

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних  
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра  
**МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОНЯЧНИХ  
ЕЛЕМЕНТІВ НА БАЗІ КРЕМНІЮ**

Студентк гр. ЕП-61к

В.Д. Угринович

Науковий керівник  
к.ф.-м.н., ст. викладач

М.М.Іващенко

Нормоконтроль,  
ст. викладач, к.т.н.

О.Д. Динник

Конотоп 2020

## РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є моделювання робочих характеристик сонячних елементів на базі кремнію.

Мета роботи полягає у моделювання, дослідженні робочих характеристик та параметрів сонячних елементів на базі кремнію.

При виконанні роботи було проаналізовано види, модифікації, переваги та недоліки сонячних елементів, а також процеси та етапи виготовлення сонячних елементів на основі кремнію.

Проаналізовано особливості роботи, перевага та недоліки програмних середовищ що дозволяють здійснювати моделювання робочих параметрів та отримання коефіцієнта корисної дії (ККД), та обрано найоптимальнішу програму для подальшої роботи з нею.

Здійснено дослідження робочих характеристик сонячних елементів, шляхом зміни товщини n, р шару, та температури.

Робота викладена на 30 сторінках, у тому числі включає 17 рисунків, 1 таблиці, список цитованої літератури із 25 джерел.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** МОДЕЛЮВАННЯ, ПРОГРАМА, СОНЯЧНИЙ ЕЛЕМЕНТ, ХАРАКТЕРИСТИКА, ПАРАМЕТРИ

## ЗМІСТ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ВСТУП .....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>РОЗДІЛ 1 СОНЯЧНІ ЕЛЕМЕНТИ НА ОСНОВІ КРЕМНІЮ.....</b>                                      | <b>5</b>  |
| 1.1 Процес виготовлення Si пластин та їх використання в сонячних елюентах.....               | 5         |
| 1.2 Технологія трафаретного друку при виготовленні сонячної батареї....                      | 8         |
| 1.3 Наноструктурні поєднання на основи Si .....  | 9         |
| <b>РОЗДІЛ 2 ПРОГРАМИ ЩО ДОЗВОЛЯЮТЬ МОДЕЛЮВАТИ ФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ В СОНЯЧНИХ ЛЕМЕНТАХ.....</b> | <b>12</b> |
| 2.1 Програма AMPS-ID .....   | 12        |
| 2.2 Програма ASA .....   | 15        |
| 2.3 Програма PC1D.....   | 17        |
| 2.4 Огляд програм що теж дозволяють здійснювати моделювання....                              | 18        |
| <b>РОЗДІЛ 3 ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....</b>                                   | <b>20</b> |
| 3.1 Програмне середовище SCAPS.....  | 20        |
| 3.2 Моделювання робочих характеристик сонячних елементів на базі кремнію.....                | 22        |
| <b>ВИСНОВКИ.....</b>   | <b>27</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>  | <b>28</b> |

## ВСТУП

Сонячна енергія є ідеальним поновлюваним енергетичним ресурсом через його достатність та невичерпність. За використанням значення для сонячної постійної та земного альбедо, було встановлено, що наша Земля отримує  $1,56 \times 10^{18}$  кВт · год сонячної енергії на рік, що  $\sim 10\,000$  разів більше, ніж поточне споживання енергії у всьому світі [1]

Це означає, що Земля отримує більше сонячної енергії за годину, ніж загальна енергія, яку вона споживає за цілий рік. Кремній залишається матеріалом вибору його для фотоелектрики через його нетоксичність, високу і стійку клітинну ефективність, зрілість виробничої інфраструктури та глибокий і широко розповсюджений рівень майстерності, що стосується кремнієвих пристроїв.

Швидке зниження ціни модулів означає, що баланс системних витрат, що пов'язані з площею, регламентує зростання ціни фотоелектричних систем. В останні роки були великі вдосконалення масового виробництва сендвічних високоякісних виробів, можливість обробляти тонкі сендвічі, підтримка високої тривалість життя носія, пасивація поверхні, мінімізація оптичних втрат, характеристика пристрою. Багато з цих удосконалень є життєздатними при масовому виробництві. Верхня межа ефективності сонячних батарей є 29%, що значно вище, ніж найкраща лабораторія (25%) та комерційна (24%).

Ефективність роботи клітин вище 25% виявляється здійсненою як в лабораторних, так і в комерційних умовах. Така клітина буде мати мінімальну об'ємну рекомбінацію завдяки поєднанню тонкого субстрату з дуже високим терміном експлуатації носія, чудова пасивація поверхні, невеликі електричні контакти, що відповідають низькій контактній рекомбінації, вільний носій поглинання та опір контакту, чудовий оптичний контроль, рекомбінація з низькими краями допомагає використанню більш тонких пластин, більших клітин і ребер пасивація, і достатнє покриття металу для мінімізації резистивних втрат.

## РОЗДІЛ 1

### СОНЯЧНІ ЕЛЕМЕНТИ НА ОСНОВІ КРЕМНІЮ

#### 1.1 Процес виготовлення Si пластин та їх використання в сонячних елементах

Сонячний елемент перетворює сонячне світло безпосередньо в електрику. Коли сонячне світло поглинається напівпровідниковими матеріалами сонячних елементів, електрони поглинають фотони і звільняються від своїх атомів і внаслідок цього відбувається виділення електричної енергії.

Цей процес перетворення світла (фотонів) в електрику (напругу) називається фотоелектричним (PV) ефектом (рис. 1.1).

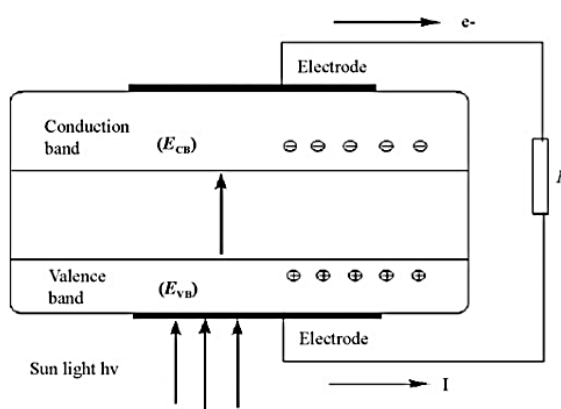


Рис. 1.1. Фотоелектричний процес у сонячній батареї [1]

Понад 95% усіх сонячних батарей, вироблених до цього часу, були виготовлені на основі кремнію. Такого широкого використання цей матеріал набув завдяки наступним перевагам.

Перш за все, кремній є нетоксичним елементом і може бути доступний у достатній кількості через його рясність у земній корі. По-друге, кремній - це ідеальний напівпровідник з хорошою стабільністю та добре збалансованим набором електронних, фізичних та хімічних властивостей.

Ще одна причина, чому кремнієві клітини настільки є домінуючими в цій галузі є те, що успіх кремнію в мікроелектроніці може бути забезпечений виготовленням високоякісних кремнієвих пластин.

Більшість елементів кремнію виготовлено за допомогою тонких пластин, вирізаних із великих розмірів так би мовити циліндричні злитки. Отримують сонячні елементи на основі сендвіч структури кристалічного кремнію (с-Si).

Стабільні сонячні батареї з високим коефіцієнтом корисної дії (ККД) модулів (понад 16%) виготовляються за допомогою технологічної обробки, розроблених елементів що призначені для застосування в галузях мікроелектроніки. Однак сендвічі повинні бути досить густими.

Зазвичай існує два типи цього напівпровідника: монокристалічний (його ще називають монокристалічним) кремнієм і багатокристалічний кремній. Багатокристалічний кремній складається з ряду менших кристалів кремнію.

На рис.1.2 показаний технологічний процес виготовлення від сирого кремнію (полікристалічного кремнію) до кінцевих сонячних модулів (також званих сонячною панеллю) [ 1].

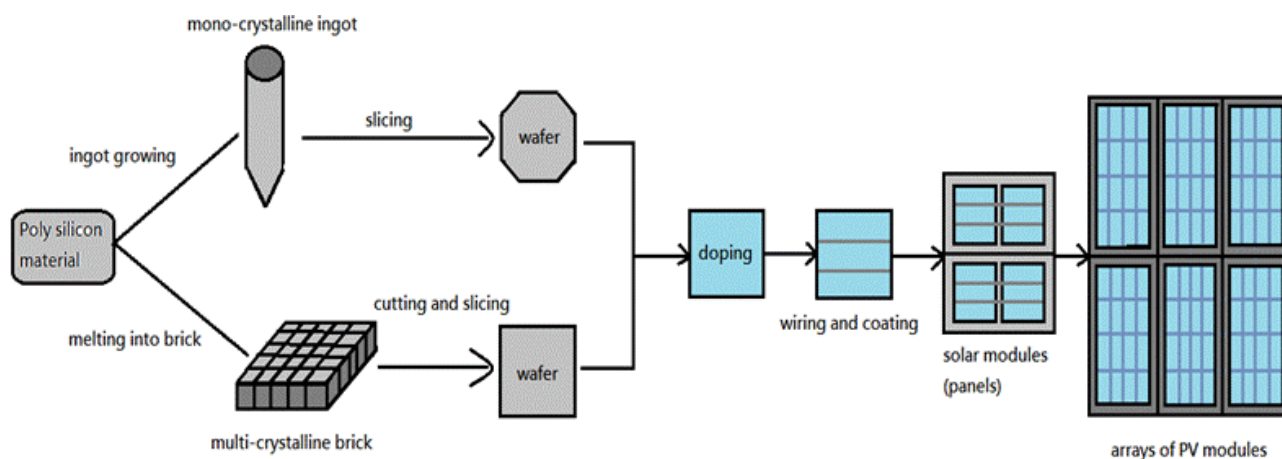


Рис.1.2. Традиційний процес виготовлення сонячного модуля [2]

На першому етапі діоксид кремнію проходить процес карботермічного відновлення і утворює кремній металургійного класу при чистоті 2N-3N. Кремній металургійного класу потім очищають і піддають процесу лиття, щоб перетворився на полісиліконову сировину з рівнем чистоти близько 6N.

Для вирощування кристалів кремнію полісиліконовий матеріал потім вводиться у два різні способи отримання монокристалічного кремнію та багатокристалічного кремнію: монокристалічний кремній, як правило, випускається методом Чохральського (CZ), а багатокристалічний кремній зазвичай виготовляється методами спрямованого затвердіння, (називається також методом лиття цегли).

Потім злиток монокристалічного кремнію нарізається пластинами. Що стосується багатокристалічного кремнію, то кремнієва цегла спочатку нарізається кубиками, а потім нарізається пластинами [2].

Кілька кристалів створюють межі для електронів, що призводить до меншої ефективності порівняно з монокристалічним кремнієм. Різниця в ефективності перетворення клітин між цими двома типами кремнійорганічних сонячних модулів зазвичай становить 1,5-2% [2].

Однак багатокристалічний кремній може бути виготовлений з меншими витратами, ніж монокристалічний, і він найбільше використовується в сонячній промисловості. Для традиційних сонячних батарей на основі кремнію домінант у кремнію є р-типу (бор).

Порівняно з монокристалічним кремнієм поверхню багатокристалічної кремнієвої пластини важче пасивується через нерівність між зерен та різної орієнтації кристалізації зерна, що, як правило, призводить до втрати ефективності перетворення приблизно на 0,5%.

Дефекти кристалізації в масі багатокристалічного кремнію, такі як межі зерна та забруднення домішок металів, породжують центри рекомбінації носіїв і, таким чином, додатково погіршують ефективність конверсії [3, 4].

Однак, приписуючи низьку вартість кристалізації, багатокристалічні пластини кремнію здобули понад 40% частки ринку на світовому ринку сонячної енергії. Монокристалічна кремнієва пластинка користується популярністю, особливо в застосування на даху, завдяки високій ефективності перетворення осередків на одиницю площі даху.

## 1.2 Технологія трафаретного друку при виготовленні сонячної батареї

Технологія трафаретного друку налагоджує виробничі процеси для традиційних сонячних батарей на основі кремнію. На рис.1.3 показана структура та процес виготовлення сонячної батареї, що друкується на екрані.

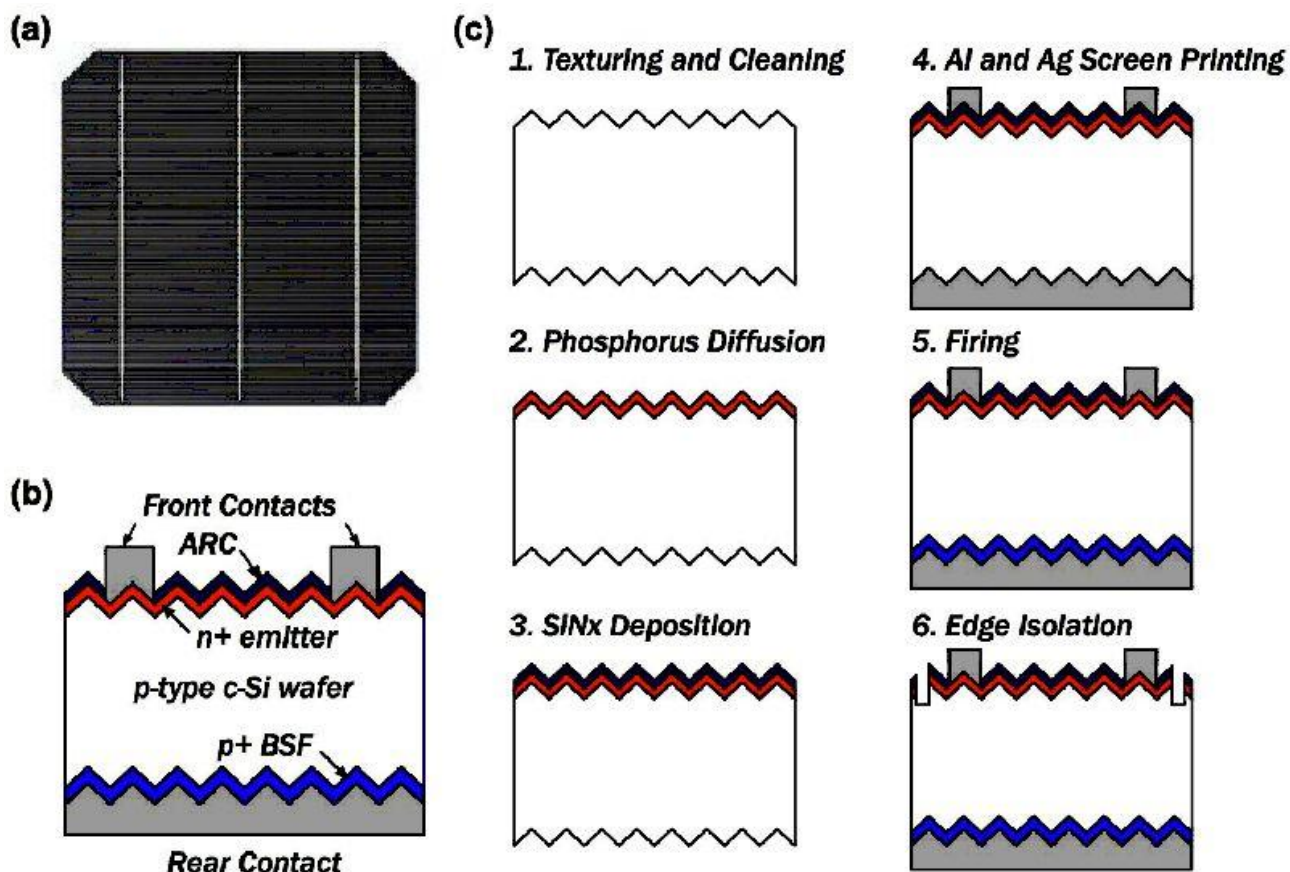


Рис.1.3. Структура та виробництво потоку для сонячної батареї, що друкується на екрані, (a) фото типового сонячного елемента на монокристалічній пластині Si, (b) принципова схема поперечного перерізу екранованої сонячної батареї, (c) шість основних етапів технологічного процесу, які використовуються у виробництві основних друкованих комірок [3]

Як правило, основні процеси в загальній промисловій технології трафаретного друку включають шість основних етапів:

- текстурування та очищення поверхні, від фосфорної допінгової дифузії для створення рп-переходу;



- нанесення покриття антивідбиваючого шару на лицьову сторону;
- друк алюмінієвої пасти на задній частині для формування заднього поля (для одержання домішок з металу, відбиття світла та пасивація ззаду) та срібної пасти з обох сторін;
- випалення друкованих паст для формування контактів переднього випромінювача та задньої основи та ізоляція випромінювача та основи на краях комірок.

### 1.3 Наноструктурні поєднання на основі Si

Кремній не підходить для оптоелектронних застосувань через його непрямі смуги пропускання та погані властивості світла. Однак, налаштування смуги кремнію над об'ємною смугою кремнію (1,12eV) можлива в нанометровому режимі (розміри менше 10 нм), що дозволяє революційно контролювати його властивості.

Поліпшені оптичні та електричні властивості кремнію можна знайти в різних формах кремнію, наприклад, пористий кремній, кремнієві надрешітки та Si-QD, вбудовані в діелектрик .

У тандемних сонячних елементах на основі кремнію ця інженерна смуга може бути виконана за допомогою квантових свердловин (QW) або квантових точок (QD) Si, просочених між шарами діелектрика на основі сполук Si, таких як SiO<sub>2</sub> , Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> , SiON або SiC, який використовує переваги розширення спектру поглинання в УФ-діапазоні.

В цілому, нанотехнологія Si - найкращий вибір для поліпшення метастабільності та підвищення квантової ефективності .

Обмежуючи розміри кремнію меншими за радіус Бора об'ємного кристалічного кремнію (майже 5 нм), квантове обмеження призводить до збільшення його ефективного пробігу. Якщо ці точки знаходяться близько один від одного, носії можуть пройти тунель між ними, щоб отримати суперрешітки QD. Такі суперрешітки потім можуть використовуватися як матеріали вищої

смуги в тандемній комірці . Насправді ідея полягає в тому, щоб додати один або кілька шарів наноструктурованих матеріалів на верхній частині сонячної комірки, для якої оптичне поглинання охоплює різні області сонячного спектру ( рис. 1.4 є прикладом тандему «весь кремній» у сонячному просторі ).

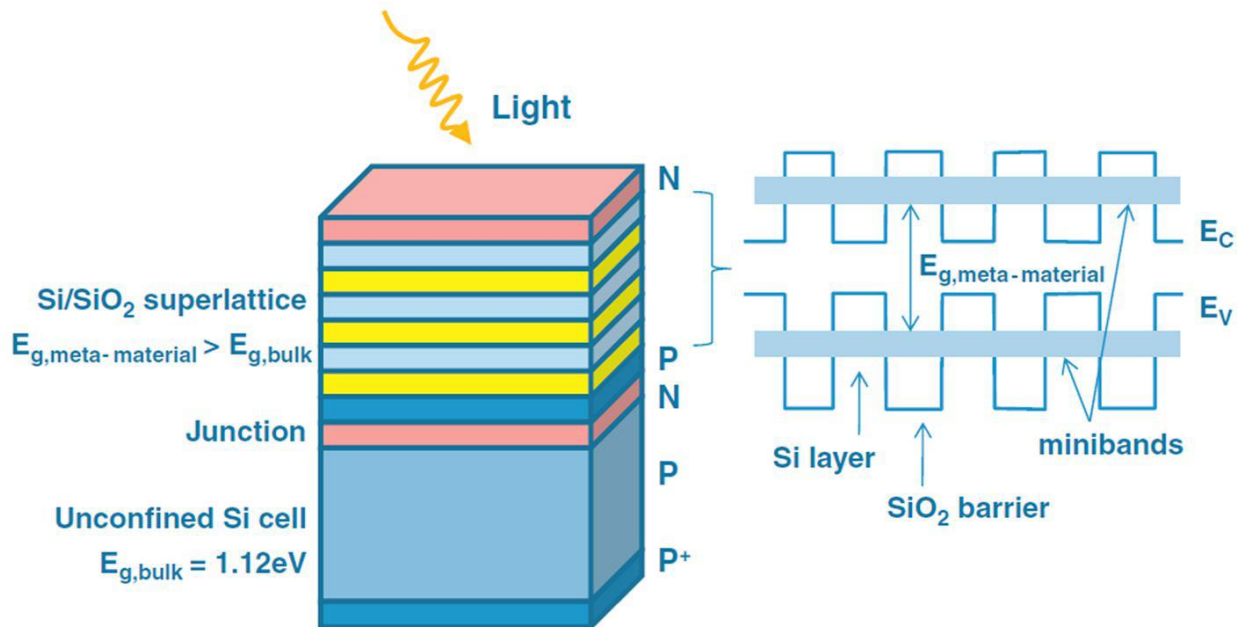


Рис.1.4. Схематика тандемової сонячної батареї «весь кремній» з верхньою комірою на основі наноструктурованого метаматеріалу, укладеного на неочищену клітинку Si [4].

Усі сонячні батареї в тандемі пропонують переваги використання кремнію, який є рясним матеріалом, стабільним, нетоксичним та здатним диверсифікуватись, щоб отримати як середній прохідний матеріал ( $\sim 1\text{eV}$ ), так і високий прохідний матеріал ( $\sim 1,7\text{eV}$ ). Слід зазначити, що, поєднуючи два проміжки клітинок у тандемі ( $1,12\text{eV}$  та  $1,7\text{eV}$ ), досягається коефіцієнт ефективності перетворення до 42%. Ще однією вагомою перевагою Si є добре розвинена у світі технологія, яка відкриває шлях експериментальним та оптимізаційним дослідженням тандем сонячних батарей. Крім того, в плівках nc-Si виявлено сильне оптичне поглинання та високий фотострум, що пояснюється посиленням перерізу оптичного поглинання та хорошою провідністю носіїв у зернах нанометра [ 5 ]

Підхід до підготовки квантових точкових суперрешіток шляхом осадження змінних шарів стехіометричного оксиду з подальшим оксидом, багатим кремнієм, також є перспективним у процесі потенційно низької вартості з контролем діаметра точок та однієї просторової координати .

Детальніше, ці шари вирощують методом тонкоплівкового напилення або ССЗ з подальшим високотемпературним відпалом для кристалізації Si QW / QD. Матриця залишається аморфною, що дозволяє уникнути деяких проблем неузгодженості решітки [ 6 ].

Для достатньо близького інтервалу QW або QD утворюється справжній міні-діапазон, що створює ефективно більшу пропускну здатність. Для КТ 2 нм (КВ 1 нм) ефективний пробіг в 1,7 еВ результатів - ідеальний варіант для тандемного елемента комірки поверх Si [ 7 ]. Через обмеження носія заряду в квантових точках Si можна регулювати зазор смуги за допомогою контролю розміру квантових точок Si [ 7 ]. На рис.1.5 зображено схему процедури досягнення регулювання розміру.

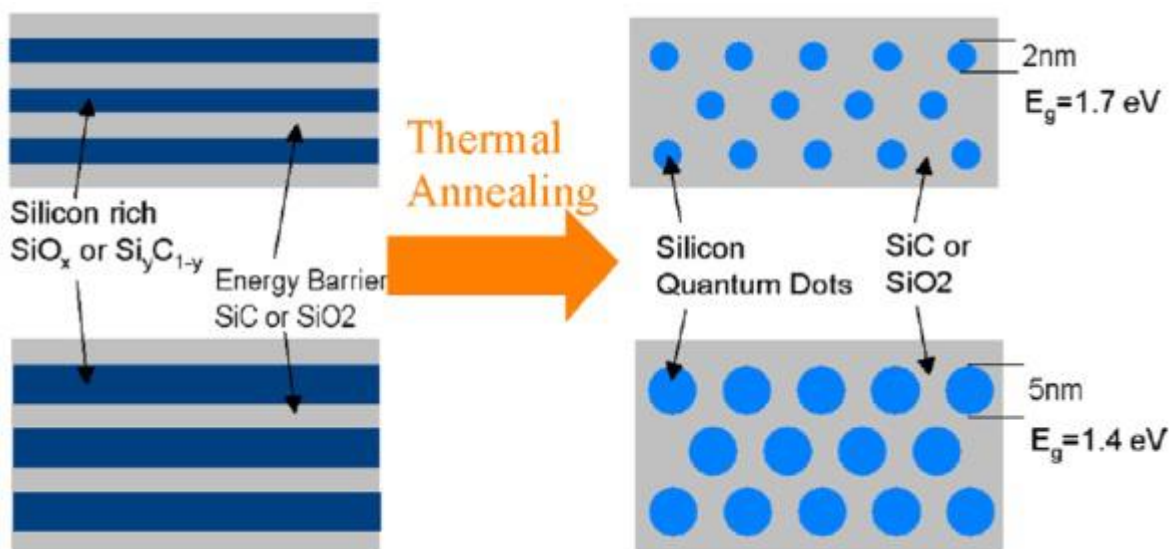


Рис.1.5. Схема процедури досягнення регулювання розміру Si NC в діелектричних матрицях на основі Si.[8]

## РОЗДІЛ 2

### ПРОГРАМИ ЩО ДОЗВОЛЯЮТЬ МОДЕЛЮВАТИ ФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ В СОНЯЧНИХ ЛЕМЕНТАХ

#### 2.1 Програма AMPS-ID

Найскладнішою частиною комп'ютерного моделювання є встановлення набору параметрів, що характеризують матеріали. Оскільки це може бути настільки вимогливим, часто використовується графік, який не враховує енергію стану дефектів чи просторовий розподіл, також захоплення стану дефектів. На рис.1.1 зображено зовнішній вигляд програмного середовища AMPS-ID.

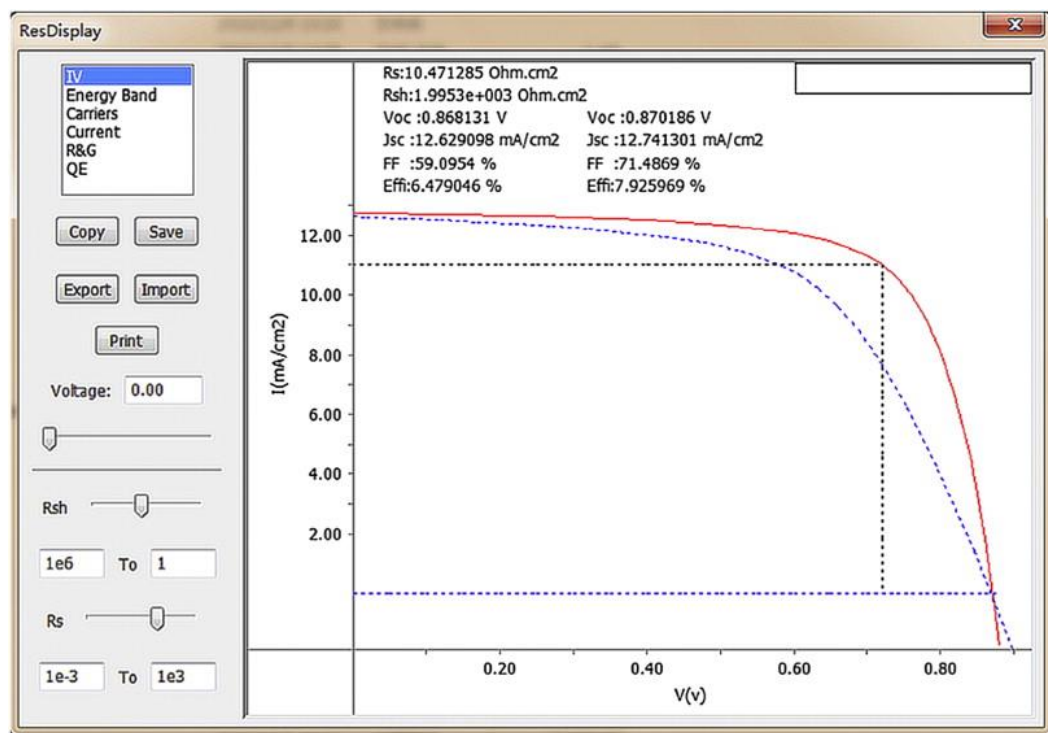


Рис.1.1. Програмне середовище AMPS-ID [9]

Цей графік, як правило, не викликає великої кількості помилок у монокристалічних матеріалах, але явно неправильна в структурах, де важливе захоплення, важливі шари інтерфейсу та матеріали які не є однорідними.

AMPS (Аналіз мікроелектронних та фотонних структур) був написаний С. Фонашем та співробітниками Державного університету Пенсільванії.

Вона була розроблена як дуже загальний і універсальний інструмент комп'ютерного моделювання для аналізу фізики пристроїв та для проектування пристроїв. З AMPS можна працювати над декількома проблемами одночасно, і кожен пристрій (або випадок, як його називають в AMPS) відображається в окремому вікні. Визначити нову проблему - це легке завдання, завдяки чистому та інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу. У разі сумнівів користувач може покластися на добре написану функцію довідки. Один пристрій може мати до роботи 30 шарів, кожен шар має свій набір параметрів. Усі параметри (проміжок, ефективна щільність станів, рухливості) не залежать від температури. [10]

Для кожного шару може бути 50 глибин донорів і акцепторів, що призводить до можливості створення майже довільної щільності розподілу станів. Глибинні рівні можуть енергетично розподілятися в забороненій зоні (дискретному, рівномірному або Гауссовському). До того ж за рахунок цього можна визначити експоненціальні стани хвоста. Всі властивості шару просторово рівномірні. Додаючи різні шари поступово змінюються параметрами, проте, можна імітувати градуйовані стики.

Проблемою AMPS є те, що довжина хвилі та відповідні коефіцієнти поглинання та інтенсивності спектру повинні бути введені вручну. Можливість завантаження цих параметрів із зовнішнього файлу значно покращить зручність роботи програми. Ще один недолік AMPS - обмежена кількість вузлів дискретизації. У обговорюваній версії ця цифра становить 400, що недостатньо, особливо якщо врахувати велику кількість шарів, які можна використовувати.

В новій версії AMPS, може працювати до 3000 вузлів. Іншими новими особливостями буде включення амфотерних станів та пряме тунелювання.

Коли визначення пристрою завершено, користувач може вибрати імітування роботи як у світлому, так і темному режимі умови, а також вимірювання спектральної реакції.

Після того, як справа буде представлена в чергу, всі характеристики будуть обчислені, а після завершення вони будуть збережені разом із визначенням пристрою. AMPS є повільним у вирішенні проблеми в порівнянні з іншими програмним моделюванням. Тому це не заохочує інтерактивне використання програми. Здатність вирішувати кілька справ одночасно, поєднуючись із чудовою стабільністю, робить цю програму більш придатною для використання в пакетному режимі.

Після підрахунку результатів їх можна проаналізувати за допомогою чудового вбудованого механізму побудови графіків. Моделювання з різними параметрами збудження на одному пристрої або моделювання на різних пристроях можна порівняти.

Програмне середовище AMPS-ID для Windows задовольняє потреби при дослідженні чи моделюванні, але має і ряд недоліків.

Для структур на основі полікристалічного та аморфного кремнію цей повний матеріальний параметр, DOS-картинка необхідний через захоплення дефектів, перестановку поля та неоднорідності цих матеріалів.

Визначення наборів параметрів матеріалу для a-Si, може бути досить вимогливим, тим більше, що не існує жодного унікального a-Si. Матеріальні параметри для цього класу матеріалів необхідно встановлювати для кожного матеріалу. Опишемо два нових методи отримання важливих параметрів матеріалу для a-Si:H, розроблені за допомогою програмного середовища AMPS.

Хоча ці методи виявляться простими та зрозумілими, побачимо, що ситуації, що спричиняють просте визначення матеріальних параметрів, не легко зрозуміти без допомоги AMPS.

Для прикладу описання можливостей програми розглянемо визначення пробілу a-Si. Це може здатися простою задачею, але це не так, оскільки в принципі можуть бути три фактори які можна опустити для цього матеріалу:

- рухливість;
- оптична смуга;
- рекомбінаційна смуга.

Існують експериментальні методи визначення оптичної та мобільної смуги руху [3]. Оптичний діапазон встановлений досить легко: однак метод розриву в рухливості не застосовується легко, і мало уваги приділяється безпосередньо вимірюванню  $E_g$  для рекомбінації a-Si.

Використовуючи AMPS, можливо досить просто порівняти прості способи визначення параметра  $E_g$  для рекомбінації.

На рис.2.1 зображено графіки які можливо отримати за допомогою програмного середовища AMPS що дає типову діапазонну діаграму з ухилом вперед 0,1 В для діода p-i-n.

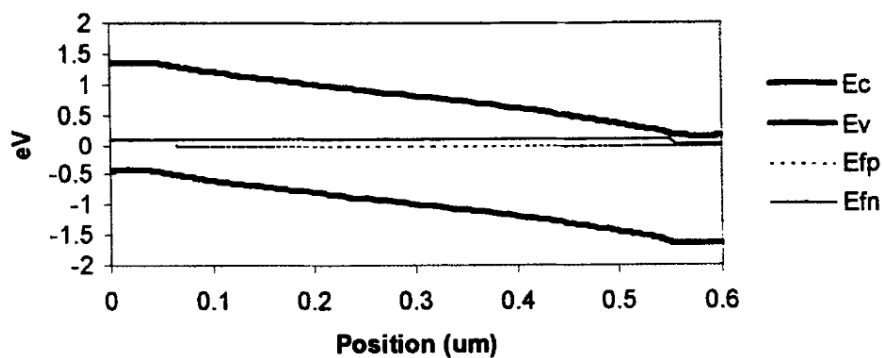


Рис.2.1. Графіки в програмному середовищі AMPS [11]

## 2.2. Програма ASA

ASA (Amorphous Semiconductor Analysis) написали М. Земан, М. Кроон, Дж. Ван ден Хевель та інші в технологічному університеті Делфта. [12]

Вона спеціально розроблена для пристроїв з аморфного кремнію. ASA - це єдина програма, що обговорюється тут, яка не використовує графічний інтерфейс користувача для визначення проблеми. В інших програмах усі параметри комірок відображаються у вікнах і їх можна змінити, натиснувши у відповідному полі. У ASA проблема визначається написанням команд у вхідний файл ASCII. Кожна команда починається з ключового слова і слідує за значенням параметра. Такий підхід робить ASA далеко не інтуїтивно зрозумілим.

Тому важко запустити нову проблему з нуля, і навіть при запуску з файлу проблеми за замовчуванням посібник часто потрібен. З іншого боку, ASA - це дуже гнучка програма. Кількість шарів, а також кількість вузлів дискретизації велика порівняно з іншими програмами. Більшість параметрів можуть мати просторовий розподіл всередині кожного шару.

Ефективна щільність станів, допінгова щільність, рухливість тощо може бути постійною у просторі, лінійно чи експоненціально оцінюватися, або може бути прочитана із зовнішнього файлу. Оскільки ASA розроблена для аморфного кремнію, застосовуються конкретні моделі рекомбінації. У кожному шарі можуть бути визначені хвостові стани як для зони провідності, так і для валентності. Рекомбінація через ці стани розраховується за моделлю SRH. Крім того, можна визначити розподіл станів зв'язків амфотерних звисань у проміжку смуг. [13]

Статистика рекомбінації поколінь для цих станів описана за допомогою моделі Са і Шоклі. Модель Hurkx8 для тунелювання з допомогою пастки та модель для посиленого транспортування носіїв у регіонах з високим полем.

Рекомбінація належна для домішок визначається виключно життям, тому жоден космічний заряд не пов'язаний з цими глибокими рівнями (проте космічний заряд пов'язаний з рівнями амфотерії).

Для імітації певного вимірювання команди повинні бути введені у вхідний файл. Вимірювання, які можна моделювати:

- вимірювання  $J(V)$ ;
- спектральна характеристика та  $C(V)$ , у світлі чи у темряві.

ASA також обчислює спектри відбиття та передачі, і вона може обробляти поверхні з безліччю гладких і шорстких (або текстурованих) оптичних шарів. Дозволяється мати декілька команд моделювання в одному вхідному файлі та змінювати параметри між імітаціями.

Наприклад, можна обчислити кількість вимірювань  $C(V)$  при різних температурах за один пробіг. Порівнювати результати в рамках програми, однак, неможливо, тому що лише один сюжет може переглядати відразу. Тому



ASA є більш підходящим для запуску в пакетному режимі, а не в інтерактивному режимі.

### 2.3 Програма PC1D

Програма PC1D або Басора та колеги була спочатку написана в Національних лабораторіях Sandia та отримала подальший розвиток в UNSW, Australia. Оскільки це вважається стандартом для кристалічних клітин Si, вона широко розповсюджена в дослідженнях PV спільноти, а отже, також використовується для тонкоплівкових клітин, хоча це не особливо розроблено для цих клітин. [14]

PC1D має зрозумілий користувацький інтерфейс, і визначити нову проблему просто. Для кожного шару та контакту на екрані відображається список параметрів, натиснувши на параметр, його значення можна змінити.

Крім того, параметри можна змінити через систему меню або просто натиснувши на відповідний шар або контакт, схематика пристрою, також відображається на екрані.

Будучи спочатку розробленим для (полі) кристалічних клітин кремнію, кількість шарів досить обмежена, лише п'ять шарів дозволені на пристрій. Для пристроїв на базі CdTe / CdS, мабуть, цього достатньо за умови допінгу не класифікованих шарів, але для пристроїв на основі CIGS ця кількість в більшості випадків занизька.

Впроваджені всі найпоширеніші механізми рекомбінації: шнек, діапазон та пастка тунелювання (модель Hurkx). Неможливо визначити загальний розподіл DOS; тільки один глибокий рівень може бути заданий на шар, задаючи його положення в забороненій зоні та час життя електронів і дірок.

Тому що не можна задати щільність глибоких рівнів, немає простору заряду, пов'язаного з цими рівнями. Це проблема присутня при моделюванні II-VI та a-Si сонячних батарей, де заряд, що міститься у глибоких станах, може відігравати істотну роль.

Крім стандартних вимірювань  $J(V)$  та спектральної реакції, можна також моделювати перехідні процеси. Світло або упередженість напругу можна застосувати, а вплив на пристрій можна відстежувати як функцію часу.

Результати моделювання можна переглядати в окремому вікні, а дані легко копіювати та вставляти у зовнішнє середовище такої програми.

## **2.4 Огляд програм що теж дозволяють здійснювати моделювання**

SimWindows10 - це вільно доступний одновимірний симулятор дрейфування / дифузії для напівпровідникових пристроїв. Він може обробляти тунельні роботи та включати внутрішнє виробництво тепла у свої розрахунки. Широко застосовується ADEPT-F з групи Джеффа Грея. Незабаром має вийти версія для операційної системи Windows.

Програма ASPIN з Люблянського університету використовується для клітин CIGS та для клітин A-Si. Розробляється графічний інтерфейс користувача, і програма електричного моделювання буде інтегрована з оптичним моделюванням тієї ж групи.

Деякі з них - це дорогі комерційні програми, що застосовуються в мікроелектронній галузі кремнію, хоча в принципі також можна використовувати для сонячних батарей, вони спеціально розроблені для мікроелектронних пристроїв, а деякі також реалізують моделювання обробки виробів за сендвічною будовою Si. [15]

Вони часто пропонують справжнє багатовимірне (дво- або тривимірне) моделювання. Полікристалічні тонкоплівкові сонячні батареї належним чином вимагають використання дво- або навіть тривимірних програм, через межі зерна та непланарні інтерфейси. Прикордонні ефекти зерна виявляються більш помітними у клітинах CdTe, ніж у клітинах CIGS.

Хоча одновимірні проблеми ефективно впорядковують вплив граничних станів зерна на основну масу, вони були надзвичайно успішними. Крім того,

перехід до дво- або тривимірної форми суттєво збільшить кількість вхідних параметрів, багато з яких на сьогоднішній день не дуже відомі.

При більш простому підході псевдо-двовимірне моделювання отримується шляхом поєднання одновимірного фізичного моделювання, наприклад, з однією з обговорених тут програм, з мережевою (SPICE) обробкою інших програм.

У своїй найпростішій формі така двовимірна програма розглядає монолітну послідовність інтеграції тонкоплівкових комірок в модуль, згуртовуючи всю фізику "елементарної одиничної комірки" в одному експоненціальному законі діода, який повинен бути визначений користувачем.

Незважаючи на те, що прямий зв'язок з фізикою клітин втрачається таким чином, є величезний приріст швидкості та інтерактивності, коли справа стосується проектування інтеграції серії. На таблиці 2.1 наведено порівняльні характеристики програм.

**Таблиця 2.1. Порівняльні характеристики програм для моделювання фізичних процесів**

*Таблиця 2.1*

|                             | AMPS                          | SCAPS  | A          | PC1D         |
|-----------------------------|-------------------------------|--------|------------|--------------|
| Макс. кільк. шарів          | 30                            | 7      | необмежена | 5            |
| Побудова зонних діаграм     | Враховується модель Андерсона |        |            |              |
| Розділення енергетичних зон | ні                            | ні     | так        | ні           |
| Глибокі стани в ЗЗ          | 50                            | 3      | 4          | без заряду   |
| Глибокі поверхневі стани    | ні                            | так    | ні         | ні           |
| Багатопрофільне моделювання | ні                            | так    | так        | короткочасно |
| Числове наближення          | враховується                  |        |            |              |
| Швидкість                   | мала                          | висока | дуже       | дуже висока  |
| Інтерактивність             | задовільн                     | добра  | відсутня   | добра        |

## РОЗДІЛ 3

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

#### 3.1 Програмне середовище SCAPS

Ця чисельна програма моделювання розроблена як загальний полікристалічний тонкоплівковий симулятор пристрою і в основному використовується для моделювання сонячних батарей на базі CdTe- та CIGS / CIS.

Обговорення ґрунтується на версії для операційної системи Windows. Введення нової проблеми в SCAPS - це просто. До пристрою можна додати до семи шарів, і для кожного шару, або контактувати всі фізичні та електронні властивості можна показати та змінити всередині окремого вікна.

Прості моделі використовуються для температурної залежності ефективної щільності станів і теплової швидкості, інші параметри, такі як пропускна здатність і рухливість, не залежать від імпретації.

Для кожного шару можна визначити до трьох глибоких рівнів, а між трьома шарами можна розмістити до трьох станів інтерфейсу. Ці глибокі рівні можуть енергетично розподілятися в забороненій зоні (однорівневий, рівномірний, гаус або експоненціальний хвіст). Рівні глибоких об'ємних речовин також можуть змінюватися просторово всередині шару (рівномірний, ступінчастий, лінійний або експоненціально).

Усі інші властивості просторово однакові для кожного шару, тому необхідно використовувати кілька шарів, якщо потрібно ввести градуйовані стики в пристрій. Однак, оскільки можна визначити лише сім шарів, ця програма не дуже підходить для градуйованих стиків.

Рекомбінація на глибоких об'ємних рівнях та їх заняття описується формалізмом Шоклі-Чита-Хола (СРГ). Рекомбінація в інтерфейсних станах описується розширенням формалізму SRH5, що дозволяє обмінюватися електронами між станом інтерфейсу та двома сусідніми смугами провідності, а

також дірками між станом та двома сусідніми валентними смугами. На рис. 3.1 зображено зовнішній вигляд програмного середовища SCAPS.

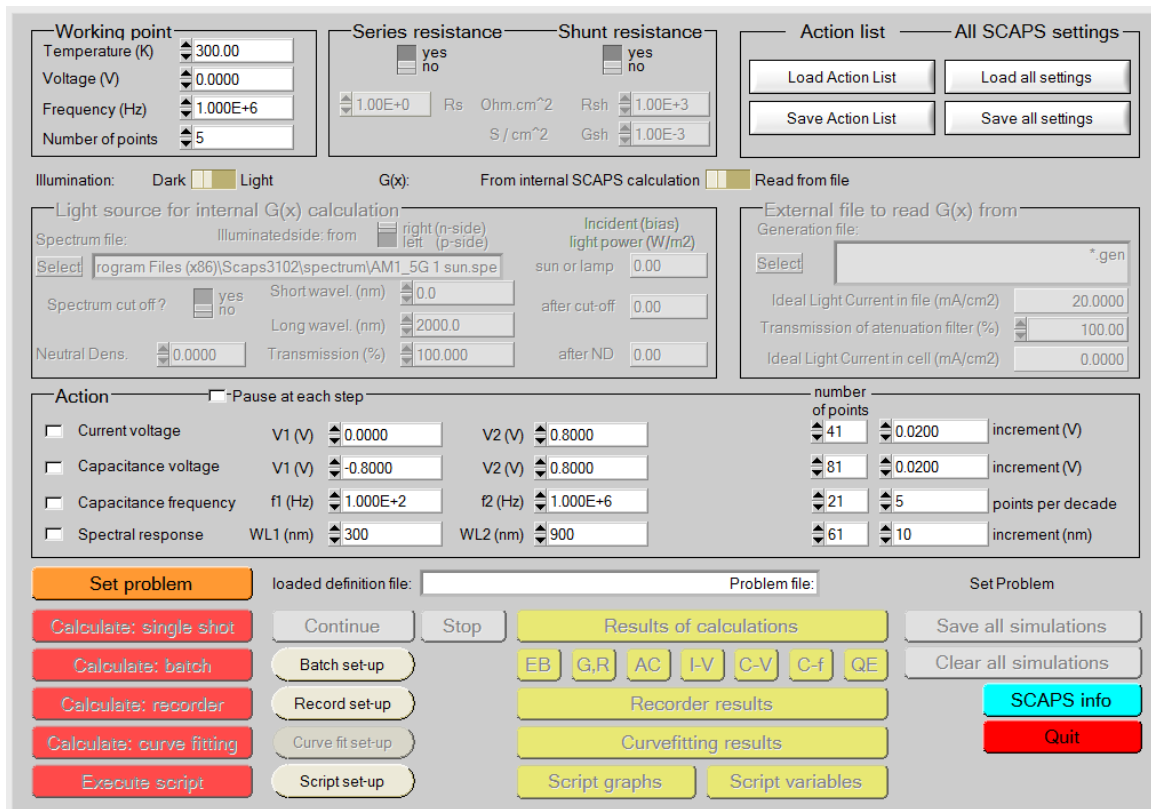


Рис.3.1. Програмне середовище SCAPS [16]

Параметри збудження відображаються в окремому вікні разом з параметрами, необхідними для визначення вимірювань. SCAPS має серед вивчених програм моделювання найбільшу кількість електричних вимірювань, які можна моделювати: J (V), C (V), C (f) та спектральна відповідь. Кожне вимірювання може бути обчислене для світлих або темних умов і як функція температури.

При вирішенні потрібних моделювань діаграма діапазону енергії та заряд і струми в пристрої відображаються на екрані для кожного проміжного зміщення напруга або довжина хвилі. Ці проміжні рішення можуть бути подані у файл. Коли моделювання завершено, характеристики можна переглянути та порівняти з характеристиками інших моделей. Ця функція робить SCAPS дуже інтерактивною програмою.

### 3.2 Моделювання робочих характеристик сонячних елементів на базі кремнію

Моделювання робочих характеристик сонячних елементів на базі кремнію здійснювалось за допомогою програмного середовища SCAPS. За наступних умов:

- потрапляння світла здійснювалось з лівої сторони;
- температура при якій здійснювались досліди була в межах від 260 до 340К;
- товщина шару p змінювалось від 0,25 $\mu$ m до 1,25  $\mu$ m;
- товщина шару n змінювалась від 0,05  $\mu$ m до 2,00  $\mu$ m.

При проведенні першого досліду використовувались наступні умови та параметри для p шару які зображені на рис.3.2

| LAYER 1   |                      | p-layer                                  |                             |
|---|----------------------|--|-----------------------------|
| thickness ( $\mu$ m)  | 0.250                |  |                             |
| Layer Composition Grading Type                              | uniform y, 0 < y < 1 |  |                             |
| Uniform composition y =                                     | 0.500                | 0.500                                    |                             |
| Semiconductor Property P of the pure material               |                      | pure A (y = 0)                           | pure B (y = 1)              |
|   |                      |  | Composition dependence P(y) |
| bandgap (eV)  | 1.000                | 2.000                                    | linear                      |
| electron affinity (eV)                                      | 4.500                | 4.500                                    | uniform                     |
| dielectric permittivity (relative)                          | 10.000               | 10.000                                   | uniform                     |
| CB effective density of states ( $1/\text{cm}^3$ )          | $1.000\text{E}+19$   | $1.000\text{E}+19$                       | uniform                     |
| VB effective density of states ( $1/\text{cm}^3$ )          | $1.000\text{E}+19$   | $1.000\text{E}+19$                       | uniform                     |
| electron thermal velocity (cm/s)                            | $1.000\text{E}+7$    | $1.000\text{E}+7$                        | uniform                     |
| hole thermal velocity (cm/s)                                | $1.000\text{E}+7$    | $1.000\text{E}+7$                        | uniform                     |
| electron mobility (cm/Vs)                                   | $5.000\text{E}+1$    | $5.000\text{E}+1$                        | uniform                     |
| hole mobility (cm/Vs)                                       | $5.000\text{E}+1$    | $5.000\text{E}+1$                        | uniform                     |
| effective mass of electrons                                 | $1.000\text{E}+0$    | $1.000\text{E}+0$                        | uniform                     |
| effective mass of holes                                     | $1.000\text{E}+0$    | $1.000\text{E}+0$                        | uniform                     |
| ND grading dependent: on composition y: ND (y)              |                      | <input type="checkbox"/> Allow Tunneling |                             |
| shallow donor density ND(y) ( $1/\text{cm}^3$ )             | $1.000\text{E}+1$    | $1.000\text{E}+1$                        | linear                      |
| NA grading dependent: on composition y: NA (y)              |                      |  |                             |
| shallow acceptor density NA(y) ( $1/\text{cm}^3$ )          | $1.000\text{E}+15$   | $1.000\text{E}+15$                       | linear                      |
| Absorption model  |                      |  |                             |
| Show / Set alpha(composition; lambda)                       |                      |  |                             |
| alpha (y=0)   |                      | alpha (y=1)                              |                             |
| from model  |                      | from model                               |                             |
| from file   |                      | from file                                |                             |
| absorption constant A ( $1/\text{cm eV}^2(\text{S})$ )      | $1.000\text{E}+5$    | $1.000\text{E}+5$                        |                             |
| absorption constant B ( $\text{eV}^2(\text{S})/\text{cm}$ ) | $0.000\text{E}+0$    | $0.000\text{E}+0$                        |                             |
| show  |                      | save                                     |                             |
| absorption file for y = 0                                   |                      | absorption file for y = 1                |                             |

Рис.3.2. Умови шару p [17]

При проведенні першого досліду використовувались наступні умови та параметри для  $n$  шару які зображені на рис.3.3

| LAYER 2   |                         | n-layer                             |
|---|-------------------------|-------------------------------------|
| thickness ( $\mu\text{m}$ )                                 | 0.050                   |                                     |
| Layer Composition GradingType                               | uniform pure A (y=0)    |                                     |
| The layer is pure A: y = 0, uniform                         | 0.000                   |                                     |
| Semiconductor Property P of the pure material               | pure A (y = 0)          |                                     |
| bandgap (eV)  | 2.500                   |                                     |
| electron affinity (eV)                                      | 4.500                   |                                     |
| dielectric permittivity (relative)                          | 10.000                  |                                     |
| CB effective density of states ( $1/\text{cm}^3$ )          | 1.000E+19               |                                     |
| VB effective density of states ( $1/\text{cm}^3$ )          | 1.000E+19               |                                     |
| electron thermal velocity (cm/s)                            | 1.000E+7                |                                     |
| hole thermal velocity (cm/s)                                | 1.000E+7                |                                     |
| electron mobility (cm/Vs)                                   | 5.000E+1                |                                     |
| hole mobility (cm/Vs)                                       | 5.000E+1                |                                     |
| effective mass of electrons                                 | 1.000E+0                |                                     |
| effective mass of holes                                     | 1.000E+0                |                                     |
| no ND grading (uniform)                                     | no ND grading (uniform) |                                     |
| shallow uniform donor density ND ( $1/\text{cm}^3$ )        | 1.000E+17               |                                     |
| no NA grading (uniform)                                     | no NA grading (uniform) |                                     |
| shallow uniform acceptor density NA ( $1/\text{cm}^3$ )     | 1.000E+1                |                                     |
| Absorption model  |                         |                                     |
|   |                         | alpha (y=0)                         |
|   |                         | <input type="checkbox"/> from model |
|   |                         | <input type="checkbox"/> from file  |
| absorption constant A ( $1/\text{cm eV}^2(\text{S})$ )      | 1.000E+5                |                                     |
| absorption constant B ( $\text{eV}^2(\text{S})/\text{cm}$ ) | 0.000E+0                |                                     |
| show  |                         | save                                |
|   |                         | absorption file for y = 0           |

Рис.3.3. Умови шару  $p$  [18]

На рис. 3.4 зображено графічно саму підкладку з товщинами, експеримент проводився при температурі 260К, та при потраплянні світла з лівої сторони.

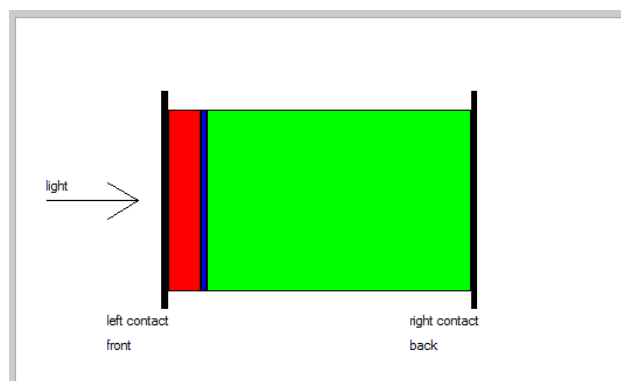


Рис.3.4. Підкладка з товщинами  $n$  та  $p$ [19]

Проміжні покази першого дослід зображено на рис.3.5

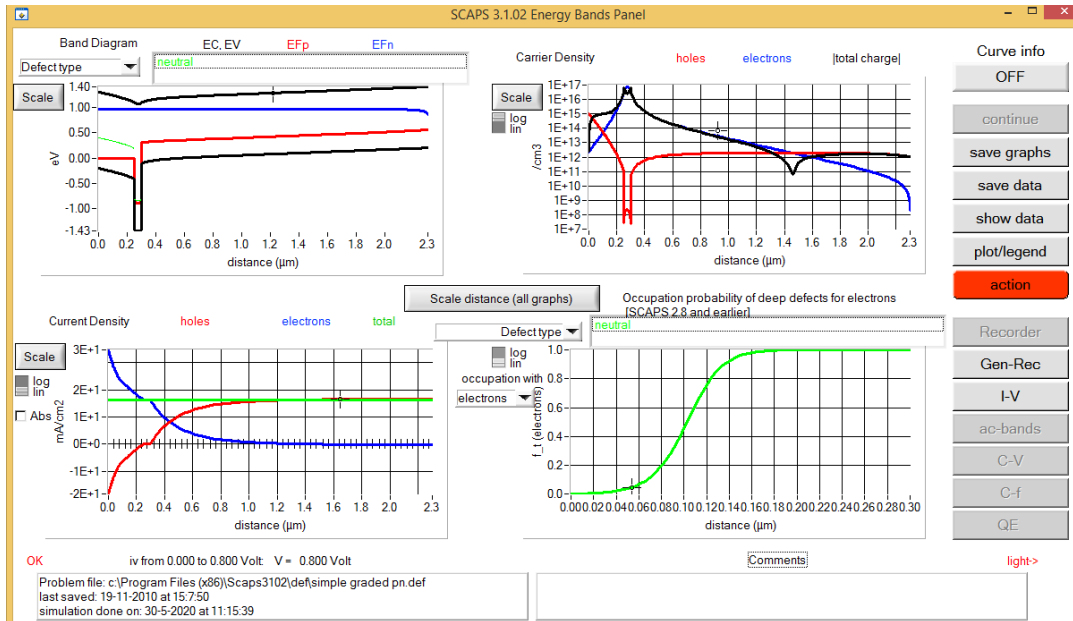


Рис.3.5. Отриманий результат першого дослід [20]

Отриманий результат зображено на рис. 3.6. з ККД що склав 11.44% що є середнім результатом оскільки літературними джерелами сказано що в лабораторних умовах ККД сонячних елементів на базі кремнію складає близько 20,5 %.

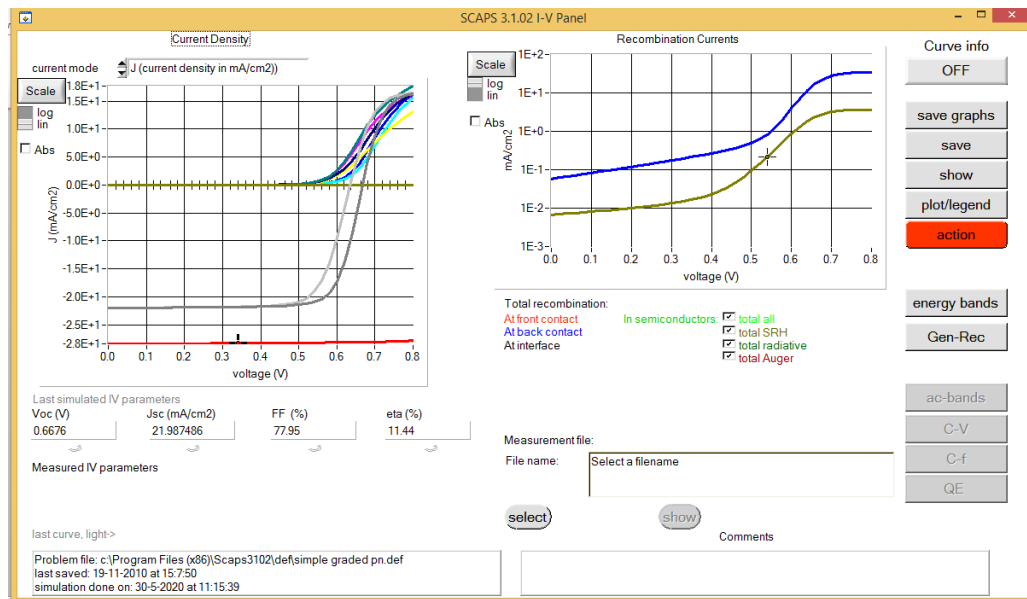


Рис.3.6. Результат першого дослід [21]



Другий дослід було проведено при  $p = 0,5$  та  $n = 1,00$ , температура складала  $270\text{K}$ . На рис. 3.7 зображено графічно саму підкладку з товщинами, експеримент проводився при температурі  $270\text{K}$ , та при потраплянні світла з лівої сторони.

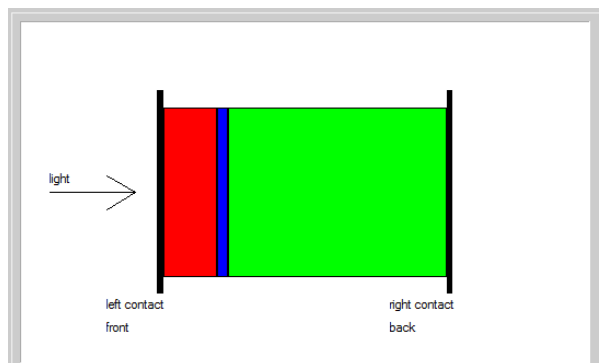


Рис.3.7. Підкладка з товщинами  $n$  та  $p$ , другий дослід [22]

На рис.3.8 зображено проміжний результат експерименту

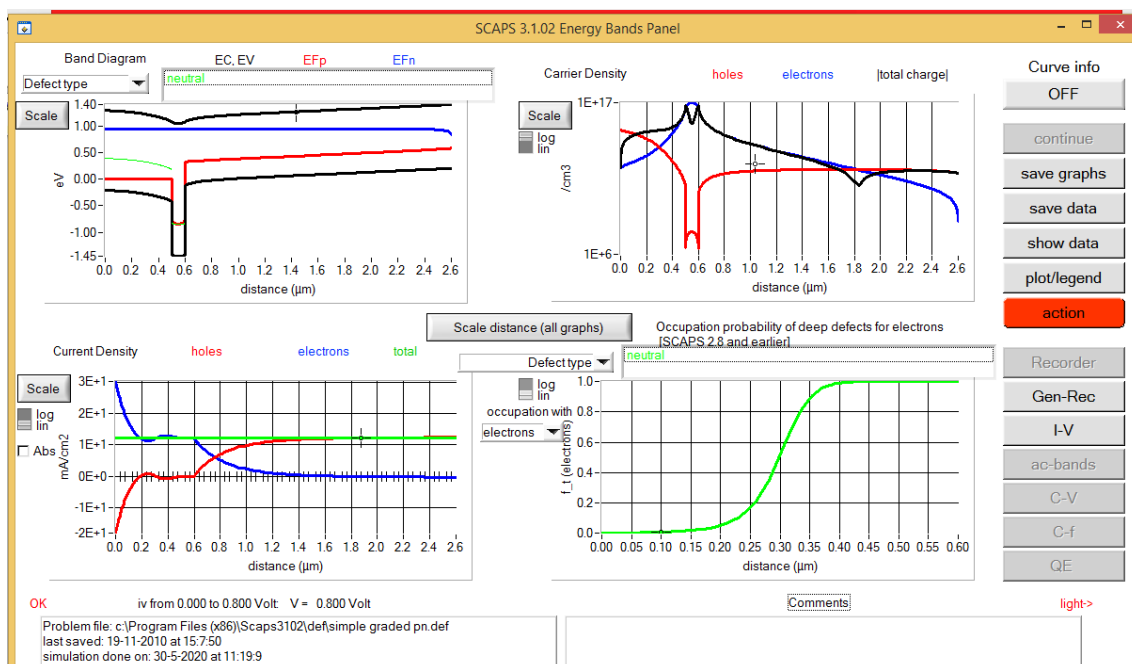


Рис. 3. 8. результат експерименту [23]

На рис.3.9 зображено результат другого експерименту

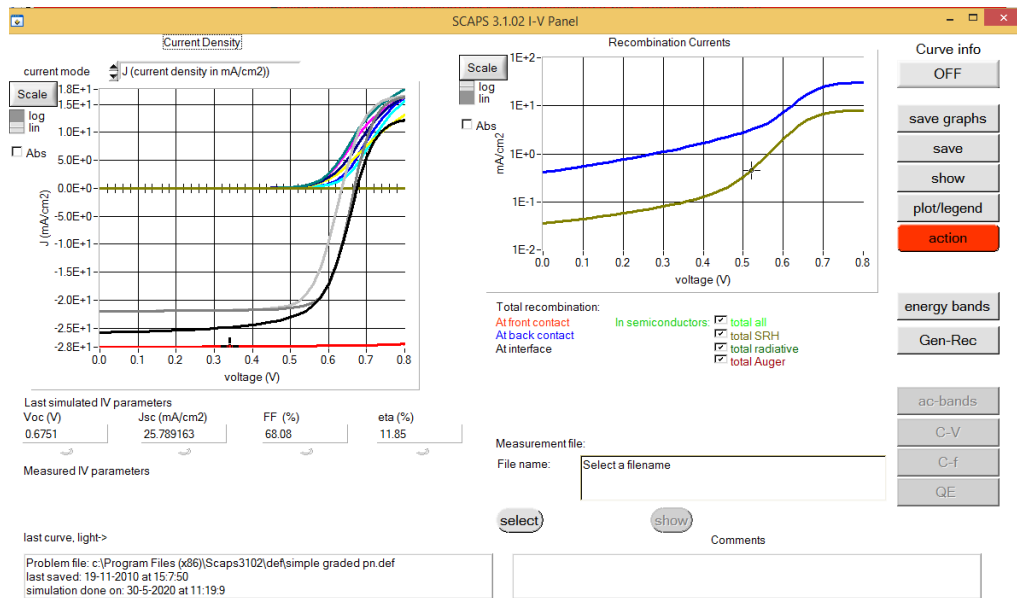


Рис. 3.9. результат другого експерименту [24]

Другий дослід показав що при підвищенні  $p$  на 0.25 а  $n$  на 0,5 та температурі підвищення на 10 ККД 11,86 тобто збільшилось не суттєво.

Третій дослід проводився за умови  $p = 0.75$  та  $n = 1,5$ ,  $T = 280\text{K}$ . Результат третього дослідів зображено на рис.3.10.

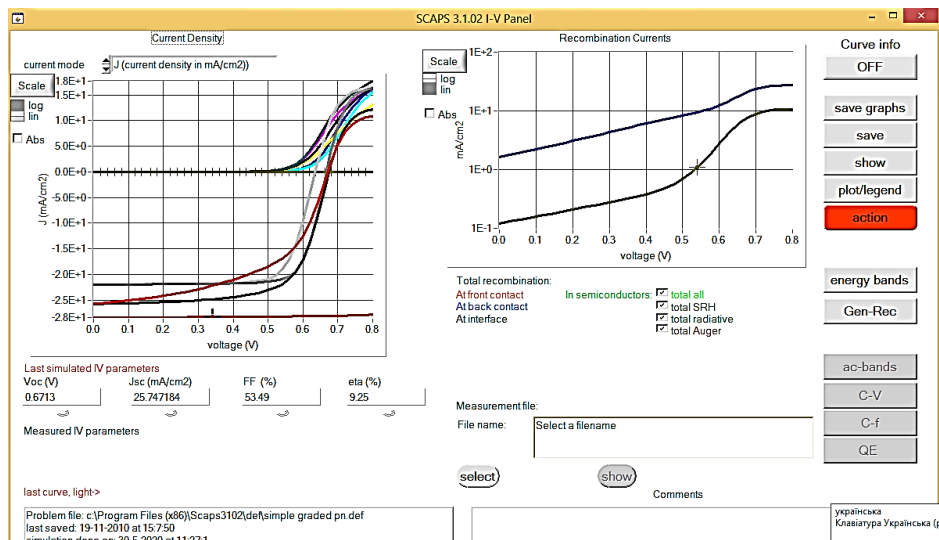


Рис.3.10. Результат третього дослідів [25]

Згідно результату третього дослідів можна зробити висновок що при підвищенні температури та товщини шарів  $n$  та  $p$ , ККД зменшується.

## ВИСНОВКИ

Переглядаючи останні розробки технологій щодо кремнієвого матеріалу, архітектури пристроїв і обробки технологій для сонячної батареї на основі кремнію, в цій роботі було піднято перспективні тенденції сонячної промисловості, керовані потребами світового ринку.

Зрештою, досягнення найвищого співвідношення витрат та ефективності сонячних батарей сприяє розвитку сонячної промисловості. Єдиним вимірюванням успішної технології сонячних батарей є те, чи можна сонячну батарею виготовити рентабельно.

Обмежений обмеженням площі, доступної для встановлення системи ПВ, тенденція використання більш високої ефективності перетворювальної енергії постійно користується терміналами.

Тому зниження собівартості виробничого процесу - єдиний спосіб вижити в сонячній промисловості.

Програмаи SCAPS тому що являється інтерактивною програмою. При вирішенні потрібних моделювань діаграма діапазону енергії та заряд і струми в пристрої відображаються на екрані для кожного проміжного зміщення напруга або довжина хвилі. Ці проміжні рішення можуть бути подані у файл. Коли моделювання завершено, характеристики можна переглянути та порівняти з характеристиками інших моделей. Ця функція робить SCAPS дуже інтерактивною програмою.

Згідно результату третього дослідю можна зробити висновок що при підвищенні температури та товщини шарів  $n$  та  $p$ , ККД зменшується.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Маркварт Т. Сонячна електрика (2-е видання). Чичестер: Джон Вілей і сини, 2000.
2. Зелений М А. Сонячні клітини: принципи роботи, технології та системні програми. Нью-Джерсі: Prentice-Hall, 1982.
3. Зелений М А. Майбутнє кристалічних сонячних батарей кремнію. Прогрес у фотоелектричній галузі: Дослідження та застосування, 2000, (1): 127–139.
4. Pizzini S. Об'ємний кремній сонячного класу: як грає хімія та фізика, щоб отримати доброзичливий мікроструктурний матеріал. Прикладна фізика А: Матеріалознавство та обробка, 2009, 96 (1): 171–188.
5. Poortmans J, Архипов В. Сонячні клітини з тонких плівок: виготовлення, характеристика та застосування. Нью-Йорк: Джон Вілей і сини, 2006.
6. Хамакава Ю. Тонкі плівки сонячних клітин. Берлін Гейдельберг: Спрингер-Верлаг, 2004.
7. Schropp REI, Carius R, Beaucarne G. Аморфний кремній, мікрокристалічний кремній та тонкоплівкові полікристалічні сонячні батареї. Бюлетень Товариства з досліджень матеріалів, 2007, 32 (3): 219–224.
8. Шах А.В., Шаде Н, Ванечек М та ін. Технологія тонкоплівкових кремнієвих сонячних батарей. Прогрес у фотоелектричній галузі: Дослідження та застосування, 2004, 12 (23): 113–142.
9. Ван Й, Ша Дж, Чен В, та ін. Нанопристрої на основі кремнієвих нанопроводів. Останні патенти на нанотехнології, 2009, 3 (1): 1–9.
10. Зелений М А. Фотоелектрики третього покоління: сонячні батареї на 2020 рік і далі. Physica E: Низькомірні системи та наноструктури, 2002, 14 (1–2): 65–70.

11. Panek P, Lipiski M, Dutkiewicz J. Текстуризація багатокристалічного кремнію шляхом вологого хімічного травлення для сонячних батарей кремнію. Журнал матеріалознавства, 2005, 40 (6): 1459–1463.

12. Єрохов В.Ю., Гезель Р., Ліпінський М та ін. Економічно ефективні методи текстурування сонячних батарей кремнію. Матеріали сонячної енергії та сонячні клітини, 2002, 72 (1–4): 291–298.

13. Fukui K, Inomata Y, Shirasawa K. Текстурування поверхні з використанням реакційно-іонного травлення для сонячної батареї багатокристалічного кремнію // Праці 26-ї конференції спеціалістів фотоелектричних батарей IEEE, PVSC'97, Anaheim, 1997: 47–50.

14. Fath P, Marckmann C, Bucher E та ін. Багатокристалічні кремнієві сонячні батареї з використанням нової високопропускну технології механічної текстуризації та техніки металізації рулонного друку // Праці 13-ї Європейської конференції з сонячної енергії PV, Nice, 1995: 29–32.

15. Герхардс С, Маркманн С, Толле Р та ін. Механічно текстуровані V-багатокупольні кристалічні сонячні батареї з новою металізацією друку // Праці 26-ї конференції спеціалістів фотоелектричних технологій IEEE, PVSC'97, Anaheim, 1997: 43–46.

16. Hahn G, Schönecker A. Нові кристалічні кремнієві стрічкові матеріали для фотоелектрики. Журнал фізики: Зведена матерія, 2004, 16: R1615 – R1648.

17. Schmidt W, Woesten B, Kalejs J P. Технологія виготовлення вафельних стрічок із кремнію (EFG) та сонячних батарей. Прогрес у фотоелектричній галузі: Дослідження та застосування, 2002, 10 (2): 129–140.

18. Chittick RC, Alexande JH, Sterling H F. Отримання та властивості аморфного кремнію. Журнал Електрохімічного товариства, 1969, 116: 77–81.

19. Spear WE, Lecomber P G. Властивості заміщених легованих аморфних Si та Ge. Філософський журнал, 1976, 33: 935–949.

20. Фріцше Х. Ранні дослідження аморфного кремнію: помилки та пропущені можливості. Матеріали симпозіуму Товариства дослідження матеріалів 2001, 609: 1–12.

21. Carlson DE, Wronski C R. Аморфні сонячні батареї кремнію. Листи прикладної фізики, 1976, 28 (11): 671–673.
22. Карлсон Д.Е., Вронський К.Р., Панькове Ж. Властивості аморфного кремнію та сонячних батарей a-Si. RCA Review, 1977, 38: 211–225.
23. Catalano A, D'Aiello R, Dresner J та ін. Досягнення 10% -ної ефективності перетворення в аморфних кремнієвих сонячних заповненнях // Праці 16-ї конференції спеціалістів фотоелектричних технологій IEEE, Сан-Дієго, 1982, 1421–1422.
24. Staebler DL, Wronski C R. Оборотні зміни провідності в аморфному кремнію, що виробляється в розряді. Листи прикладної фізики, 1977, 31 (4): 292–294.
25. Veprek S, Maresek V. Приготування тонких шарів Ge і Si хімічним транспортом водню плазмою. Твердотільна електроніка, 1968, 11 (7): 683–684.