попередником  $\text{H}_2\text{O}$ , як описано в п. 2.4, при 200 °С з 380 циклами, що призвело до утворення 32 нм товстого шару. Після осадження плівки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  відпалювали в атмосфері  $\text{N}_2$  при 400 °С протягом 30 хв.

Третім (3) кроком була УФ-фотолітографія, щоб підготувати отвір на задній стороні пластини до селективного осадження плівки на носії  $\text{NiO}$ . Четвертий етап - осадження  $\text{NiO}$  з ВЧ-напиленням від  $\text{Ni}$ -мішені в ділянки  $\text{Ar}$  і  $\text{O}_2$ , що призводить до окислення  $\text{Ni}$  в плазмі і його осадження на  $\text{Si}$ -пластині. Процес RF-напилення  $\text{NiO}$  проводився при таких умовах: 20% співвідношення  $\text{Ar} / \text{O}_2$ , потужність 20 Вт, тиск 5 мТорр, температура 20 °С протягом 3 хвилин і в результаті утворилася плівка  $\text{NiO}$  товщиною 15 нм.

П'ятим етапом було нанесення електронного пучка плівки  $\text{Ni}$  з метою отримання товстої плівки. Наступний крок (6)  $\text{Al}$  за допомогою електронно-променевої техніки був нанесений з товщина 300 нм. Сьомий крок (7) включав ультрафіолетову фотолітографію з лицьового боку в порядку підготувати отвір на зворотному боці пластини до зростання плівки  $\text{TiO}_2$ . Восьмий крок (8) було осадження  $\text{TiO}_2$  методом ALD при температурі 80 °С з 110 циклами, що приводять до утворення плівки товщиною 15 нм. І останнім етапом (9) було нанесення плівки  $\text{Ti}$  товщиною 5 нм, щоб відрегулювати висоту бар'єру отвори з подальшим осадженням  $\text{Al}$  плівки товщиною 300 нм

за допомогою електронно-променевої техніки. Кінцева структура показана на рис. 2.12.

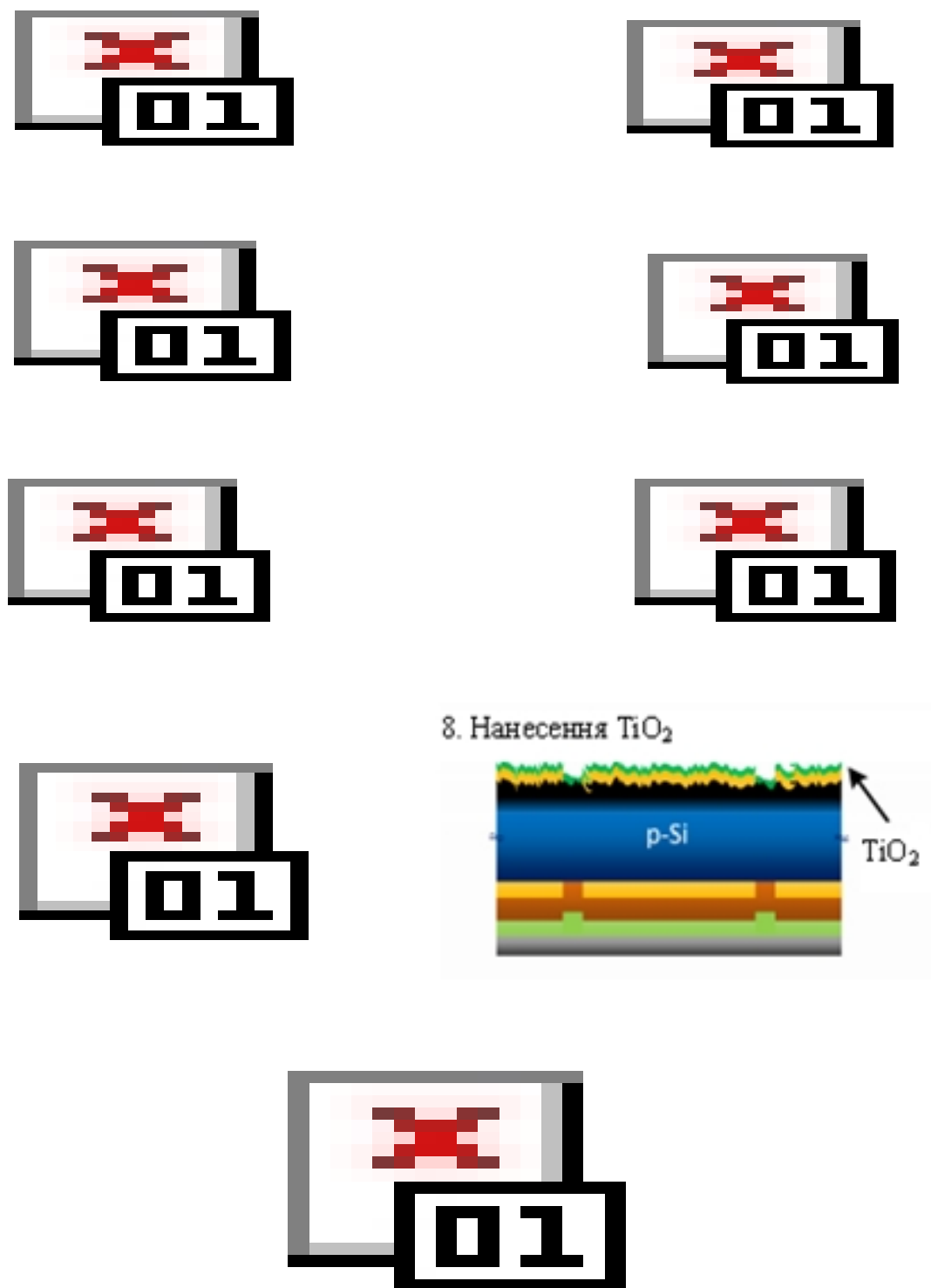


Рисунок 2.12 – Процес створення структури сонячного елемента

Сучасний стан кремнію в фотоелектричній галузі - це зворотний контакт кремнієвого сонячного елемента з аморфним кремнієвим носієм селективних контактів і рекордної ефективності 26,7% [53]. Технологія сонячних елементів на основі аморфного кремнію (a-Si: H) забезпечує кращу пасивацію кремнієвих поверхонь, низькотемпературну обробку і високу масштабованість для промислового виробництва [54]. Хоча a-Si: H і селективні контакти на основі SiO<sub>2</sub> показали чудові характеристики, ці технології мають ряд фундаментальних проблем, пов'язаних з термостабільністю і паразитних фотонів. Поглинання в плівках a-Si: H, складний процес осадження та токсичність, і досить високі виробничі витрати.

Тому існує зацікавленість у розробці високоякісних несучих селективних контактів (CSC), які можуть легко осідати з низькими витратами і з мінімальним використанням небезпечних матеріалів [54]. Однією з найбільш перспективних груп матеріалів для селективних контактів носіїв є перехідний метал-оксиди (ТМО). ТМО були вперше використані в органічних і перовскітних сонячних елементах [55]. Ці CSCs показали потенціал в якості альтернативних CSCs в кремнієвих фотоелектричних елементах через низьку вартість етапів обробки. Для кожної групи несучих селективних контактів існує широкий вибір матеріалів: як доречний оксид молібдену CSC (MoO<sub>x</sub>), оксид нікелю (NiO<sub>x</sub>), оксид ванадію (VO<sub>x</sub>) і оксид вольфраму (WO<sub>x</sub>) [55]. Вони були досліджені в якості заміни шару a-Si: H p-типу в кремнієвих сонячних елементах з рекордною ефективністю 22,5% [56].

Для електронно-селективного CSC n-типу TiO<sub>2</sub> є найбільш перспективним матеріалом в сонячних елементах SHJ і також був випробуваний в даній роботі. TiO<sub>2</sub> має енергію забороненої зони 3.2 eV. Одиначний гетероперехідний кремнієвий сонячний елемент з блокуванням задньої стінки шаром TiO<sub>2</sub> шар досяг ефективності 21,6% [56]. Величезною перевагою оксидів металів є можливість нанесення цих матеріалів за допомогою атомно-шарового осадження (ALD) і забезпечити високо

конформні плівки на будь-якій морфології поверхні, без отворів та з відмінними пасивуючими властивостями. Стає можливим виготовити сонячні елементи з використанням ALD або інших методів з низькою температурою процесу і зниженим рівнем витрат [57].

У поєднанні з поліпшеним текстурованням поверхонь для покращення захоплення світла, таких як RIE для наноструктур чорного кремнію, сонячні елементи з гетеропереходом Si-CSC можуть бути сильним конкурентом для технології гетеропереходів на основі a-Si: H. Основні переваги засновані на нанесенні цих матеріалів методом ALD, що також призводить до низької токсичності і низької температури осадження процесу і, в принципі, можливість розміщення всіх функціональних тонких плівок в одній технологічній лінії ALD при атмосферному тиску (тобто просторовому атмосферному ALD).

Концепція пристрою сонячного елемента Si з селективними контактами  $\text{TiO}_2$  і NiO була раніше запропоновано і змодельовано Ісламом і співавт. [58]. Іслам і ін. запропонували використовувати  $\text{TiO}_2$  і NiO плівки в якості носіїв селективних контактів на Si і передбачали можливість отримання ефективності перетворення енергії вище 27%, що близько до межі Шоклі-Кейссера [58]. Ця концепція має потенціал стати високоефективними сонячними елементами, які могли б реалізувати пророкування Свансона.

Свансон передбачив, що високоефективні сонячні елементи з високою напругою розімкненого ланцюга, струму короткого замикання і ефективністю перетворення потужності вище 25% можуть бути реалізовані з ефективними селективними контактами, один для блокування електронів, а інший для блокування дірок. Ці матеріали мають майже ідеально рівні енергетичні зони в зоні провідності (для  $\text{TiO}_2$ ) і валентній зоні (для NiO) і величезний бар'єр валентної зони для дірок на межі поділу  $\text{TiO}_2$ -Si і бар'єр зон провідності для електронів на межі поділу NiO-Si, як показано на рис. 2.13, а також наведена кінцева структура сонячного елемента на рис. 2.14.



## **3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

Захист працівників під час трудового процесу від небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що негативно впливають на життя, здоров'я, а також працездатність людини, гарантування належних умов праці є важливими аспектами охорони праці, як складової безпеки життєдіяльності.

У цьому розділі проводиться аналіз шкідливих, небезпечних [59] та уражаючих для людини та навколишнього довкілля чинників, які виникають при проведенні дослідження структури сонячного елемента на наноструктурній основі. В ньому розглядаються, в тому числі, технічні рішення з виробничої санітарії та гігієни праці, визначення перевірочне КПО для однобічного природного освітлення, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні дослідження, безпека в надзвичайних ситуаціях.

### **3.1 Гігієна праці та виробнича санітарія**

#### **3.1.1 Склад повітря робочої зони та мікроклімат**

Вибираємо для приміщення для проведення дослідження структури сонячного елемента на наноструктурній основі, категорію важкості робіт за фізичним навантаженням – легка Іа.

Згідно із [60] допустимі параметри мікроклімату в робочій зоні для теплого та холодного періодів року приведені в таблиці Х.1 додатку Х.

При опроміненні менше 25% поверхні тіла людини, допустима інтенсивність теплового опромінення складає 100 Вт/м<sup>2</sup>.

Повітря робочої зони не повинно містити шкідливих речовин з концентраціями вище гранично допустимих концентрацій (ГДК) у повітрі робочої зони і підлягає систематичному контролю для запобігання

можливості перевищення ГДК, значення яких для роботи з ЕОМ наведено в таблиці Б.2 додатку Б.

При використанні ЕОМ джерелом забруднення повітря є також іонізація молекул речовин, що містяться у повітрі. Рівні позитивних та негативних іонів повинні відповідати [62] і приведені в таблиці Б.3 додатку Б.

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату та складу повітря робочої зони передбачено такі заходи: у приміщенні має бути розміщена система опалення для холодного і кондиціонування для теплого періодів року; застосування вентиляції, яка видаляє забруднення або нагріте повітря з приміщення, а також за допомогою неї контролюється швидкість руху повітря і вологість.

### **3.1.2 Виробниче освітлення**

З метою забезпечення раціональних гігієнічних умов на робочих місцях великі вимоги висуваються щодо якісних та кількісних показників освітлення.

З погляду задач зорової роботи в приміщенні, де проводиться робота з дослідження структури сонячного елемента на наноструктурній основі, згідно [61] знаходимо, що вони відносяться до IV розряду зорових робіт. Приймаємо контраст об'єкта з фоном – великий та характеристику фону – середню, яким відповідає підрозряд  $\alpha$ .

Нормативні значення коефіцієнта природного освітлення (КПО) і мінімальні значення освітленості для штучного освітлення приведені в таблиці Б.4 додатку Б.

Так як приміщення знаходиться у м. Вінниця (друга група забезпеченості природним світлом), а вікна орієнтовані за азимутом  $225^\circ$ , то для таких умов КЕО визначатиметься за формулою [61, 62]

$$e_N = e_n m_N [\%], \quad (3.1)$$

де  $e_n$  – табличне значення КЕО для бокового освітлення, %;

$m_N$  – коефіцієнт світлового клімату;

$N$  – порядковий номер групи забезпеченості природним світлом.

За відомими значеннями отримаємо нормовані значення КПО для бокового та суміщеного освітлення:

$$e_{N,b} = 1,5 \cdot 0,85 = 1,28 (\%);$$

$$e_{N,c} = 0,9 \cdot 0,85 = 0,77 (\%).$$

З метою встановлення нормативних значень параметрів освітлення передбачено такі заходи: при недостатньому природному освітленні в світлу пору доби доповнення штучним за допомогою газорозрядних ламп з утворенням системи суміщеного освітлення; застосування загального штучного освітлення в темну пору доби.

Вихідні дані: Розміри приміщення (м):  $20 \times 7,5 \times 3,4$ . Освітлення однобічне симетрично розташованими вікнами, розміри яких (м):  $2,0 \times 2,1$ . Висота від підлоги до підвіконня – 0,8 м. Остіклення подвійне, плетіння металеві. Конфронтуючі будинки відсутні.

Розрахункове значення КПО для бокового освітлення визначається за формулою:

$$e_p^b = (\varepsilon_b q + \varepsilon_{b,y,d} R) r_1 \frac{\tau_0}{K_3} [\%], \quad (3.2)$$

де  $\varepsilon_b$  – геометричний КПО в розрахунковій точці при боковому освітленні, який враховує пряме світло неба;

$q$  – коефіцієнт, який враховує нерівномірну яскравість хмарного неба;



$\varepsilon_{\text{бод}}$  – геометричний КПО в розрахунковій точці при боковому освітленні, який враховує світло, відбите від протилежних будинків;

$R$  – коефіцієнт, який враховує відносну яскравість протилежного будинку;

$r_1$  – коефіцієнт, що враховує підвищення КПО при боковому освітленні завдяки світлу, яке відбивається від поверхонь приміщення та підстилаючого шару, прилеглого до будинку.

Знайдемо загальний коефіцієнт світлопропускання за формулою:

$$\tau_0 = \tau_1 \tau_2 \tau_3 \tau_4 \tau_5, \quad (3.3)$$

де  $\tau_1$  – коефіцієнт світлопропускання матеріалу;

$\tau_2$  – коефіцієнт, що враховує втрати світла у віконній рамі;

$\tau_3$  – коефіцієнт, що враховує втрати світла у несучих конструкціях (при боковому освітленні  $\tau_3 = 1$ ; при верхньому –  $\tau_3 = 0,8-0,9$ );

$\tau_4$  – коефіцієнт, що враховує втрати світла у сонцезахисних пристроях;

$\tau_5$  – коефіцієнт, що враховує втрати світла у захисній сітці, яка встановлюється під ліхтарями (при суміщеному освітленні приймається рівним 0,9; при природному 1).

Оскільки протилежні будівлі відсутні, то  $\varepsilon_{\text{бод}}R = 0$ . Тоді формула (3.2) буде мати вигляд:

$$e_p^{\text{б}} = \varepsilon_{\text{б}} q r_1 \frac{\tau_0}{K_3} [\%], \quad (3.4)$$

Геометричний коефіцієнт природної освітленості, який враховує пряме світло від неба в будь-якій точці приміщення при боковому освітленні, визначається за формулою

$$\varepsilon_0 = 0,01n_1n_2 [\%], \quad (3.5)$$

де  $n_1$  – кількість променів, які проходять від неба через світлові отвори в розрахункову точку на поперечному перерізі приміщення (рисунок 3.1);

$n_2$  – кількість променів, які проходять від неба через світлові отвори в розрахункову точку на плані приміщення (рисунок 3.1).

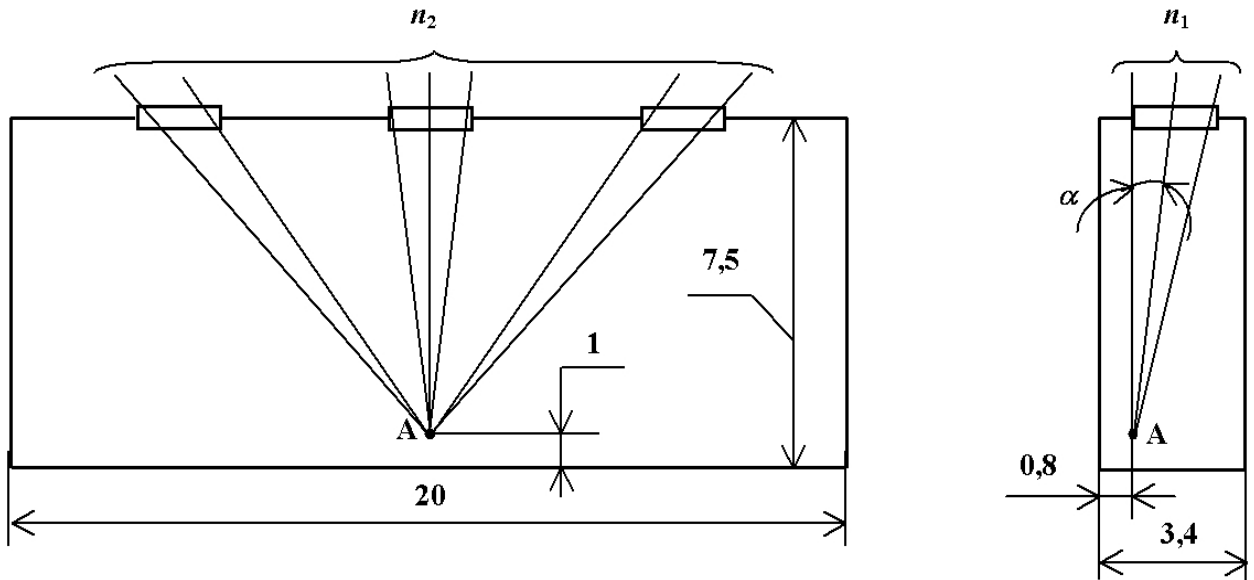


Рисунок 3.1 – Визначення кількості променів  $n_1$  і  $n_2$ , які проходять через світлові отвори при боковому освітленні

За допомогою рисунку 3.1 визначаємо:  $n_1 = 3$ ;  $n_2 = 7$ .

Для визначення коефіцієнту  $r_1$  необхідно знайти середній коефіцієнт відбиття приміщення за формулою:

$$\rho_{CP} = \frac{\rho_{стелі} S_{стелі} + \rho_{стін} S_{стін} + \rho_{\Pi} S_{\Pi}}{S_{стелі} + S_{стін} + S_{\Pi}}, \quad (3.6)$$

де  $\rho_{стелі}$ ,  $\rho_{стін}$ ,  $\rho_n$  – коефіцієнти відбиття стелі, стін та підлоги відповідно;

$S_{стелі}$ ,  $S_{стін}$ ,  $S_n$  – площа стелі, стін, та підлоги відповідно, м<sup>2</sup>.

Приймаємо  $\rho_{стелі} = 0,725$ ;  $\rho_{стін} = 0,7$ ;  $\rho_n = 0,25$ . Для одинарного остіклення вибираємо  $\tau_1 = 0,9$ . Для дерев'яного виду віконних рам  $\tau_2 = 0,75$ . Для бокового освітлення приймаємо  $\tau_3 = 1$ . Оскільки сонцезахисні пристрої не використовуються, то приймаємо  $\tau_4 = 1$ . Для природного освітлення приймаємо  $\tau_5 = 1$ . Приймаємо коефіцієнт запасу  $K_3 = 1,3 \dots 1,5 = 1,4$ .

Площа стелі рівна площі підлоги і знайдеться за формулою

$$S_{стелі} = S_{\Pi} = L_{\Pi} B_{\Pi} [\text{м}^2], \quad (3.7)$$

де  $L_{\Pi}$ ,  $B_{\Pi}$  – довжина та ширина підлоги відповідно, м.

Площу стін знайдемо за формулою

$$S_{стін} = H_{стіни}(2L_{\Pi} + 2B_{\Pi}) [\text{м}^2], \quad (3.8)$$

де  $H_{стіни}$  – висота стіни, м.

Після підстановки відомих значень у формули (3.7, 3.8, 3.6) отримаємо:

$$\begin{aligned} S_{стелі} &= S_{\Pi} = 20 \cdot 7,5 = 150 (\text{м}^2); \\ S_{стін} &= 3,4 \cdot (2 \cdot 20 + 2 \cdot 7,5) = 187 (\text{м}^2); \\ \rho_{ср} &= \frac{0,725 \cdot 150 + 0,7 \cdot 187 + 0,25 \cdot 150}{150 + 187 + 150} = 0,569. \end{aligned}$$

Для визначення коефіцієнту  $r_1$  необхідно також визначити співвідношення

$$B_n / h; l / B_n; L_n / B_n, \quad (5.9)$$

де  $h$  – висота від рівня умовної робочої поверхні до верхнього краю вікна, м;

$l$  – відстань розрахункової точки до зовнішньої стіни, м.

Знайдемо висоту від рівня умовної робочої поверхні до верхнього краю вікна за формулою:

$$h = H_{\text{стіни}} - h_p - (H_{\text{стіни}} - H_B - h_{\Pi}) = H_B + h_{\Pi} - h_p \text{ [м]}, \quad (3.10)$$

де  $h_p = 0,8$  м – висота робочої поверхні.

Розрахункову точку для однобічного природного освітлення приймаємо на відстані 1 м від стіни, протилежної від вікна

$$l = B_n - 1 \text{ [м]}. \quad (3.11)$$

Після підстановки відомих значень у формули (3.11, 3.10) отримаємо

$$l = 7,5 - 1 = 6,5 \text{ (м)};$$

$$h = 2,0 + 0,8 - 0,8 = 2 \text{ (м)}.$$

Таким чином, співвідношення, необхідні для визначення коефіцієнту  $r_1$  дорівнюють:

$$B_n / h = 7,5 / 2 = 3,75;$$

$$l / B_n = 6,5 / 7,5 = 0,87;$$

$$L_n / B_n = 20 / 7,5 = 2,67.$$

За отриманими значеннями і величиною  $\rho_{\text{ср}}$  вибираємо коефіцієнт  $r_1 = 9,35$ .

На поперечному перерізі приміщення (рисунок 3.1) визначаємо, що середина ділянки неба, яку видно з розрахункової точки А через світловий отвір, знаходиться під кутом  $\alpha = 9^\circ$ . За значенням цього кута методом лінійної інтерполяції знаходимо коефіцієнт  $q = 0,563$ .

Після підстановки відомих значень у формули (3.3, 3.5, 3.4) отримаємо:

$$\tau_0 = 0,9 \cdot 0,75 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0,68;$$

$$\varepsilon_{\bar{\sigma}} = 0,01 \cdot 3 \cdot 7 = 0,21 (\%);$$

$$e_p^{\bar{\sigma}} = 0,21 \cdot 0,563 \cdot 9,35 \frac{0,68}{1,4} = 0,537 (\%).$$

Оскільки  $e_p^{\bar{\sigma}} = 0,537 \% < e_N = 1,28 \%$ , то природна освітленість в даному приміщенні є недостатньою.

### 3.1.3 Виробничі віброакустичні коливання

Зважаючи на те, що при експлуатації пристроїв крім усього іншого обладнання використовується устаткування, робота якого генерує шум та вібрацію, необхідно передбачити захист від шуму та вібрації.

Визначено, що приміщення, де проводиться робота з дослідження структури сонячного елемента на наноструктурній основі може містити робочі місця із шумом та вібрацією, що створюється вентиляторами блоку живлення комп'ютера і кулерами мікропроцесора, відеокарти.

Для попередження травмування працюючих від дії шуму він підлягає нормуванню. Головним документом стосовно промислового шуму, що діє в нашій країні, є [63], згідно з яким нормовані рівні звукового тиску, рівні звуку та еквівалентні рівні шуму на робочих місцях у виробничих приміщеннях не повинні перевищувати значень, які приведені у таблиці Б.5 додатку Б. Норми виробничих вібрацій наведені в таблиці Б.6 додатку Б для локальної вібрації.

Для покращення віброакустичного клімату у приміщенні передбачено такі заходи: постійне змащування підшипників вентиляторів блоку живлення комп'ютера та кулерів відеоадаптера та мікропроцесора; передбачено використовувати в приміщенні штори із щільної тканини.

### 3.1.4 Виробничі випромінювання

Величина напруженості електромагнітного поля на робочих місцях з персональними ЕОМ мають не перевищувати граничнодопустимі, які складають 20 кВ/м.

Експозиційна доза рентгенівського випромінювання на відстані 5 см від екрана до корпусу монітора при будь-яких положеннях регулювальних пристроїв не повинні перевищувати  $7,74 \cdot 10^{-12}$  Кл/кг, що відповідає потужності еквівалентної дози 0,1 мБер/год (100 мкР/год) у відповідності до [64].

З метою гарантування захисту та досягнення нормованих рівнів випромінювань необхідно застосовувати приєкранні фільтри, локальні світлофільтри та інші засоби захисту, що пройшли випробування в акредитованих лабораторіях і мають щорічний гігієнічний сертифікат.

### **3.2 Промислова та пожежна безпека при проведенні дослідження**

Сучасний етап розвитку техніки, автоматизації розробок та досліджень характеризується широким використанням на робочому місці ЕОМ. Наявність великої кількості прикладних програм сприяє тому, що ЕОМ є основним робочим інструментом інженера в галузі радіотехніки.

#### **3.2.1 Безпека щодо організації робочих місць**

Робочі місця з відеодисплейним терміналом повинні розміщатися на відстані не менше як 1,5 м від стіни з віконними прорізами, від інших стін – на відстані 1 м, одне від одного на відстані не менше як 1,5 м. У випадку розміщення робочих місць потрібно виключити ймовірність прямого засвічування екрану джерелом природного освітлення. Робоче місце раціонально розташовувати таким чином, щоб природне світло падало на нього збоку, переважно зліва [66].

Поверхня екрана має знаходитись на віддалі 0,4-0,7 м від органів зору працівника. Висота робочої поверхні столу під час виконання роботи сидячи повинна налаштовуватись у межах 0,68-0,8 м. Робочий стіл повинен мати простір для ніг висотою не менше 0,6 м, шириною не менше ніж 0,5 м, глибиною на рівні колін не менше 0,45 м та на рівні витягнутої ноги не менше ніж 0,65 м [67].

### **3.2.2 Електробезпека**

Основними причинами ураження електричним струмом в даному приміщенні можуть бути: робота під напругою при ремонтних роботах, несправність устаткування, випадкове торкання до металевих частин, які опинилися під напругою чи струмоведучих частин. Згідно [68] дане приміщення належить до приміщень із підвищеною небезпекою ураження електричним струмом в наслідок наявності значної (більше 75 %) відносної вологості. Тому безпека використання електрообладнання має гарантуватись комплексом заходів, що включають застосування ізоляції струмовідних частин, захисних блокувань, захисного заземлення тощо [69].

### **3.2.3 Пожежна безпека**

Відповідно до [70] приміщення, в якому проводиться робота з дослідження структури сонячного елемента на наноструктурній основі, відноситься до категорії пожежної небезпеки В. Дане приміщення відноситься до 2-го ступеня вогнестійкості, в якому приміщення знаходяться в будівлі з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням листових і плитних негорючих матеріалів.

Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій приміщення, що розглядається наведені в таблиці Б.7. В таблиці Б.8 наведено протипожежні норми проектування будівель і споруд.

Встановлюємо, що приміщення, де проводиться робота з дослідження, має бути обладнане двома вогнегасниками, пожежним щитом, ємністю з піском.

### **3.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи сонячної панелі в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій**

В даній частині розділу необхідно провести дослідження безпеки роботи сонячної панелі в умовах дії іонізуючих випромінювань та електромагнітного імпульсу так як саме ці фактори можуть вивести з ладу пристрій, чи порушити його роботу.

Вплив радіації призводить як до оборотних, так і необоротних змін електричних властивостей твердотільних приладів і інтегральних схем. Оскільки такі зміни можуть приводити до відмов електронних блоків, значні зусилля останнім часом направляються на розробку методів, що дозволяють уникнути погіршення параметрів мікроелектронного обладнання при опроміненні. У багатьох випадках вирішувати цю проблему доцільно шляхом створення радіаційно-стійких приладів і інтегральних схем [71].

До часток, які при влученні в прилади й схеми можуть викликати небажані наслідки, відносяться електрони, протони, фотони, альфа-частинки, важкі іони. Основні наслідки впливу опромінення на електронні пристрої – іонізація і зсув атомів. Вони викликають різні зміни в напівпровідникових приладах.

При бомбардуванні кремнію фотони й заряджені частинки можуть викликати зсув атомів з положення рівноваги. У випадку фотонів цей процес реалізується за рахунок появи комптоновських електронів з досить великою



енергією, які потім взаємодіють із ядрами мішені. Поки ядрам передається мінімальна енергія (для кремнію 21 eВ), буде відбуватися зсув атомів. Відсутність атома у своєму нормальному положенні – це перший вид радіаційного дефекту.

В опромінену кремнії можуть зустрічатися різні типи дефектів. Елементарні дефекти іноді називають точковими або ізольованими. Можливе виникнення областей з більшим числом досить близько розташованих дефектів. Така область називається кластером дефектів або каскадом зсувів. Згідно з фізикою напівпровідників, атоми домішок в решітках кремнію мають дискретні рівні енергії, які лежать у забороненій зоні між мінімумом зони провідності й максимумом валентної зони. Порушення періодичності атомної решітки може привести до виникнення деяких рівнів енергії в забороненій зоні. До їхньої появи призводять, зокрема, радіаційні дефекти, і саме ці дефектні стани або центри впливають на електричні властивості напівпровідникових приладів. Тому є необхідним провести дослідження стійкості роботи сонячної панелі саме при впливах іонізуючих випромінюваннях та електромагнітному імпульсі.

### **3.3.1 Дослідження безпеки роботи сонячної панелі в умовах дії іонізуючих випромінювань**

За критерій безпеки роботи сонячної панелі в цих умовах приймається таке максимальне значення дози опромінення елементної бази ( $D_{зв}^{P}$ ), при якому в елементній базі можуть виникнути зміни, але РЕА ще буде працювати з необхідною якістю.

В якості критерію по стійкості роботи можна використати граничне значення дози радіації :

$$D_{зв} = k \cdot D_{зв} \cdot k_{носл}, \quad (3.12)$$

де  $k$  – коефіцієнт надійності (приймається  $k = 0,92$ );

$D_{ze}$  – доза, яка відповідає початку зворотних змін в елементах;

$k_{носл}$  - коефіцієнт послаблення радіації (приймається  $k_{носл} = 5$ ).

Доза, яка відповідає початку зворотних змін в елементах, що дорівнює мінімальному значенню  $D_{зрi}$ . Оскільки дана мережа міститиме в своїй будові мікросхеми, тому допустима експозиційна доза цих елементів РЕС становитиме  $D_{зрi} = 10^3$  (Р). Отже подальші розрахунки проводяться відповідно до цього значення.

Шляхом підстановки числових значень в (7.1) розраховується  $D_{зр}$ :

$$D_{зр} = 0,92 \cdot 10^3 \cdot 5 = 4600(P)$$

Отже, працездатність сонячної панелі в умовах дії іонізуючих випромінювань можлива при значеннях  $D_{зр} < 4600P$ .

### 3.3.2 Дослідження безпеки роботи сонячної панелі в умовах дії електромагнітного імпульсу

Початкові дані: напруга живлення:  $U_{жс} = 12B$ ; максимальна довжина горизонтальної струмопровідної частини електричної принципової схеми:  $l_B = 5$  м.

В якості показника стійкості елементів сонячної панелі до дії електромагнітного імпульсу використовують коефіцієнт безпеки [71]:

$$K_6 = 20 \lg \frac{U_\delta}{U_{B(\Gamma)}} \geq 40 \text{ [дБ]} \quad (3.13)$$

де  $U_\delta$  - допустиме коливання напруги живлення;

$U_{B(\Gamma)}$  - напруга наведена за рахунок електромагнітного імпульсу у вертикальних (горизонтальних) струмопровідних системах.

Спочатку визначається допустиме коливання напруги живлення:

$$U_{\delta} = U_{\text{жс}} + \frac{U_{\text{жс}}}{100} \cdot N, \quad (3.14)$$

де  $N$  - допустимі коливання (приймається  $N = 5\%$ )

Шляхом підстановки числових даних в (3.14) отримується:

$$U_{\delta} = 12 + \frac{12}{100} \cdot 5 = 12,6(B).$$

Визначається максимально очікувана напруга в горизонтальних лініях [71]:

$$U_B = \frac{U_{\delta}}{10^{\frac{K}{20}}} \quad (3.15)$$

Після підстановки числових даних:

$$U_B = \frac{12,6}{10^{\frac{40}{20}}} = 0,126(B).$$

З формули визначається горизонтальна складова напруженості електричного поля[71]:

$$U_B = E_{\Gamma} \cdot l_B. \quad (3.16)$$

Отже,  $E_{\Gamma}$  визначається:

$$E_{\Gamma} = \frac{U_B}{l_B}. \quad (3.17)$$

Після підстановки числових даних в формулу (3.17):

$$E_{\Gamma} = \frac{0,126}{5} = 0,0252(B/m).$$

Вертикальна складова напруженості електричного поля визначається з формули[71]:

$$E_{\Gamma} = 10^{-3} \cdot E_B. \quad (3.18)$$

Тоді  $E_B$  буде:

$$E_B = 0,0252 \cdot 1000 = 25,2(B/m).$$

Це значення вертикальної складової напруженості електромагнітного поля можна вважати граничним, до якого гарантується безпечна робота сонячної панелі.

### **3.4 Висновки**

В результаті виконання цього розділу було опрацьовано такі питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення перевірочне КПО для однобічного природного освітлення, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні дослідження структури сонячного елемента на наноструктурній основі, безпека в надзвичайних ситуаціях.

Отже, в даному розділі було проведено дослідження безпеки роботи сонячної панелі при дії іонізуючих випромінювань та електромагнітного імпульсу. Як видно з отриманих результатів, сонячна панель є стійкою до дії іонізуючих випромінювань.

Згідно з виконаними розрахунками безпека роботи сонячної панелі в умовах дії електромагнітного імпульсу можлива при напруженості вертикальної складової електричного поля в значеннях  $E_B < 25,2 \text{ В/м}$ .

## 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 4.1 Розрахунок витрат на проведення НДДКР стосовно дослідження та розробки структури сонячного елемента на наноструктурній основі

В техніко-економічному обґрунтуванні представленому в першому розділі даної магістерської кваліфікаційної роботи було приблизно обґрунтовано доцільність проведення НДДКР. Тому в даному розділі будуть проведені більш детальні розрахунки витрат на проведення НДДКР стосовно дослідження та розробки структури сонячного елемента на наноструктурній основі.

Для економічного розрахунку проведення НДДКР потрібно скласти кошторис витрат, який передбачає розрахунок визначених основних статей витрат.

Основна заробітна плата дослідників та розробників, яка розраховується за формулою [72]:

$$Z_o = \frac{M}{T_p} \cdot t, \quad (4.1)$$

де  $M$  – місячний посадовий оклад конкретного розробника (дослідника), грн.;

$T_p$  – число робочих днів в місяці, 21 дн;

$t$  – число днів роботи розробника (дослідника).

Проведені розрахунки зводимо до таблиці.

Таблиця 4.1 – Основна заробітна плата дослідників та розробників

| Найменування посади                          | Міс<br>ячний<br>посадовий<br>оклад, грн. | Оплат<br>а за робочий<br>день, грн. | Ч<br>исло<br>днів<br>роботи | Витрат<br>и на заробітну<br>плату, грн. |
|----------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| 1. Керівник проекту                          | 107<br>20,00                             | 510,4<br>8                          | 3<br>5                      | 17866,<br>67                            |
| 2. Ст. науковий<br>співробітник              | 100<br>55,00                             | 478,8<br>1                          | 2<br>1                      | 10055,<br>00                            |
| 3. Науковий<br>співробітник                  | 970<br>0,00                              | 461,9<br>0                          | 2<br>1                      | 9700,0<br>0                             |
| 4. Інженер-конструктор<br>електронних систем | 957<br>0,00                              | 455,7<br>1                          | 2<br>1                      | 9570,0<br>0                             |
| 5. Технік                                    | 640<br>0,00                              | 304,7<br>6                          | 3<br>5                      | 10666,<br>67                            |
| Разом                                        |                                          |                                     |                             | 57858,<br>33                            |

Витрати на основну заробітну плату працівників ( $Z_p$ ), що здійснюють підготовку робочих місць необхідних для дослідження та розробки структури сонячного елемента на наноструктурній основі, підготовку та формування інформаційних пакетів, підготовку та монтаж обладнання тощо, розраховуються на основі норм часу, які необхідні для виконання даної роботи, за формулою [72]:

$$Z_p = \sum_1^n t_i \cdot C_i \cdot K_c, \quad (4.2)$$

де  $t_i$  - норма часу (трудомісткість) на виконання конкретної роботи, годин;

$n$  - число робіт по видах та розрядах;

$K_c$  - коефіцієнт співвідношень, який установлений в даний час Генеральною тарифною угодою між Урядом України і профспілками,  $K_c = 1$ ;

$C_i$  - погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, який виконує відповідну роботу, грн./год.

$C_i$  визначається за формулою [72]:

$$C_i = \frac{M_n \cdot K_i}{T_p \cdot T_{zm}}, \quad (4.3)$$

де,  $M_n$  - мінімальна місячна оплата праці, грн.,  $M_n = 4173,00$  грн.;

$K_i$  - тарифний коефіцієнт робітника відповідного розряду;

$T_p$  - число робочих днів в місяці,  $T_p = 21$  дн.;

$T_{zm}$  - тривалість зміни,  $T_{zm} = 8$  годин.

Проведені розрахунки внесемо до таблиці.

Таблиця 4.2 – Витрати на основну заробітну плату працівників

| Найменування робіт                              | Трудомісткість, нормо-годин | Розряд роботи | Тарифний коефіцієнт | Погодинна тарифна ставка, грн. | Величина оплати, грн. |
|-------------------------------------------------|-----------------------------|---------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1. Встановлення допоміжного обладнання          | 1<br>6,00                   | 2             | 1,1                 | 27,3                           | 437,1                 |
| 2. Інсталяція програмного забезпечення          | 1<br>0,50                   | 4             | 1,3                 | 33,5                           | 352,1                 |
| 3. Встановлення модулів                         | 1<br>6,00                   | 5             | 1,7                 | 42,2                           | 675,6                 |
| 4. Монтаж імітаторів сонячних елементів         | 3<br>2,00                   | 4             | 1,3                 | 33,5                           | 1073,06               |
| 5. Формування бази даних результатів вимірювань | 1<br>20,00                  | 3             | 1,2                 | 29,8                           | 3576,86               |
| 6. Підготовка приміщення                        | 8,<br>00                    | 2             | 1,1                 | 27,3                           | 218,59                |
| Разом                                           |                             |               |                     |                                | 6333,40               |

Додаткова заробітна плата розробників, дослідників та працівників, які приймали участь в дослідженнях та розробці НДДКР з дослідження та розробки структури сонячного елемента на наноструктурній основі розраховується як 10% від основної заробітної плати розробників та працівників:

$$Z_d = Z_o \cdot 10 / 100\% \quad (4.4)$$

$$Z_d = (57858,33 + 6333,40) \cdot 10 / 100 \% = 6419,17 \text{ (грн.)}$$

#### 4.2 Нарахування на заробітну плату дослідників та працівників

Згідно діючого законодавства нарахування на заробітну плату складають 22% від суми основної та додаткової заробітної плати:

$$H_z = (Z_o + Z_d) \cdot 22\% / 100\% \quad (4.5)$$

$$H_z = (57858,33 + 6333,40 + 6419,17) \cdot 22\% / 100\% = 15534,40 \text{ (грн.)}$$

Витрати на матеріали на даному етапі проведення НДДКР пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальної системи, тому дані витрати формуються на основі офісних витратних матеріалів.

Витрати на матеріали, що були використані при проведенні досліджень, розраховуються по кожному виду матеріалів за формулою [72]:

$$M = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i \quad (4.6)$$

де, -  $H_i$  - витрати матеріалу  $i$ -го найменування, кг;

$C_i$  - вартість матеріалу  $i$ -го найменування, грн./кг.;

$K_i$  - коефіцієнт транспортних витрат,  $K_i = 1,1$ ;



$n$  - кількість видів матеріалів,

Проведені розрахунки зводимо до таблиці.

Таблиця 4.3 – Витрати на основні матеріали

| Найменування матеріалу, марка, тип, сорт                                                                                                                | Одиниця виміру | Ціна за одиницю, грн. | Витрачено | Вартість витраченого матеріалу, грн. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------|-----------|--------------------------------------|
| Папір офісний А4 білий (80%)                                                                                                                            | уп.            | 112,0<br>0            | 6,0       | 672,00                               |
| Диск оптичний (CD-R)                                                                                                                                    | шт.            | 10,25                 | 6,0       | 61,50                                |
| Органайзер офісний ЕКО-81ВІС                                                                                                                            | уп.            | 85,00                 | 6,0       | 510,00                               |
| Канцелярське приладдя                                                                                                                                   | ко<br>мпл.     | 194,0<br>0            | 5,0       | 970,00                               |
| Картридж змінний Canon 216AF                                                                                                                            | шт             | 985,0<br>0            | 2,0       | 1970,00                              |
| FLASH-пам'ять 32Gb                                                                                                                                      | шт.            | 350,0<br>0            | 2,0       | 700,00                               |
| Композитна структура SnO <sub>2</sub> :F/ P-Si/p-Si/                                                                                                    | ко<br>мпл.     | 6500,<br>00           | 2,0       | 13000,0<br>0                         |
| Тонкі провідні оксиди (ТПО), In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SnO <sub>2</sub> , ZnO, In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , CdO, ITO, IFO | ко<br>мпл.     | 7200,<br>00           | 1,0       | 7200,00                              |
| Електроліт                                                                                                                                              | л              | 56,00                 | 2,0       | 112,00                               |
| Всього                                                                                                                                                  |                |                       |           | 25195,5<br>0                         |

З врахуванням транспортних витрат вартість матеріалів складе

$$M = 25195,50 \cdot 1,1 = 27715,05 \text{ грн.}$$

Витрати на комплектуючі (основне обладнання, емулятори), що були використані при дослідженні сонячних елементів, розраховуються за формулою:

$$H = \sum_{i=1}^n H_i \cdot C_i \cdot K_i, \quad (4.7)$$

де:  $N_i$  - кількість комплектуючих  $i$ -го виду, шт.;

$Ц_i$  - покупна ціна комплектуючих  $i$ -го виду, грн.;

$K_i$  - коефіцієнт транспортних витрат,  $K_i = 1,1$ ;

$n$  - кількість видів матеріалів.

Проведені розрахунки зводимо до таблиці.

Таблиця 4.4 – Витрати на комплектуючі для проведення НДР

| Найменування комплектуючих         | Кількість, шт. | Ціна за штуку, грн. | Сума, грн. |
|------------------------------------|----------------|---------------------|------------|
| Пристій електрохімічного травлення | 1              | 7500,00             | 7500,00    |
| Система спреї-піролізу             | 1              | 8320,00             | 8320,00    |
| Компресор                          | 1              | 4130,00             | 4130,00    |
| Аерограф                           | 4              | 284,00              | 1136,00    |
| Термопара                          | 2              | 562,00              | 1124,00    |
| Нагрівач                           | 2              | 487,00              | 974,00     |
| Електродвигун                      | 1              | 1276,00             | 1276,00    |
| Всього                             |                |                     | 24460,00   |

Витрати на комплектуючі з урахуванням транспортних витрат складають:

$$H = 24460,00 \cdot 1,1 = 26906,00 \text{ (грн.)}$$

### 4.3 Амортизація обладнання для проведення досліджень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню можуть бути розраховані з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_об}{T_об} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.8)$$

де  $C_6$  – балансова вартість обладнання, приміщень тощо, які використовувались для розробки нового технічного рішення, грн.;

$t_{вик}$  – термін використання обладнання, приміщень під час розробки, місяців;

$T_6$  – строк корисного використання обладнання, приміщень тощо, років.

Проведені розрахунки необхідно звести до таблиці.

Таблиця 4.5 - Величина амортизаційних відрахувань

| Найменування обладнання                          | Балансова вартість, грн | Строк корисного використання, років | Термін використання обладнання, міс. | Величина амортизаційних відрахувань, грн |
|--------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|
| Комп'ютеризований програмно-аналітичний комплекс | 21807,00                | 5                                   | 2                                    | 726,90                                   |
| Метрологічний комплекс МСХ13-А54                 | 12046,00                | 5                                   | 2                                    | 401,53                                   |
| Люксометр FITCH-32                               | 7580,00                 | 4                                   | 2                                    | 315,83                                   |
| Спектрогеліограф                                 | 22830,00                | 5                                   | 2                                    | 761,00                                   |
| Вольтметр                                        | 6500,00                 | 5                                   | 2                                    | 216,67                                   |
| Осцилограф                                       | 7320,00                 | 5                                   | 2                                    | 244,00                                   |
| Амперметр                                        | 6890,00                 | 5                                   | 2                                    | 229,67                                   |
| Програмне забезпечення аналізу числових даних    | 16568,00                | 3                                   | 2                                    | 920,44                                   |
| Місце оператора спеціалізоване                   | 9780,00                 | 5                                   | 2                                    | 326,00                                   |
| Офісна оргтехніка                                | 12300,00                | 4                                   | 2                                    | 512,50                                   |
| Дослідницька лабораторія                         | 200000,00               | 25                                  | 2                                    | 1333,33                                  |

|        |         |
|--------|---------|
| Всього | 5987,88 |
|--------|---------|

Витрати на силову електроенергію на проведення досліджень розраховують за формулою [72]:

$$V_e = B \cdot P \cdot \Phi \cdot K_n, \quad (4.9)$$

де,  $B$  – вартість 1 кВт-години електроенергії,  $B = 2,50$  грн./кВт –година;

$P$  – встановлена потужність обладнання, кВт.;

$\Phi$  – фактична кількість годин роботи обладнання, годин. ;

$K_n$  – коефіцієнт використання потужності.

Всі проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.6 – Витрати на електроенергію при проведенні досліджень

| Найменування обладнання                          | Кількість годин роботи обладнання, год. | Встановлена потужність, кВт | Коефіцієнт використання потужності | Величина оплати |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------|
| Комп'ютеризований програмно-аналітичний комплекс | 240,0                                   | 0,52                        | 1                                  | 312,00          |
| Метрологічний комплекс МСХ13-А54                 | 180,0                                   | 0,76                        | 1                                  | 342,00          |
| Люксометр FITCH-32                               | 15,0                                    | 0,06                        | 1                                  | 2,25            |
| Спектрогеліограф                                 | 15,0                                    | 0,08                        | 0,8                                | 2,40            |
| Вольтметр                                        | 35,0                                    | 0,12                        | 1                                  | 10,50           |
| Осцилограф                                       | 35,0                                    | 0,2                         | 1                                  | 17,50           |
| Амперметр                                        | 35,0                                    | 0,12                        | 1                                  | 10,50           |
| Місце оператора спеціалізоване                   | 240,0                                   | 0,32                        | 1                                  | 192,00          |
| Офісна оргтехніка                                | 42,0                                    | 0,96                        | 1                                  | 100,80          |
| Пристій електрохімічного травлення               | 12,0                                    | 0,32                        | 1                                  | 9,60            |
| Система спреї-піролізу                           | 12,0                                    | 0,15                        | 1                                  | 4,50            |

|               |      |      |   |        |
|---------------|------|------|---|--------|
| Компресор     | 12,0 | 0,2  | 1 | 6,00   |
| Нагрівач      | 6,0  | 0,72 | 1 | 10,80  |
| Електродвигун | 6,0  | 0,27 | 1 | 4,05   |
| Всього        |      |      |   | 1024,9 |
|               |      |      |   | 0      |

Інші витрати охоплюють: загальновиробничі витрати, адміністративні витрати, витрати на відрядження, матеріали, окремі непередбачені витрати, зв'язок, витрати на інтернет-послуги тощо.

Інші витрати доцільно приймати як 200...300% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників. Величина інших витрат складе:

$$I = (57858,33 + 6333,40) * 200\% / 100\% = 128383,46 \text{ (грн.)}$$

Загальні витрати на проведення науково-дослідної роботи.

Сума всіх попередніх статей витрат дає загальні витрати на проведення науково-дослідної роботи:

$$B = 57858,33 + 6333,40 + 6419,17 + 15534,40 + 27715,05 + 26906,00 + 5987,88 + 1024,90 + 128383,46 = 276162,59 \text{ (грн.)}$$

#### 4.4 Визначення коефіцієнта наукової значимості отриманих результатів науково-дослідної роботи

Коефіцієнт наукової значимості результатів проведеної НДР  $K_{ЗН}$  можна підрахувати за формулою:

$$K_{ЗН} = \frac{\sum_1^3 b_i \cdot d_i}{\sum_1^3 b_{\max} \cdot d_i}, \quad (4.10)$$

де  $b_i$  - значимість отриманих результатів:  $b_1$  - ступінь наукової новизни,  $b_2$  - рівень теоретичної обґрунтованості,  $b_3$  - ступінь експериментальної перевірки результатів.

Бальна оцінка отриманих результатів наведена в таблиці 4.7.

Максимальне значення отриманих результатів можна прийняти в межах 7...10 балів;

$d_i$  - питома вага кожної характеристики, значення якої наведено в таблиці;

3 – кількість характеристик, за якими була зроблена оцінка результатів науково-дослідної роботи.

Таблиця 4.7 – Показники для оцінювання наукової значимості результатів виконання НДР

| ар<br>ак<br>те<br>ри<br>ст<br>ик<br>и | П<br>итома<br>вага<br>характ<br>ерист<br>ик | Бальна оцінка характеристик                                                                          |                                                                                               |                                                                                                                                            |
|---------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                       |                                             | Ступінь<br>новизни<br>$b_1$                                                                          | Рівень теоретичної<br>обґрунтованості $b_2$                                                   | Ступінь<br>експериментальної<br>перевірки результатів<br>$b_3$                                                                             |
|                                       |                                             | 1                                                                                                    | 3...5                                                                                         | 7...10                                                                                                                                     |
|                                       | 0,<br>500                                   | Часткове<br>удосконалення<br>виробів,<br>технологій,<br>матеріалів,<br>програмного<br>продукту, тощо | Суттєве<br>удосконалення виробів,<br>технологій, матеріалів,<br>програмного продукту,<br>тощо | Нові напрямки в<br>розробці виробів,<br>технологій, матеріалів,<br>програмного продукту,<br>тощо. Створення<br>принципово нової<br>техніки |
|                                       | 0,<br>333                                   | Позитивне<br>рішення на основі<br>зроблених<br>узагальнень                                           | Установлення<br>залежностей, які<br>використовувались в<br>інших випадках                     | Відкриття нових<br>шляхів рішення задачі                                                                                                   |
|                                       | 0,<br>167                                   | Експеримен<br>тальна перевірка не<br>робилась                                                        | Результати<br>перевірялись на невеликій<br>кількості даних                                    | Результати<br>перевірені на великій<br>кількості даних                                                                                     |

Підставляючи числові дані  $d_1 = 0,5$ ,  $d_2 = 0,333$ ,  $d_3 = 0,167$ ,  $b_{\max} = 10$  у вираз ( ) оцінимо наукову значимість отриманих результатів:

$$K_{3H} = \frac{7 \cdot 0,5 + 8 \cdot 0,333 + 8 \cdot 0,167}{10 \cdot 0,5 + 10 \cdot 0,333 + 10 \cdot 0,167} = 0,75$$

#### 4.5 Внесок дослідника в досягнення отриманих результатів НДР

Внесок дослідника в досягнення отриманих результатів НДР можна розрахувати за формулою:

$$V = \frac{k_{ТВИ} \cdot Z_i}{\sum_1^n k_{ТВИ} \cdot Z_i}, \quad (4.11)$$

де  $k_{ТВИ}$  - коефіцієнт творчої участі кожного виконавця НДР, який оцінюється наступним чином: проведення досліджень – 3 бали, робоче проектування – 1,5 бали, освоєння – 1,0 балів.

Якщо виконавець приймав участь в декількох видах робіт, то береться сума відповідних балів;

$Z_i$  - заробітна плата кожного виконавця НДР;

$n$  - кількість всіх виконавців НДР,

Розраховуємо внесок дослідника:

$$V = \frac{3 \cdot 9700,00}{3 \cdot 10720,00 + 3 \cdot 9570,00 + 1,5 \cdot 10055,00} = 0,49$$

#### 4.6 Висновки до розділу

Загалом запланована науково-дослідна робота з дослідження та розробки структури сонячного елемента на наноструктурній основі вимагає вкладення для проведення досліджень в межах 276162,00 грн.

Отримані результати досліджень мають високий рівень наукової значимості (в межах 0,75), що свідчить про доцільність проведення розробок.

## **ВИСНОВКИ**

Проведено аналіз основних видів та структур сонячних панелей, проаналізовано їх переваги та недоліки.

Були розглянуті основні питання фізики процесу роботи фотоелементів, було розглянуто технологію виготовлення сонячної панелі на наноструктурній основі та запропоновано її структуру.

Було розглянуто питання охорони праці і безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії, визначення безпечної відстані від джерела ЕМВ, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення розробки мікропроцесорного пристрою зчитування інформації радіочастотним методом, безпека у надзвичайних ситуаціях.

В четвертому розділі було розглянуто питання економічної доцільності, зокрема, зростання чистого прибутку, абсолютної і відносної ефективності вкладених інвестицій та терміни їх окупності.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

- Проворов Є. С. Сонячні батареї на основі низькорозмірних нанокompatитних структур / Ю. С. Кравченко, Є. С. Проворов // XLVII Науково-технічна конференція, 22 березня 2018. ВНТУ. – Вінниця 2018.  
 Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-frtzip/all-frtzip/2018/paper/view/5205/4250>.
- Проворов Є. С. Сонячний елемент з підвищеною ефективністю енергоперетворення / Ю. С. Кравченко, Є. С. Проворов // XIV Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні наукові досягнення - 2018». – Прага, Publishing House “Education and Science”, 2018.  
 Режим доступу: [http://www.rusnauka.com/Page\\_ru/239064](http://www.rusnauka.com/Page_ru/239064).
- Костюченко В. В. Сонячний елемент на наноструктурованому чорному кремнії / Ю. С. Кравченко, Є. С. Проворов, В. В. Костюченко // XV Міжнародна науково-практична конференція «Вісті сучасної науки - 2019» Шефїлд, Publishing House “Science and Education”, 2019. – 3 с.  
 Режим доступу: [http://www.rusnauka.com/Page\\_ru/275444](http://www.rusnauka.com/Page_ru/275444)
- J. Melorose, R. Perroy, and S. Careas. “World population prospects”. In: United Nations 1.6042 (2015), pp. 587–92. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- Arno H. M. Smets et al. Solar energy: the physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems. UIT Cambridge Ltd., 2016.

- U.S. Energy Information Administration. International Energy Outlook 2016. Vol. 0484(2016). May 2016. 2016, pp. 1–2. DOI: [www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf).
- Worldometers. World Population Clock. 2017. URL: <http://www.worldometers.info/world-population/>.
- British Petroleum. BP energy outlook 2016. Tech. rep. 9. 2016, pp. 1689–1699. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- Joel E Cohen. “Human Population: The Next Half Century”. In: *Science* 302.5648 (2003), pp. 1172–1175. DOI: 10.1126/science.1088665.
- Robert A. Rohde. “Global Warming Art”. In: (June 2011). URL: <http://www.globalwarmingart.com>. [8] IPCC. “Climate Change 2013: The Physical Science Basis”. In: *Climate Change 2013*. 2013, p. 1535. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.
- Christoph Kost et al. “Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies”. In: Fraunhofer Institut for Solar Energy Systems ISE Levelized November (2013), p. 50. DOI: 10.1613/jair.301.
- Solar Power Europe. Global Market Outlook for Solar Power 2016-2020. Tech. rep. 2016.
- Kunta Yoshikawa et al. “Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%”. In: *Nature Energy* 2.17032 (2017). DOI: 10.1038/nenergy.2017.32.
- Steven Bushong. “Futurist Ray Kurzweil predicts solar industry dominance in 12 years”. In: *Solar Power World* 3.30 (2016), p. 063301.
- Fraunhofer ISE. “Photovoltaics Report”. In: August (2015).
- Pietro Altermatt. Altermatt’s Lectures on Photovoltaics. 2017. URL: <https://www.pvlighthouse.com.au/cms/lectures/altermatt/> (visited on 10/28/2017).
- NREL. Reference Solar Spectral Irradiance: Air Mass 1.5. 2017. URL: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/> (visited on 10/28/2017).
- Newport. Solar Radiation. 2017. URL: <https://www.newport.com/t/introduction-to-solar-radiation> (visited on 10/28/2017).

- SOLARGIS. Global Horizontal Irradiation (GHI) map. 2017. URL: <http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/world> (visited on 10/28/2017).
- A. Becquerel. “Mémoire sur les effets électriques produits sous influence des rayons solaires”. In: *Comptes rendus* 9 (1839), 561–567. DOI: 10.1109/PVSC.2016.7750356.
- Peter Würfel. *Physics of Solar Cells*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2005, pp. 1–186. DOI: 10.1002/9783527618545.
- Методичні вказівки до виконання студентами-магістрантами наукового напрямку економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. В.О. Козловський – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 22 с.
- Frank Feldmann et al. “Tunnel oxide passivated contacts as an alternative to partial rear contacts”. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 131 (2014). DOI: 10.1016/j.solmat.2014.06.015.
- pVEDUCATION lifetime. <http://pveducation.org/pvcdrom/pn-junction/lifetime>. Accessed: 2016-06-23.
- M. A. Green. “Solar cell fill factors: General graph and empirical expressions”. In: *Solid-State Electronics* 24 (1981), pp. 788–789. DOI: 10.1016/0038-1101(81)90062-9.
- National Renewable Energy Laboratory. *Best Research-Cell Efficiencies*. 2017. URL: <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png> (visited on 10/28/2017).
- Wiley. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2017. URL: [http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/\(ISSN\)1099-159X](http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/(ISSN)1099-159X) (visited on 10/28/2017).
- Martin A. Green et al. “Solar cell efficiency tables (version 50)”. In: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 25.7 (2017). PIP-17-089, pp. 668–676. ISSN: 1099-159X. DOI: 10.1002/pip.2909.
- William Shockley, Hans Queisser, and Hans J Queisser. “The Shockley-Queisser limit”. In: *Journal of Applied Physics* 32 (1961), pp. 510–519.

- Louise C. Hirst and Nicholas J. Ekins-Daukes. “Fundamental losses in solar cells”. In: *Progress in Photovoltaics* 19.3 (2011), pp. 286–293. DOI: 10.1002/pip.1024.
- Martin A. Green. “The path to 25 % silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution”. In: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 17.3 (2009), pp. 183–189. DOI: 10.1002/pip.892. [32] Simeon C. Baker-Finch and Keith R. McIntosh. “Reflection of normally incident light from silicon solar cells with pyramidal texture”. In: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19.4 (2011), pp. 406–416. DOI: 10.1002/pip.1050.
- Gerhard Bauer. “Absolutwerte der optischen Absorptionskonstanten von Alkalihalogenidkristallen im Gebiet ihrer ultravioletten Eigenfrequenzen”. In: *Annalen der Physik* 411 (1934), pp. 434–464. DOI: 10.1002/(ISSN)1521-388910.1002/andp.v411:410.1002/andp.19344110405.
- M. A. Green. *Solar Cells - Operating Principles, Technology and System Application*. Kensington, Australia: University of New South Wales, 1992.
- [35] Martin Otto et al. “Black silicon photovoltaics”. In: *Advanced Optical Materials* 3.2 (2015), pp. 147–164. DOI: 10.1002/adom.201400395.
- Stefaan De Wolf et al. “High-efficiency Silicon Heterojunction Solar Cells: A Review”. In: *Green* 2.1 (2012), pp. 7–24. DOI: 10.1515/green-2011-0039.
- “Achievement of More Than 25% Conversion Efficiency With Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cell”. In: *IEEE Journal of Photovoltaics* 4.6 (2014), pp. 1433–1435. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2014.2352151.
- U. Würfel, A. Cuevas, and P. Würfel. “Charge Carrier Separation in Solar Cells”. In: *IEEE Journal of Photovoltaics* 5.1 (2015), pp. 461–469. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2014.2363550.
- David L. Young et al. “Carrier selective, passivated contacts for high efficiency silicon solar cells based on transparent conducting oxides”. In: *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*. Vol. 55. 2014, pp. 1–5. DOI: 10.1109/PVSC.2014.6925147. BIBLIOGRAPHY 129

- Frank Feldmann et al. “Efficient carrier-selective p- and n-contacts for Si solar cells”. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 131 (2014), pp. 100–104. DOI: 10.1016/j.solmat.2014.05.039.
- Mikio Taguchi et al. “24.7% Record efficiency HIT solar cell on thin silicon wafer”. In: *IEEE Journal of Photovoltaics* 4.1 (2014), pp. 96–99. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2013.2282737.
- A. Terakawa. “Review of thin-film silicon deposition techniques for high-efficiency solar cells developed at Panasonic/Sanyo”. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 119 (2013). *Thin-film Photovoltaic Solar Cells*, pp. 204–208. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2013.06.044>.
- Martin Schaper et al. “20.1%-efficient crystalline silicon solar cell with amorphous silicon rear-surface passivation”. In: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 13.5 (2005), pp. 381–386. DOI: 10.1002/pip.641.
- Xinbo Yang et al. “High-Performance TiO<sub>2</sub>-Based Electron-Selective Contacts for Crystalline Silicon Solar Cells”. In: *Advanced Materials* 28.28 (2016), pp. 5891–5897. DOI: 10.1002/adma.201600926.
- Bart Macco. “Status and prospects for atomic layer deposited metal oxide thin films in passivating contacts for c-Si photovoltaics”. In: *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) 9* (2016). DOI: 10.1109/PVSC.2016.7750088.
- Jens Meyer et al. *Transition metal oxides for organic electronics: Energetics, device physics and applications*. 2012. DOI: 10.1002/adma.201201630.
- Luis G. Gerling et al. “Transition metal oxides as hole-selective contacts in silicon heterojunctions solar cells”. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 145 (2016), pp. 109–115. DOI: 10.1016/j.solmat.2015.08.028.
- Jonas Geissbühler et al. “22.5% efficient silicon heterojunction solar cell with molybdenum oxide hole collector”. In: *Applied Physics Letters* 107.8 (2015). DOI: 10.1063/1.4928747.
- Corsin Battaglia et al. “Hole selective MoO<sub>x</sub> contact for silicon solar cells”. In: *Nano letters* 14.2 (2014), pp. 967–71. DOI: 10.1021/nl404389u.

- Corsin Battaglia et al. "Hole selective MoOx contact for silicon heterojunction solar cells". In: 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2014. 2014, pp. 968–970. DOI: 10.1109/PVSC.2014.6925074.
- B. Macco et al. "Low-temperature atomic layer deposition of MoO<sub>x</sub> for silicon heterojunction solar cells". In: *physica status solidi (RRL) - Rapid Research Letters* 9.7 (2015), pp. 393–396. DOI: 10.1002/pssr.201510117.
- Martin Bivour et al. "Molybdenum and tungsten oxide: High work function wide band gap contact materials for hole selective contacts of silicon solar cells". In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 142 (2015), pp. 34–41. DOI: 10.1016/j.solmat.2015.05.031.
- James Bullock et al. "Molybdenum oxide MoOx: A versatile hole contact for silicon solar cells". In: *Applied Physics Letters* 105.23 (2014). DOI: 10.1063/1.4903467.
- James Bullock et al. "N- and p-typesilicon Solar Cells with Molybdenum Oxide Hole Contacts". In: *Energy Procedia*. Vol. 77. 2015. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.063.
- Corsin Battaglia et al. "Silicon heterojunction solar cell with passivated hole selective MoOx contact". In: *Applied Physics Letters* 104.11 (2014), p. 113902. DOI: 10.1063/1.4868880.
- Raisul Islam, Gautam Shine, and Krishna C. Saraswat. "Schottky barrier height reduction for holes by Fermi level depinning using metal/nickel oxide/silicon contacts". In: *Applied Physics Letters* 105.18 (2014), p. 182103. DOI: 10.1063/1.4901193.
- 130 BIBLIOGRAPHY
- Xingtian Yin et al. "19.2% Efficient InP Heterojunction Solar Cell with Electron-Selective TiO<sub>2</sub> Contact". In: *ACS Photonics* 1.12 (2014), pp. 1245–1250. DOI: 10.1021/ph500153c.
- Zu-Po Yang et al. "Atomic Layer Deposition TiO<sub>2</sub> Films and TiO<sub>2</sub>/SiN<sub>x</sub> Stacks Applied for Silicon Solar Cells". In: *Applied Sciences* 6.8 (2016), p. 233. DOI: 10.3390/app6080233.

- Ken Alfred Nagamatsu. "Crystalline silicon photovoltaics via low-temperature TiO<sub>2</sub>/Si and PEDOT/Si heterojunctions." In: Thesis (Ph.D.)—Princeton University, 2016.; Publication Number: AAT 10010662 January (2016).
- Sushobhan Avasthi et al. "Double-heterojunction crystalline silicon solar cell fabricated at 250 °C with 12.9 % efficiency". In: 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2014 (2014), pp. 949–952. DOI: 10.1109/PVSC.2014.6925069.
- Xinbo Yang et al. "High-Performance TiO<sub>2</sub>-Based Electron-Selective Contacts for Crystalline Silicon Solar Cells". In: Advanced Materials (2016), pp. 5891–5897. DOI: 10.1002/adma.201600926.
- Bart Macco. "Status and prospects for atomic layer deposited metal oxide thin films in passivating contacts for c-Si photovoltaics". In: 2016 Ieee 43rd Photovoltaic Specialists Conference (pvsc) September (2016). DOI: 10.1109/PVSC.2016.7750088.
- ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
- ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
- ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.
- Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.
- ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвук та інфразвук.
- ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.
- ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
- Методичні вказівки до опрацювання розділу "Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях" в дипломних проектах і роботах студентів спеціальностей, що пов'язані з функціональною електронікою, автоматизацією та управлінням / Уклад. О. В. Березюк, М. С. Лемешев. –

- Вінниця : ВНТУ, 2012. – 64 с.
- ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К. : Держнаглядохоронпраці, 1998. – 382 с.
- ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.
- Козловський В.О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах. Навчальний посібник. – Вінниця : ВДТУ, 2003. – 75с.



Додаток А  
Технічне завдання





## Додаток Б

Процес RIE для формування наноструктур чорного кремнію

Додаток В  
Процес ALD

## Додаток Г

Результати пасивації для вирощених плівок  $\text{Al}_2\text{O}_3$

## Додаток Д

### Процес утворення структури сонячного елемента

## Додаток Е

Енергетична зонна діаграма сонячного елемента



Додаток Є  
Сонячний елемент

Додаток Ж  
Допустимі значення виробничих чинників

Додаток А  
(обов'язковий)

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем  
Кафедра електроніки та наносистем

ЗАТВЕРДЖУЮ  
завідувач кафедри ЕНС  
д.т.н., проф. Білинський Й.Й

---

«17» вересня 2019 р.

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**

**до магістерської кваліфікаційної роботи**

**Сонячна панель на базі наноструктурних елементів. Частина 1.  
Дослідження та розробка структури сонячного елемента на  
наноструктурній основі**

зі спеціальності 171 - «Електроніка»

Керівник,  
к.ф.-м.н., професор  
\_\_\_\_\_Кравченко Ю. С.

Дипломник,  
студент гр. ЕЛ-18м  
\_\_\_\_\_Проворов Є. С.

Вінниця, 2019 р.

## ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

### 1. Найменування і область застосування

Найменування - Сонячна панель на базі наноструктурних елементів.  
Частина 1. Дослідження та розробка структури сонячного елемента на наноструктурній основі.

Область застосування – сонячна енергетика.

### 2. Основа для (дослідження) розробки

Основою для виконання цієї магістерської кваліфікаційної роботи є завдання на МКР та наказ ректора ВНТУ № 254 від «03» вересня 2019 р.

### 3. Мета та призначення дослідження (розробки)

Мета розробки – підвищення ефективності використання сонячного елемента.

Призначення розробки – використання в сонячних панелях для виробництва електроенергії.

### 4. Джерела розробки

У процесі розробки структури сонячного елемента рекомендовано залучати патентний пошук та використовувати спеціальну літературу, а саме:

1. J. Melorose, R. Perroy, and S. Careas. “World population prospects”. In: United Nations 1.6042 (2015), pp. 587–92. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004.
2. Arno H. M. Smets et al. Solar energy: the physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems. UIT Cambridge Ltd., 2016.
3. Кузнецов Ф.А., Резниченко М.Ф. Кремний для солнечной энергетики// Материалы электронной техники. – 2008. – №4. – С.4
4. Markvart T. Solar electricity, 2nd ed., New York: John Wiley and Sons Inc.; 1996.
5. Бойко І. В. Мікропроцесори та мікроконтролери/ В. І. Бойко та ін. – К.: Вицашк., 2004. – 399 с.
6. Tomson T. Discrete two-positional tracking of solar collectors. Renewable Energy 2008;33:400–5.

### 5. Технічні вимоги

5.1 Вимоги до електричних параметрів та режимів:

- Дослідити та розробити структуру сонячного елемента з використанням чорного кремнію, гетеропереходів на основі NiO та TiO<sub>2</sub>, прозорих провідних оксидів SiO<sub>2</sub> та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;
- Провести моделювання запропонованої структури сонячного елемента на предмет досягнення ефективності сонячного елемента на рівні не гірше, ніж 25%;

- запропонувати технологію виготовлення даних сонячних елементів.

5.2 Вимоги до конструкції:

- кремнієвий сонячний елемент на наноструктурній основі.

5.3 Вимоги до стійкості при механічній дії:

Сонячний елемент має зберігати свої параметри в межах встановлених норм під час та після дії механічних навантажень: вібраційних з частотою 1–2000 Гц і максимальним прискоренням 1–5 g, багатократних ударів тривалістю 13 мс з прискоренням 25–70 g, лінійних навантажень з максимальним прискоренням 25 g.

5.4 Вимоги до стійкості при кліматичній дії:

Сонячний елемент має зберігати свої параметри в межах встановлених норм під час і після дії кліматичних факторів: температури повітря від +120°C (верхнє значення) до –60°C (нижнє значення); відносної вологості навколишнього середовища 70 % при температурі +35°C.

5.5 Вимоги до надійності:

Мінімальне напрацювання сонячного елемента у вказаних режимах та умовах має бути не меншим за 10 000 год.

## **6 Економічні показники:**

Орієнтовна ефективність і термін окупності витрат на розробку й освоєння виробництва продукції, лімітна ціна, економічна перевага розробленої продукції порівняно з кращими зразками.

## **7 Стадії і етапи розробки:**

7.1 Розробка технічного завдання.

7.2 Огляд відомих сонячних елементів за літературними й патентними джерелами.

7.3 Вибір та аналіз варіантів рішення.

7.4 Вибір оптимального варіанта й детальна розробка його конструктивної схеми.

7.5 Розробка структури сонячного елемента.

7.6 Моделювання роботи сонячного елемента.

7.7 Техніко-економічні розрахунки, розробка заходів безпеки життєдіяльності.

7.8 Оформлення текстової документації та ілюстративних матеріалів для захисту МКР.

## **8 Порядок контролю і приймання:**

- рубіжний контроль виконання окремих розділів МКР;
- попередній захист магістерської кваліфікаційної роботи;
- захист МКР перед ДЕК

Додаток Б

Процес RIE для формування наноструктур чорного кремнію

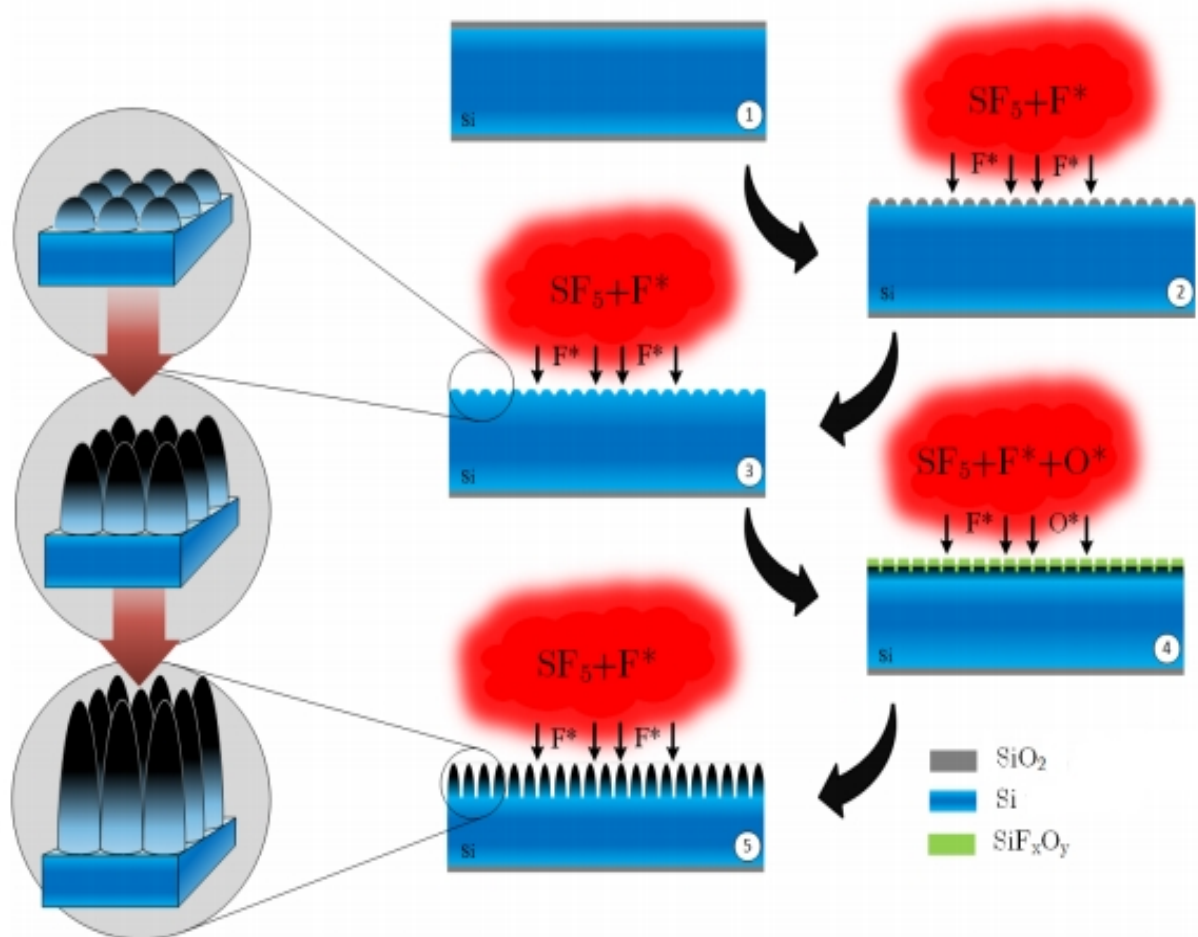


Рисунок Б.1 – Схематичне зображення процесу RIE для формування наноструктур чорного кремнію

Додаток В  
Процес ALD

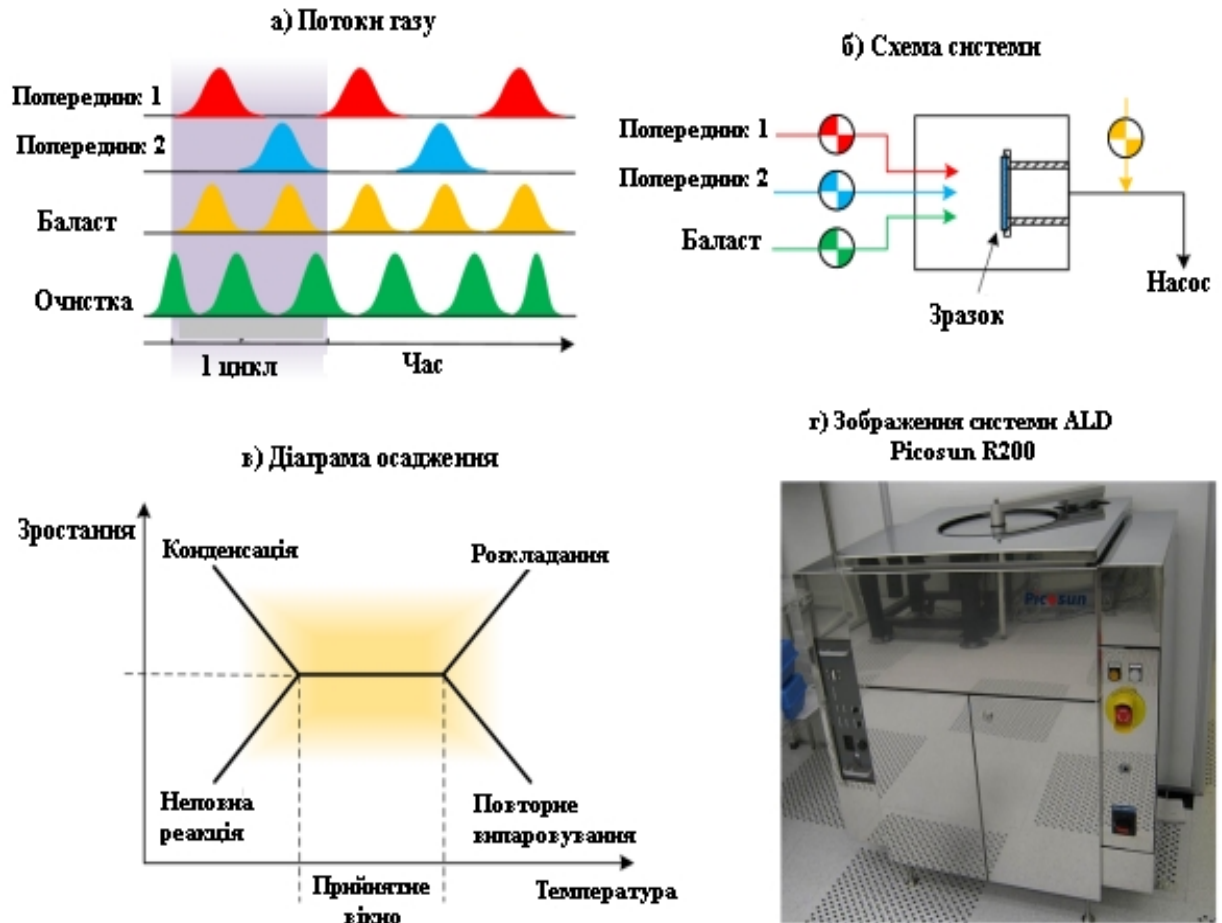


Рисунок В.1 – Зображення процесу ALD

### Додаток Г

#### Результати пасивації для вирощених плівок $\text{Al}_2\text{O}_3$

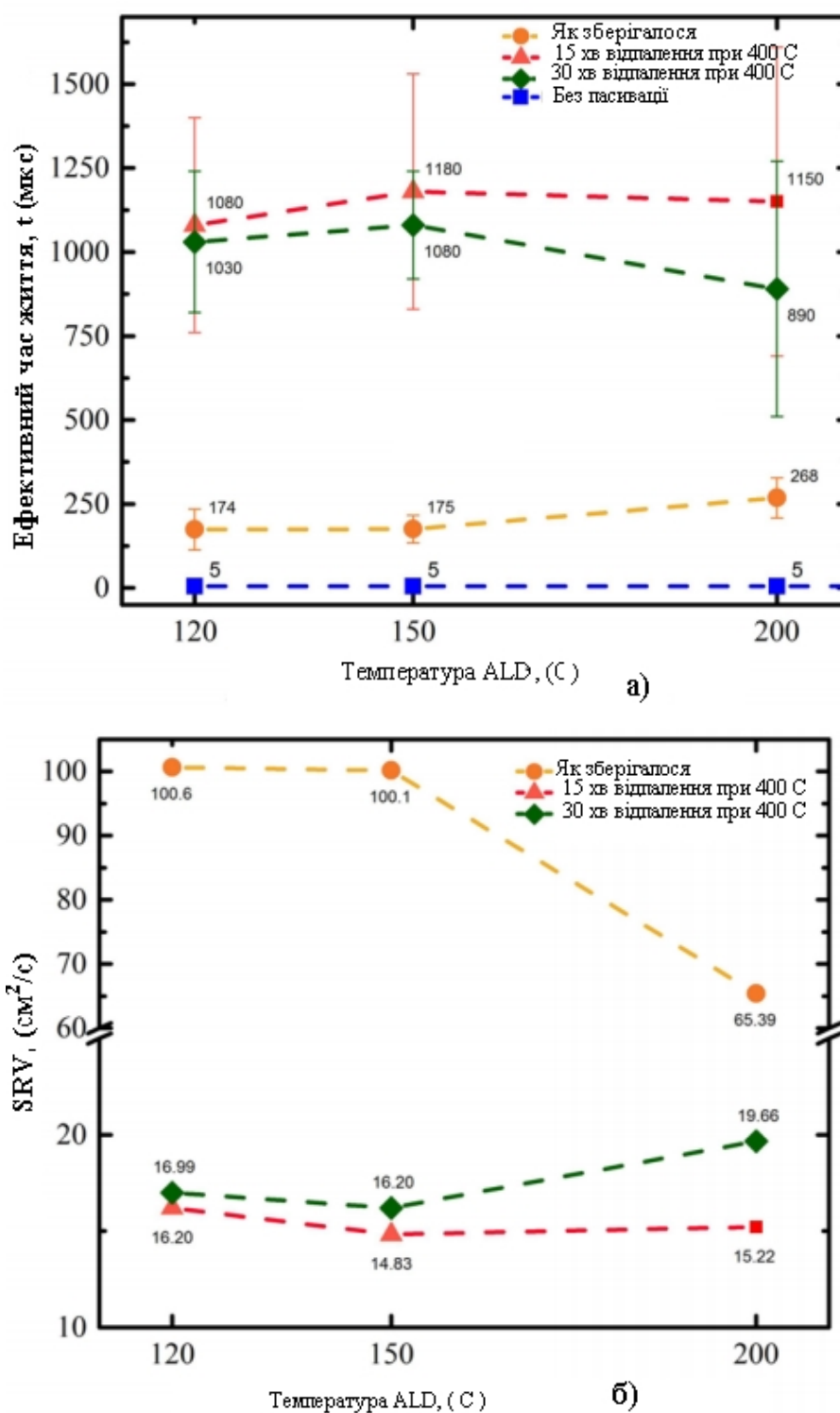


Рисунок Г.1 – Результати пасивації для вирощених плівок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при 120 °C, 150 °C, 200 °C:

а) ефективний час життя; б) швидкість поверхневої рекомбінації



## Додаток Д

### Процес створення структури сонячного елемента

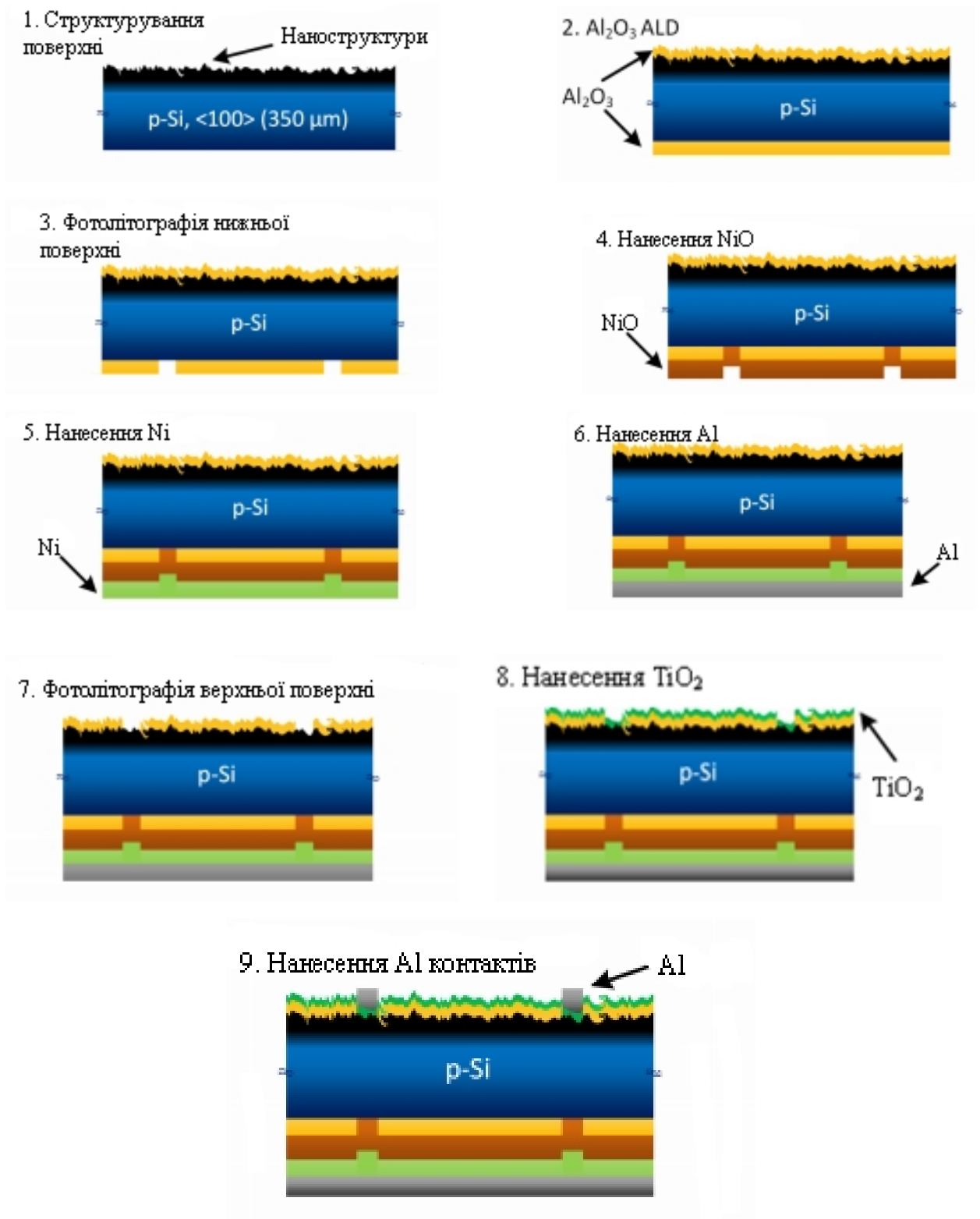


Рисунок Д.1 – Процес створення структури сонячного елемента

Додаток Е

Енергетична зонна діаграма сонячного елемента

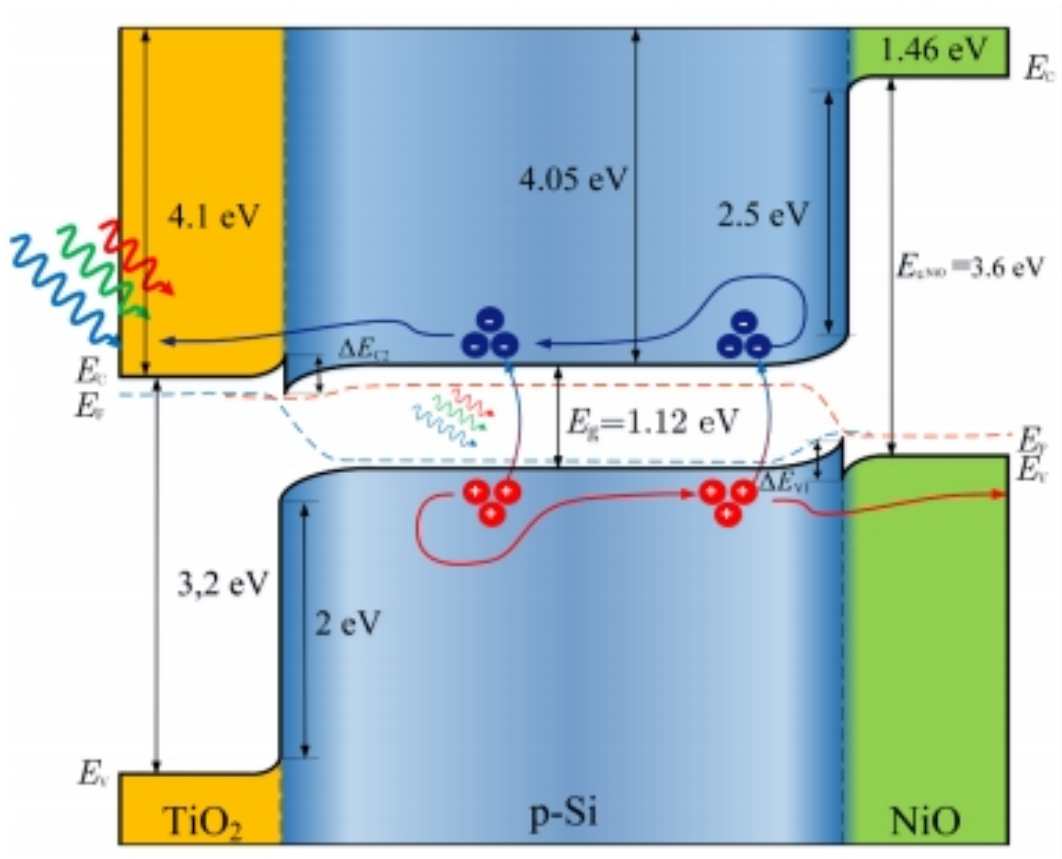


Рисунок Е.1 – Енергетична зонна діаграма пропонуваного сонячного елемента TiO<sub>2</sub>-Si-NiO

Додаток Є  
Сонячний елемент

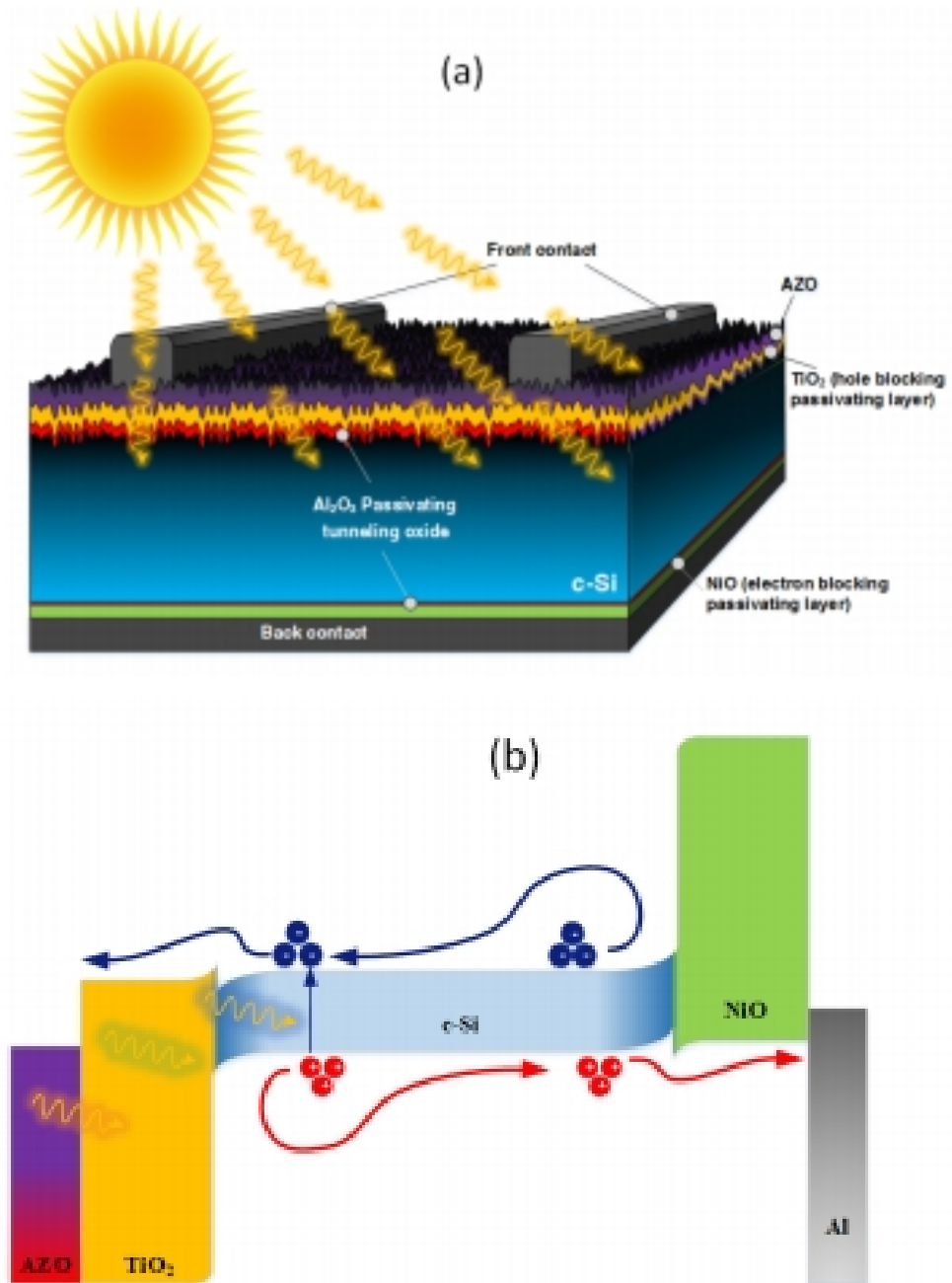


Рисунок Є.1 – Пропонований сонячний елемент:  
а) структура елемента; б) енергетична зонна діаграма

Додаток Ж  
Допустимі значення виробничих чинників

Таблиця Ж.1 – Нормовані допустимі параметри мікроклімату

| Період року | Категорія робіт | Температура повітря, °С для робочих місць |             | Відносна вологість повітря, % | Швидкість руху повітря, м/с |
|-------------|-----------------|-------------------------------------------|-------------|-------------------------------|-----------------------------|
|             |                 | постійних                                 | непостійних |                               |                             |
| Холодний    | Іа              | 21-25                                     | 18-26       | 75                            | ≤0,1                        |
| Теплий      |                 | 22-28                                     | 20-30       | 55 при 28°С                   | 0,1-0,2                     |

Таблиця Ж.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин

| Назва речовини | ГДК, мг/м <sup>3</sup> | Агрегатний стан | Клас небезпеки |
|----------------|------------------------|-----------------|----------------|
| Озон           | 0,1                    | Пара            | 4              |
| Оксиди азоту   | 5                      | Пара            | 2              |
| Пил            | 4                      | Аерозоль        | 2              |

Таблиця Ж.3 – Число іонів у 1 см<sup>3</sup> повітря приміщення при роботі на ЕОМ

| Рівні     | Мінімально необхідні | Оптимальні | Максимально допустимі |
|-----------|----------------------|------------|-----------------------|
| додатній  | 400                  | 1500-3000  | 50000                 |
| від'ємний | 600                  | 3000-5000  | 50000                 |

Таблиця Ж.4 – Нормативні значення коефіцієнта природного освітлення та мінімальні освітленості для штучного освітлення

| Характеристика зорової роботи | Найменший розмір об'єкта розрізнення, мм | Розряд зорової роботи | Підрозряд зорової роботи | Контраст об'єкта розрізнення з фоном | Характеристика фону | Освітленість при штучному освітленні, лк |                        |          | КПО для бокового освітлення, % |            |
|-------------------------------|------------------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------------------|---------------------|------------------------------------------|------------------------|----------|--------------------------------|------------|
|                               |                                          |                       |                          |                                      |                     | комбіноване                              |                        | загальне | Природного                     | Суміщеного |
|                               |                                          |                       |                          |                                      |                     | всього                                   | у т. ч. від загального |          |                                |            |
| Середньої точності            | 0,5-1                                    | IV                    | г                        | великий                              | середній            | 300                                      | 150                    | 150      | 1,5                            | 0,9        |

Таблиця Ж.5 – Нормовані рівні звукового тиску та еквівалентні рівні звуку

| Рівні звукового тиску в дБ в октавних полосах з середньо-геометричними частотами, Гц |    |     |     |     |      |      |      |      | Рівні звуку та еквівалентні рівні звуку, дБА |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|----------------------------------------------|
| 31,5                                                                                 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |                                              |
| 86                                                                                   | 71 | 61  | 54  | 49  | 45   | 42   | 40   | 38   | 50                                           |

Таблиця Ж.6 – Нормовані рівні віброприскорення

| Гранично допустимі рівні віброприскорення, дБ, в октавних полосах з середньо-геометричними частотами, Гц |    |      |    |     |     |     |      | Коректовані рівні віброприскорення, дБА |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|------|----|-----|-----|-----|------|-----------------------------------------|
| 8                                                                                                        | 16 | 31,5 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 |                                         |
| 73                                                                                                       | 73 | 79   | 85 | 91  | 97  | 103 | 109  | 76                                      |



|       |   |   |     |    |    |                                                                                   |   |   |    |   |      |      |      |
|-------|---|---|-----|----|----|-----------------------------------------------------------------------------------|---|---|----|---|------|------|------|
|       |   |   |     |    |    | Ш<br>И<br>Р<br>И<br>Н<br>И<br>Е<br>В<br>А<br>К<br>О<br>В<br>И<br>Х<br>О<br>Д<br>У |   |   |    |   |      |      |      |
| до 15 | В | 2 | 100 | 60 | 40 | 110                                                                               | 9 | 9 | 12 | 8 | н.о. | н.о. | н.о. |

Примітки: н.о. – не обмежується.