Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____Електронної та біомедичної інженерії_____
(повна назва)

Кафедра _____Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв_____
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

_____другий (магістерський)_____
(рівень вищої освіти)

_____ГЮІК 433263.000 ПЗ_____
(позначення документа)

_____Дослідження каскадного сонячного фотоперетворювача _____
_____.
(тема)

Виконав: студент 2 курсу,
групи ЕЕПм-20-1
спеціальність
171 «Електроніка»_____
(код і повна назва спеціальності)
освітньо-професійна програма
(професійна або наукова)
_«Електронні прилади та пристрої»
(повна назва програми)
_____Кутєпов Д.О._____
(прізвище, ініціали)
Керівник _____Галат О.Б._____
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Ігор БОНДАРЕНКО
(підпис) (прізвище, ініціали)

2021 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет_____Електронної та біомедичної інженерії_____
Кафедра_____Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв_____
Рівень вищої освіти_____другий (магістерський)_____
спеціальність 171 «Електроніка»_
освітня програма _ «Електронні прилади та пристрої»

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
«____»_____ 20 ___ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові_____Кутєпову Денису Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи __Дослідження каскадних сонячних фотоперетворювачів____
затверджена наказом по університету _____
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 06 ____12_____ 2021 р.
3. Вихідні дані до роботи _____
__1. Порівняти основні параметри багатокаскадних сонячних перетворювачів, виявити напрямки підвищення ефективності ФЕП;
2. Вибрати засоби моделювання поглинальної здатності та струмових характеристик ФЕП
3. Виконати необхідні розрахунки 4-шарової структури ФЕП
4. Матеріал шарів – елементарні напівпровідники, бінарні А3В5 тощо.
_____
_____
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____
1. Розглянути та порівняти параметри існуючіх фотоелектричних перетворювачів_
2. Проаналізувати технології виготовлення фотоперетворювачів_
3. Виконати моделювання процессу поглинання у каскадному сонячному фотоперетворювачі із застосуванням аналітичних моделей та існуючіх програмних засобів_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) _____
__Презентація_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Дослідження типів та особливостей ФЕП	20.10.	
2	Дослідження методології виготовлення ФЕП	30.10.	
3	Моделювання каскадного сонячного ФЕП	11.11.	
4	Пояснювальна записка	25.11.	
5	Підготовка презентації	05.12.	
6	Рецензування, нормоконтроль, здача роботи на кафедру	06.12.	

Дата видачі завдання _____ _____ 2021 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ О.Б. Галат
(підпис) (прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи магістра містить: 37 с., 13 рис., 24 джерел.

КАСКАДНИЙ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧ, МОНОКРИСТАЛІЧНИЙ КРЕМНІЙ, ПОЛІКРИСТАЛІЧНИЙ КРЕМНІЙ, АМОРФНИЙ КРЕМНІЙ, СПОЛУКИ А3В5, СПЕКТР ПОГЛИНАННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ.

Об'єкт дослідження — Сонячні фотоперетворювачі.

Предмет дослідження — Дослідження характеристик та параметрів каскадного сонячного фотоперетворювача.

Мета роботи — виявлення закономірностей впливу геометричних розмірів структури каскадного сонячного фотоперетворювача на його ефективність, пошук оптимальної структури фотоперетворювача.

Метод дослідження — аналіз літератури, аналіз подібних конструкцій, структурно-функціональне моделювання.

У роботі розглянуті основні типи сонячних фотоперетворювачів, їх технічни особливості та методи виготовлення. Проведено моделювання каскадного фотоперетворювача. Запропоновано використання аналітичних розрахунків для підбору оптимальної структури фотоперетворювача.

ABSTRACT

The explanatory note of the master's attestation work contains: 37 pages, 13 illustrations, 24 sources.

CASCADE SOLAR CELL, MONOCRYSTALLINE SILICON, POLYCRYSTALLINE SILICON, AMORPHOUS SILICON, A3B5 COMPOUNDS, SPECTRUM OF ABSORPTION OF RADIATION.

Object of study — Solar cells.

Subject of study — Research of characteristics and parameters of cascade solar cell .

The purpose of the work — identification of patterns of influence of geometric dimensions of the structure of a cascade solar cell on its efficiency, search for the optimal structure of the photoconverter.

Research method — literature analysis, analysis of similar structures, structural and functional modeling.

The main types of solar photoconverters, their technical features and manufacturing methods are considered in the work. The cascade solar cell is modeled. The use of analytical calculations for the selection of the optimal structure of the photoconverter is proposed.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ІОП – Імпульсне охолодження підкладки

КТ – Квантова точка

МПЕ – Молекулярно-променева епітаксія

НГЕС – Наногетероструктура

РФЕ – Рідкофазна епітаксия

СЕ – Сонячний елемент

ТХС – Трихлорсилан

ФЕ – Фотоенергетика

ФЕП – Фотоелектричний перетворювач

ВСТУП

Світовий ринок сонячної фотоенергетики (ФЕ) зростає з 2005 р. у середньому на 40% на рік. Це набагато більше, ніж для будь-якої іншої галузі промисловості [1]. Очікується, що в найближчі 20 років сонячна ФЕ створить понад 2 млн. робочих місць, скоротить викиди парникових газів в атмосферу на 350 млн. т CO2, що еквівалентно зупинці 140 вугільних електростанцій. Загальна потужність сонячної ФЕ до 2030 перевищить 650 ГВт [2, 3]. З 2013 р. у світовий ринок сонячної ФЕ інвестується більше коштів, ніж в інші галузі відновлюваної енергетики. У 2016 р. інвестиції становили 57 % від загального обсягу і дорівнювали 113,7 млрд дол. США. Незважаючи на щорічне зниження загальних глобальних інвестицій у сонячну енергетику, наприклад, на 34 % порівняно з 2015-м, знову встановлена потужність сонячної фотоелектричної енергії збільшилася на 38 % і перевищила у 2016 р. 80 ГВт.

Зареєстровані дані про виробництво сонячних елементів (СЕ) для сонячних станцій у 2016 р. варіюються між 79 та 84 ГВт, а оцінки на 2017 р. зводяться до діапазону від 90 до 95 ГВт. Значна невизначеність у цих даних зумовлена висококонкурентним ринковим середовищем, а також тим фактом, що деякі компанії повідомляють дані про виробництво, тоді як інші – про продаж, а треті – про перевезення. У 2018 р. світовий ринковий прогноз з виробництва СЕ варіюється від 58 ГВт за низьким сценарієм Solar Power Europe до 106 ГВт в огляді Глобального PV-ринку BNEF [3]. Діаграми, що описують світове виробництво сонячних фотоелементів у діапазоні розвитку з 2005 до 2017 р., представлені на рис. 1.

Незважаючи на бурхливий розвиток сонячної ФЕ, собівартість виробництва електроенергії на сонячних електростанціях залишається одним із найвищих серед альтернативних способів генерації. Однак останні кілька років відзначається зниження собівартості електроенергії, виробленої

сонячними фотоелектричними перетворювачами енергії (ФЕП). Так, за 2008–2017 роки. середня вартість сонячної енергії знизилася з 0,210 до 0,086 дол./(кВт·год) за середньої вартості електроенергії, що отримується ТЕС та АЕС, близько 0,050 дол./(кВт·год) [3]. Це на 15 % менше у порівнянні з 2016-м, причому вартість сонячних модулів у сонячних ФЕ станціях зменшилася порівняно з 2016 р. на 40 %.

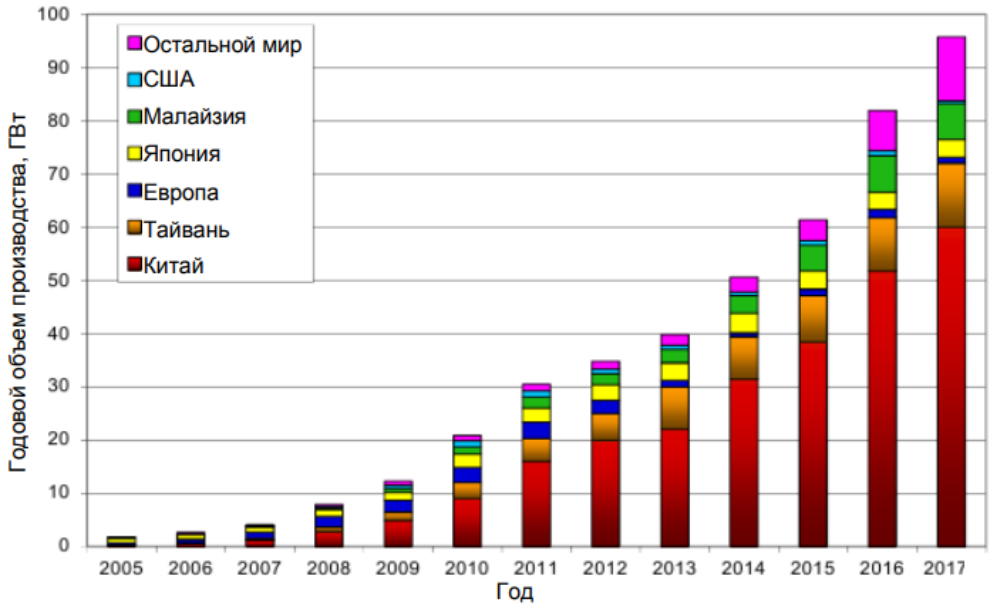

Рисунок 1. - Світове виробництво сонячних елементів [3]

Сучасні технології виробництва сонячних батарей добре зарекомендували себе та забезпечують надійний продукт із гарантованим виходом енергії протягом щонайменше 25–30 років. Надійність, зростаючий попит на електроенергію в економікою, що розвивається, можливість зняття навантаження при перевантаженнях мережі, а також зростання цін на електроенергію, що генерується традиційними джерелами енергії, додають привабливість у розвиток ринку сонячної ФЕ.

Мета роботи — виявлення закономірностей впливу геометричних розмірів структури каскадного сонячного фотоперетворювача на його ефективність, пошук оптимальної структури фотоперетворювача.

1. РІЗНОВИДИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

1.1 ФЕП з кристалічного кремнію

Звичайні сонячні елементи на базі одного напівпровідникового матеріалу перетворять на електроенергію лише частину енергії сонячного випромінювання. Більше того, напруга холостого ходу такого сонячного елемента не може перевищувати ширини забороненої зони переходу, а у разі використання гетеропереходу – ширини забороненої зони вузькозонного напівпровідника. Зазначені ефекти викликають великі внутрішні втрати енергії та їх ККД обмежується значенням 25%.

Структура каскадних сонячних елементів передбачає щонайменше двох напівпровідникових елементів різних типів, у яких спеціально підібрані значення ширини забороненої зони – при послідовному з'єднанні такі елементи забезпечують високі значення напруги холостого ходу. Застосування напівпровідникових матеріалів, які мають заборонені зони, що суттєво відрізняються за шириною, дозволяє більш ефективно використовувати сонячне випромінювання та знизити внутрішні втрати енергії. Правильний вибір матеріалів для каскадних елементів є гарантією досягнення високих ККД (понад 30%).

Серед напрямів сучасних досліджень на тему каскадних фотоелектронних перетворювачів можна виділити такі: підвищення спектральної чутливості окремого каскаду; розробка нових типів конструкцій концентраторів сонячного світла; створення чотирьох та п'ятикаскадних структур.

Найбільш поширеним типом фотоелектричних перетворювачів в даний час є системи на основі полі- та монокристалічного кремнію. Кремній посідає друге місце за поширеністю після кисню серед усіх хімічних елементів Землі. Але хоч кремній і є найзручнішою сировиною для фотоенергетики, шлях її

отримання та обробки до якості, що задовольняє потреби сонячної енергетики, досить довгий і включає велику кількість технологічних переділів, ряд яких вимагає значних енергетичних витрат.

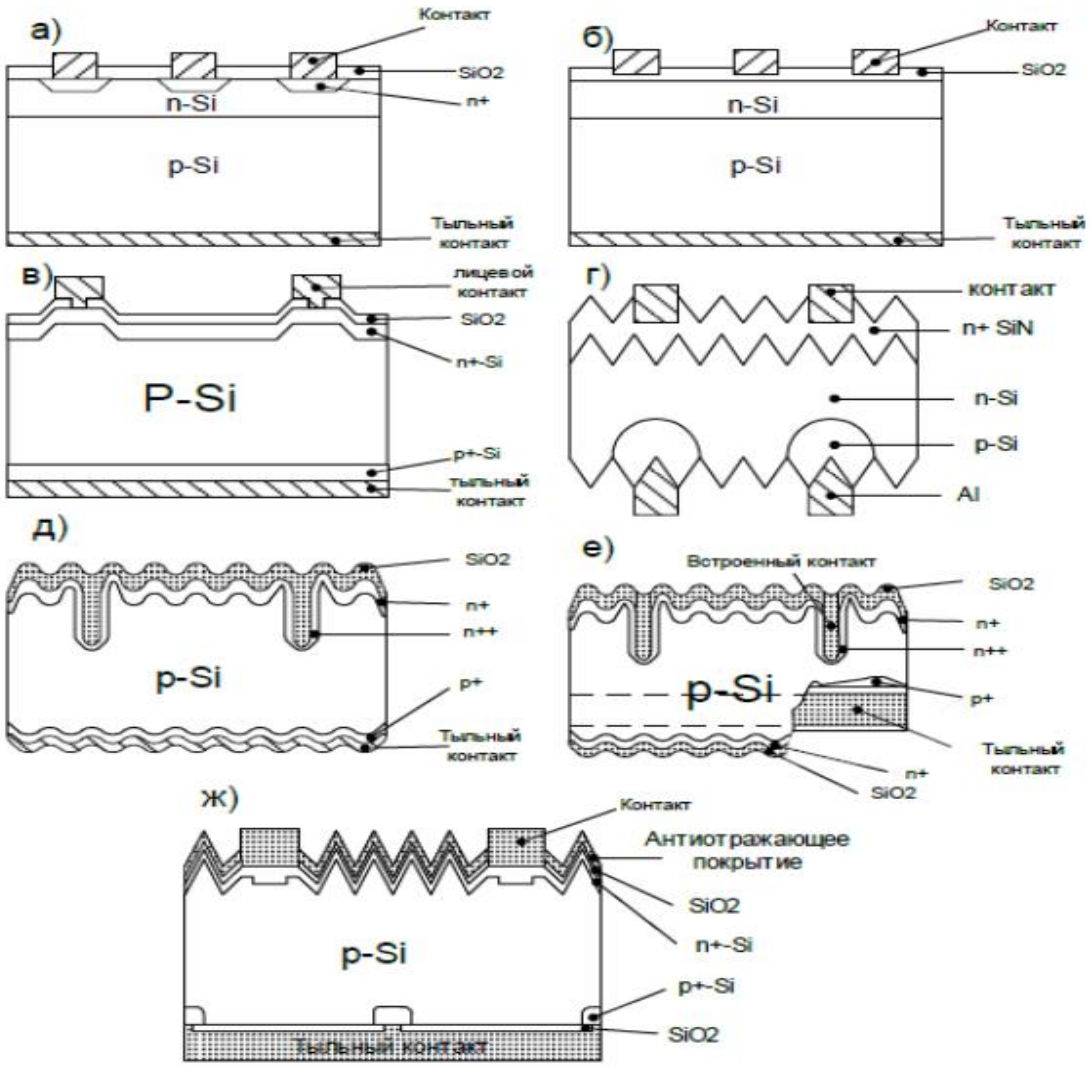

Рисунок. 1.1 – Різні типи сонячних елементів на основі монокристалічного кремнію: а - простий p-n-перехід; б - металізатор-n-p-структура (MINP); в– сонячний елемент із пасивованим емітером (PESC); г – дволицевий сонячний елемент; д - структура з одностороннім вбудованим контактом (SSBS); е - структура з двостороннім вбудованим контактом (DSBS); ж-структура з пасивованим емітером та локально-дифузійним тильним контактом (PERL)

Монокристалічні кремнієві сонячні елементи (c-Si сонячні елементи) виготовляються з кремнієвих пластин 0.3 мм (300 мкм) товщини шляхом їх легування відповідно донорними та акцепторними домішками, створення омічних контактів (суцільного тильного та ґратового лицьового) та текстурування (спрямованого хімічного травлення поверхні) для додання антивідбивних властивостей.

Основний недолік монокристалічних кремнієвих сонячних елементів – велика витрата порівняно дорогого високочистого кремнію, більшість якого відіграє роль пасивної підкладки. Слід зазначити, що технологія виробництва сонячних елементів на кристалічному кремнії знаходиться в майже ідеальному стані і досить складно знайти шляхи покращення вже існуючих технологічних процесів, відпрацьованих протягом багатьох років у рамках виробництва мікроелектронних пристроїв.

Полікристалічні (які також називають мультикристалічними) кремнієві сонячні елементи за технологією виготовлення принципово не відрізняються від монокристалічних. Відмінність полягає в тому, що для їх виробництва застосовується менш чистий і дешевий кремній.

У полікристалічних сонячних панелях використовують кремній не найвищого ступеня очищення і, відповідно, не такий дорогий. В даний час розрізняють полікремній «електронної» (напівпровідникової) якості (вміст домішок менше $1 \cdot 10^{-10}$ %) та полікремній «сонячної» якості (вміст домішок менше $1 \cdot 10^{-5}$ %). Створення полікристалічного кремнію відбувається за повільного охолодження кремнієвого розплаву. На відміну від виробництва монокристалів, стадія витягування відсутня, що робить весь процес менш енергоємним і, відповідно, менш витратним. Однак усередині кристала полікристалічного кремнію є області, відокремлені зернистими межами, що викликають меншу ефективність елементів.

Полікристалічні елементи зовні є формою квадрата з неоднорідною структурою з синюватим відтінком. Неоднорідність структури, перш за все,

пов'язана з тим, що її елементи складаються з великої кількості різнорідних кристалів кремнію, і до складу елемента входить незначна кількість домішок.

Полікристалічні кремнієві сонячні елементи мають ряд переваг. До них можна зарахувати: відносно низька вартість сонячної батареї. Це пов'язано з тим, що метод, що застосовується для виробництва полікристалічного кремнію, є більш простим та менш затратним. Кількість відходів кремнію менша; потужність полікристалічних елементів менше залежить від затінення поверхні, ніж монокристалічні;

Недоліки полікристалічних кремнієвих сонячних елементів: продуктивність сонячних панелей, заснованих на полікристалах, зазвичай становить 14-18%. Через низьку чистоту кремнію полікристалічні сонячні панелі не такі ефективні, як монокристалічні; нижча ефективність використання простору. Як правило, необхідно покрити велику площу, щоб на виході отримати таку ж електричну потужність, як і від монокристалічних.

1.2 ФЕП на основі аморфного кремнію

Фотоелектричні модулі на основі аморфного кремнію (a-Si) виробляються осадженням плівок кремнію на скляну або сталеву поверхню (з нанесенням характерних захисних та проміжних покриттів). Осадження проводиться або способом піролізу моносилана або його плазмохімічним розкладанням. Плівки легують бором та фосфором для отримання провідності різних видів. з'єднання заготовок малої площі, або сегментування великої заготовки на потрібне число одиничних ФЕП зі своїм наступним електричним з'єднанням. Модулі на основі аморфного кремнію складаються приблизно з шести шарів. Прозоре покриття закриває антивідбивний шар, після чого йдуть напівпровідники p і n типу провідності, потім контактний шар і підкладка. Принцип роботи цих модулів нічим не відрізняється від кристалічних сонячних модулів.

Як робочий перехід для сонячних елементів на основі аморфного кремнію можуть застосовуватися: бар'єр Шоттки, МОП-структура, p-i-n-структура. На рис. 1.2 представлені різні види конструкції даних сонячних елементів.

У таких модулях не використовуються кристали, вони являють собою тонкоплівкові сонячні елементи складної структури, коренем технологічного процесу виготовлення яких є пошарове покривання різноманітними способами відповідних сполук тонких плівок. Можливість нанесення плівок на підкладки з нержавіючої сталі та термостійких полімерів дозволяє створювати гнучкі портативні сонячні модулі та проводити осадження на порівняно великих площах. Для набору напруги здійснюється або послідовне з'єднання заготовок малої площі, або сегментування великої заготовки на потрібне число одиничних ФЕП зі своїм наступним електричним з'єднанням. Модулі на основі аморфного кремнію складаються приблизно з шести шарів. Прозоре покриття закриває антивідбивний шар, після чого йдуть напівпровідники p і n типу провідності, потім контактний шар і підкладка. Принцип роботи цих модулів нічим не відрізняється від кристалічних сонячних модулів.

Переваги сонячних елементів на основі аморфного кремнію: гнучкість та легкість; фотопанелі з аморфного кремнію не схильні до корозії; температурний коефіцієнт зниження потужності у таких модулів вдвічі менший у порівнянні з монокристалічними модулями, що означає їх ефективніші вихідні параметри при збільшенні робочої температури; екологічна чистота на відміну CdTe-плівок, де Cd є токсичним матеріалом.

Недоліки: потрібна велика площа для установки; менша заповнюваність та нижчий ККД означає необхідність купівлі більше опорних конструкцій, кабелів тощо, що збільшує вартість кінцевої енергосистеми; помітне зниження параметрів під час використання.

У зв'язку з цим сонячні елементи на основі аморфного кремнію мають недовгий термін служби (7-10 років).

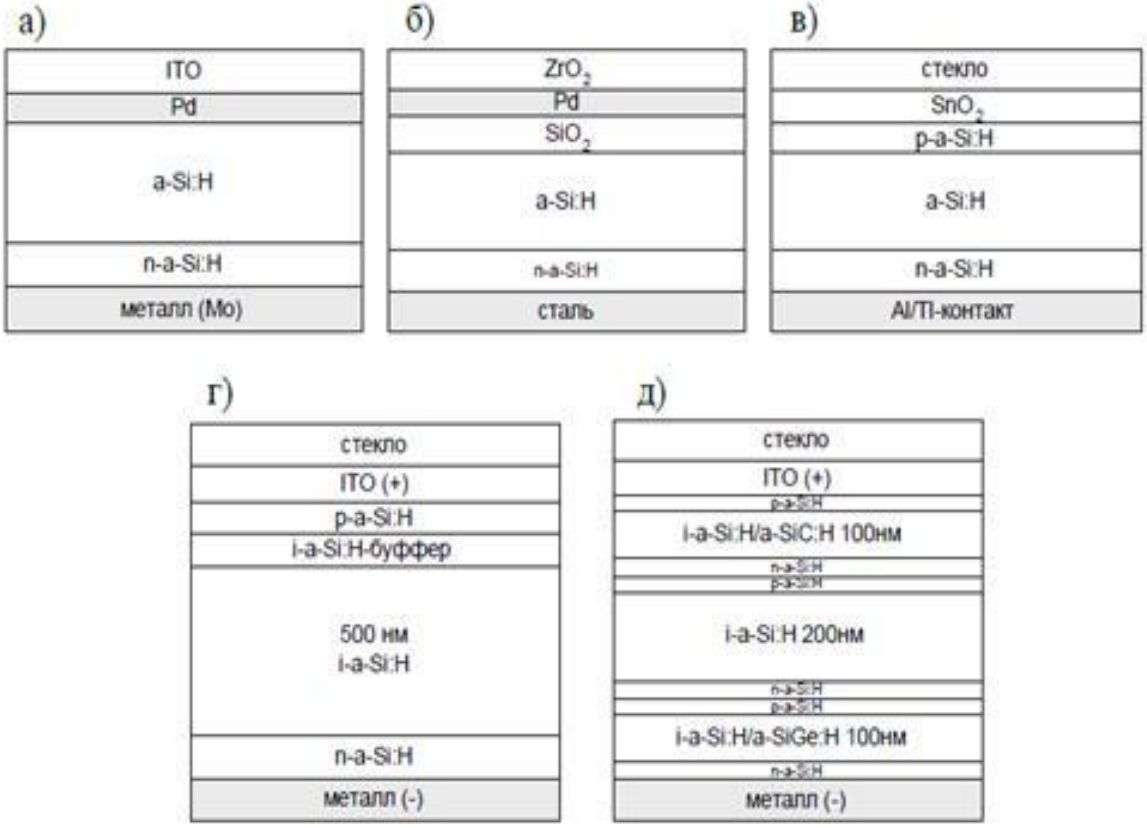

Рисунок. 1.2 - ФЕП на основі аморфного кремнію: а) бар'єр Шоттки; б) МДП (MUS) – структура; в) p-i-n-структура; г) p-i-n-структура з буферним шаром (однопереходний елемент); д) триперехідний елемент (3 p-i-n-структури з послідовним з'єднанням)

1.3 ФЕП з використанням квантових точок.

Підвищення спектральної чутливості каскаду ФЕП можливе при використанні напівпровідникових структур з квантовими точками (КТ), що самоорганізуються, — гетероструктурами з граничним випадком розмірного квантування. Завдяки дискретному енергетичному спектру КТ з'являється теоретично можливість вирішити проблему втрат на термалізацію. (Термалізація – поглинання фотонів з енергією менше ширини забороненої зони) Керуючи розмірами, формою КТ та складом матриці (шар, що оточує

КТ), можна контрольовано модифікувати край зони поглинання додаткового переходу на КТ, що дозволить розширити спектральний діапазон чутливості та збільшити фотострум ФЕП на КТ.

Співробітник NREL Артур Нозік у 1990-ті роки постулював можливість отримання кількох електронно-діркових пар із КТ вузькозонних напівпровідників, опромінених квантами короткохвильового спектру сонячного випромінювання [4]. У 2006 р. експериментально встановлено, що при опроміненні ультрафіолетовим випромінюванням КТ PbSe один фотон породжує сім електронів, а в 2007 отримано, що один фотон випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 0{,}48$ мкм породжує два електрони з КТ кремнію. Теоретичний аналіз показує, що утилізація довго- та короткохвильової частини спектру сонячного випромінювання за допомогою КТ дозволяє досягти ефективності сонячного елемента, близького до термодинамічної межі (понад 84 %) [5]. Теоретичні оцінки передбачають ефективність 53% для сонячних елементів з квантовими точками Ge в Si.

Однією з переваг ФЕП із застосуванням КТ є спрощення дизайну через використання двох напівпровідникових матеріалів: один – широкозонний (матричний), інший – узкозонний (для виготовлення КТ). Приклад структури такого сонячного елемента та його енергетична схема показано на рис. 1.3.

Теоретично доведено [6], що введення КТ вузькозонного напівпровідникового матеріалу з шириною забороненої зони E_{g1} у ФЕП, виготовлений із напівзонового широкозонного матеріалу з шириною забороненої зони $E_{g2} > E_{g1}$, дозволяє утилізувати як короткохвильове випромінювання з енергією $h\nu > E_{g2}$, так і випромінювання E_{g2}, яке не поглинається в матеріалі широкозонного напівпровідника При цьому, як показано на енергетичній діаграмі одноперехідного сонячного елемента з КТ (рис. 4b), здійснюється утилізація довгохвильової частини спектра сонячного випромінювання за рахунок підсумовування енергії двох довгохвильових квантів світла [7].

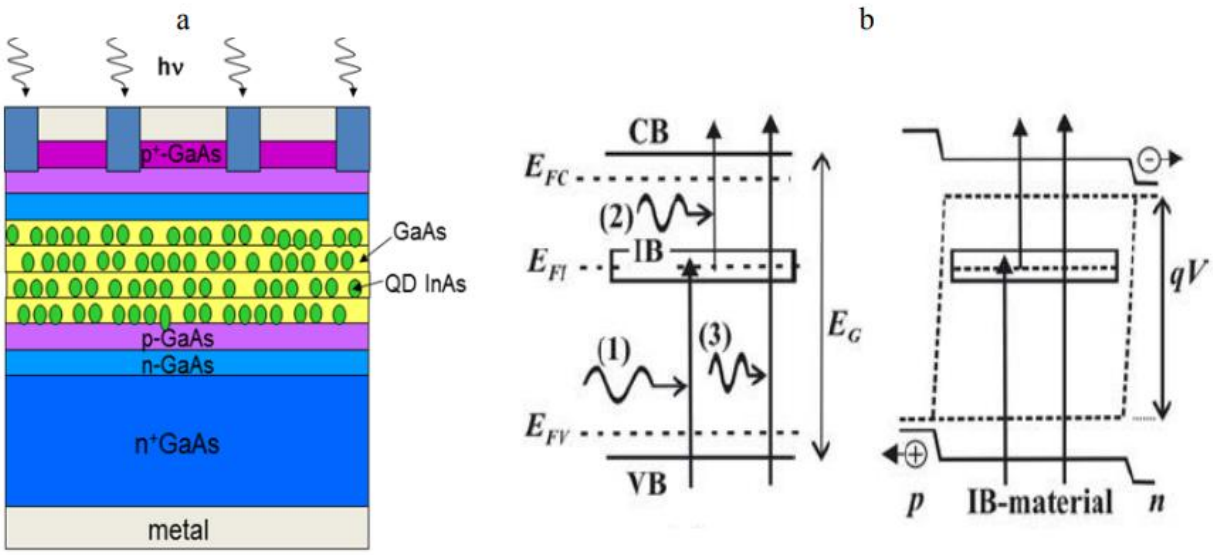

Рисунок. 1.3 - Однопереходный солнечный элемент с квантовыми точками (a) и его энергетическая диаграмма (b)

У сонячних елементах необхідні масиви квантових точок з більшою щільністю N (для збільшення коефіцієнта поглинання) і, по можливості, з широким розподілом КТ за розмірами L, так як це забезпечить повніше використання сонячного спектру.

Застосування широкозонних напівпровідників як матричний матеріал НГЕС з КТ дозволяє виготовляти ФЕП з поліпшеними техніко-економічними характеристиками у зв'язку наступними чинниками [8]:

1. великі значення ширини забороненої зони Eg визначають високу температурну стабільність і високу температурну робочу межу створюваного сонячного елемента;
2. наявність у прямозонних напівпровідників груп III–V різкого краю основної смуги поглинання, яка визначається прямими оптичними переходами, призводить до можливості отримання високої ефективності перетворення сонячного випромінювання тонкоплівковими ФЕП;
3. є можливість досягнення великої радіаційної стійкості, оскільки під впливом радіаційного випромінювання у цих матеріалах немає

істотного зменшення низького значення дифузійної довжини неосновних носіїв заряду, притаманних даних матеріалів;

4. великий потенційний бар'єр у р–п-переходах на широкозонних матеріалах груп III–V обумовлює низькі значення струмів, що, з одного боку, забезпечує велику область лінійної залежності вихідної потужності ФЕП від світлового потоку (в області великих світлових потоків), а з іншого – дозволяє отримувати високу ефективність при роботі в діапазоні низьких світлових потоків та температур;

крім GaAs, для отримання однопереходних ФЕП як широкозонний напівпровідник перспективно використовувати GaP, а як вузькозонний для виготовлення КТ – Ge, InAs, GaSb, а також тверді розчини на їх основі (GexSi1-x, InAsP, GaInSb).

1.4 Каскадні ФЕП на основі з'єднань A3B5

В даний час одним з найперспективніших типів сонячних елементів є багатокаскадні структури, що використовують напівпровідникові сполуки A3B5, ККД яких при освітленні заатмосферним сонячним спектром перевищує 30%. Структури таких ФЕП одержують методом МОС-гідридної епітаксії, послідовно осаджуючи десятки різних верств на підкладку Ge. Збільшення ефективності перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію безпосередньо пов'язане зі збільшенням кількості каскадів сонячних елементів, що призводить до підвищення спектральної чутливості ФЕП.

Розрахунки за методом Шоклі-Квайссера показують, що максимальна теоретична ефективність каскадного ФЕП для неконцентрованого сонячного випромінювання ККД чотирикаскадного ФЕП досягає 53%, трикаскадного - 49%, двокаскадного - 42%. Для ФЕП із нескінченно великим числом каскадів максимальна ефективність досягає 68,2%..

На основі напівпровідникових структур А3В5 формують як одноперехідні, так і багатоперехідні фотоприймальні пристрої. Поглинаючі шари А3В5 вирощують різними методами, такими як рідко-фазна кристалізація в полі температурного градієнта, іонно-променева кристалізація, лазерна кристалізація. Як правило, вирощування напівпровідникових гетероструктур відбувається на бінарних підкладках, найчастіше як основа з усього спектра напівпровідникових сполук використовують GaAs і InP. У вирощені шари твердих розчинів можливе введення домішок 3-валентних металів. У порівнянні з тонкоплівковими сонячними елементами напівпровідникові ФЕП на основі А3В5 мають товщину до 210 мкм, що значно збільшує витрату матеріалу на виробництво таких ФЕП і відповідно збільшує собівартість. З метою компенсувати високу ціну на виробництво таких структур необхідно значно збільшити ККД ФЕП шляхом створення багатоперехідних пристроїв, в яких комбінуються поглиначі з великими і малими значеннями ширини забороненої зони. Також для збільшення ККД таких структур застосовуються концентраторні системи з лінз або дзеркал.

В даний час провідними фірмами, що виробляють ФЕП є PVI, Entech, Amonix, Sunpower, Spectrolat. Їхні ФЕП використовуються в космічній промисловості і показують середню ефективність ~ 30%, а модулі ~ 17%, дані показники є кращим серед усіх ФЕП. На даний момент немає підстав чекати на вагомий прорив у технології виробництва бінарних ФЕП А3В5. Для підвищення ККД ФЕП А3В5 необхідні зміни у конструкції, які досягаються шляхом введення нових шарів, але це неминуче веде до ускладнення технологічного оснащення та підвищення витрат на виробництво.

Для бінарних гетероструктур на основі сполук А3В5 характерними є дискретні області спектральної чутливості в інфрачервоному діапазоні, а також у таких гетероструктурах відсутня можливість підбору пари сполук, що добре узгоджуються за параметрами кристалічної решітки..

У свою чергу, перехід до потрійних з'єднань на основі A3B5 дає можливість розширити спектральний діапазон і завдяки можливості керування шириною забороненої зони Eg зробити його безперервним.

Подальше збільшення числа компонентів до чотирьох дозволяє збільшити кількість ступенів свободи K, що дає можливість перейти до незалежного управління все більшим числом параметрів багатокомпонентної системи.

Число ступенів свободи K можна обчислити із співвідношення K=M+N-2, де M та N – число атомів третьої чи п'ятої груп. Отже, бінарне з'єднання має нульовий ступінь свободи, потрійне з'єднання одну, а чотири з'єднання дві. Тому в четверних гетероструктурах можливе незалежне керування такими параметрами як ширина забороненої зони Eg і постійна кристалічної решітки.

Трикаскадні структури вже давно існують на ринку, і є дорогими (у порівнянні з іншими типами ФЕП), але більш ефективні пристрої. На рис. 1.4 представлено схему трикаскадного ФЕП.

Триперехідні фотоелектричні перетворювачі на основі GaInP/GaAs/InGaAs або GaInP/GaInAs/Ge вже досягли рекордних коефіцієнтів перетворення, що перевищують 40%. Недоліками каскадних фотоперетворювачів є складність технологічного процесу та використання дорогих матеріалів.

Крім трьохкаскадних гетеростркту зараз ведуться дослідження можливостей чотирикаскадних структур. Як видно з малюнка 6, чотирикаскадні ФЕП перевищують трикаскадні за рівнем ККД на 2.5% -3%. Основна складність виготовлення епітаксійної структури ФЕП з кількістю каскадів більше трьох полягає у підборі матеріалів з необхідними оптичними параметрами та близькими значеннями постійної кристалічної решітки. Існує кілька методів вирішення цієї проблеми.

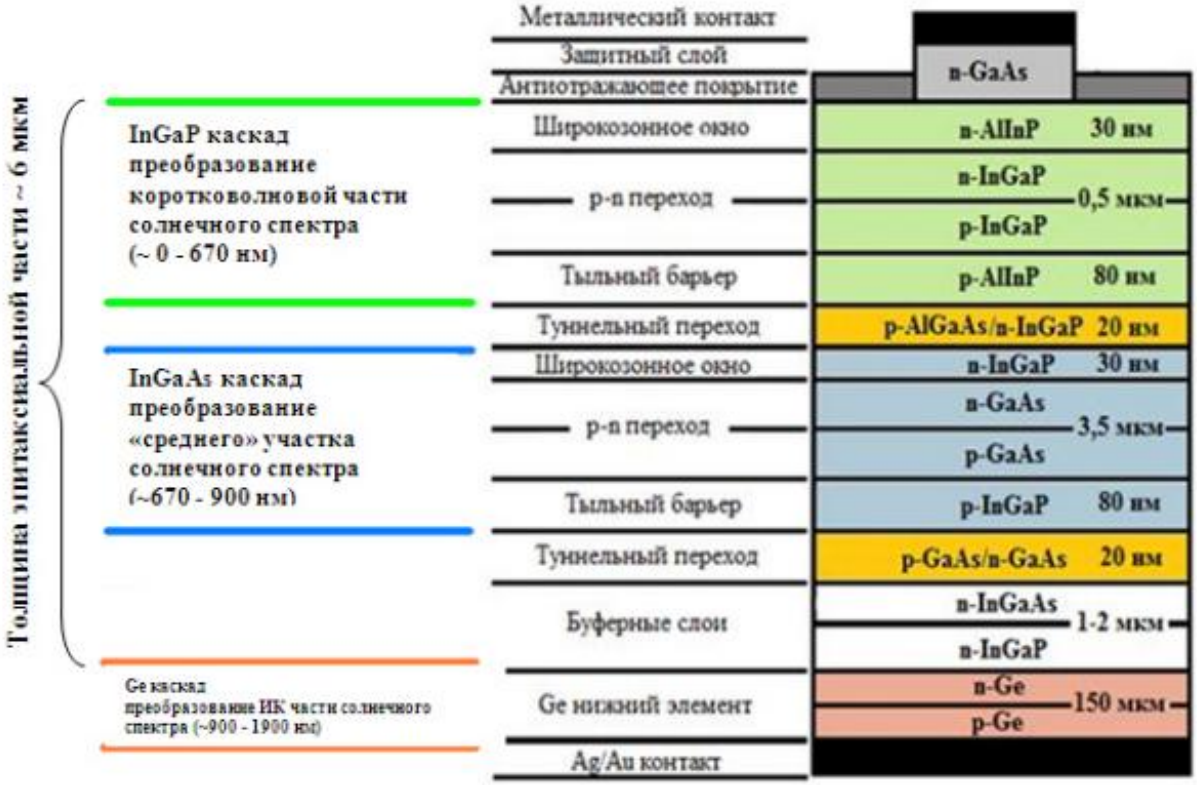

Рисунок. 1.4 – Схема побудови трикаскадного ФЕП

Застосування градієнтного метаморфного буфера в епітаксійній структурі СЕ дає можливість значно розширити спектр матеріалів, доступних до використання, дозволяючи в процесі епітаксійного зростання змінювати значення постійної кристалічної решітки. Однак застосування градієнтного буфера пов'язане з появою додаткових дислокацій та дефектів кристалічних решіток, які є центрами рекомбінації носіїв заряду, що знижують кінцеві параметри ФЕП [9].

При виготовленні багатокаскадних СЕ може застосовуватися метод механічного стикування двох та більше окремих епітаксійних структур. Однак стик є джерелом додаткових дислокацій. Крім того, даний метод виготовлення багатокаскадних сонячних елементів є досить дорогим і дуже трудомістким, оскільки передбачає проведення кількох процесів епітаксійного зростання на різних підкладках, чим значно ускладнює технологічний процес при виробництві такого типу ФЕП [10].

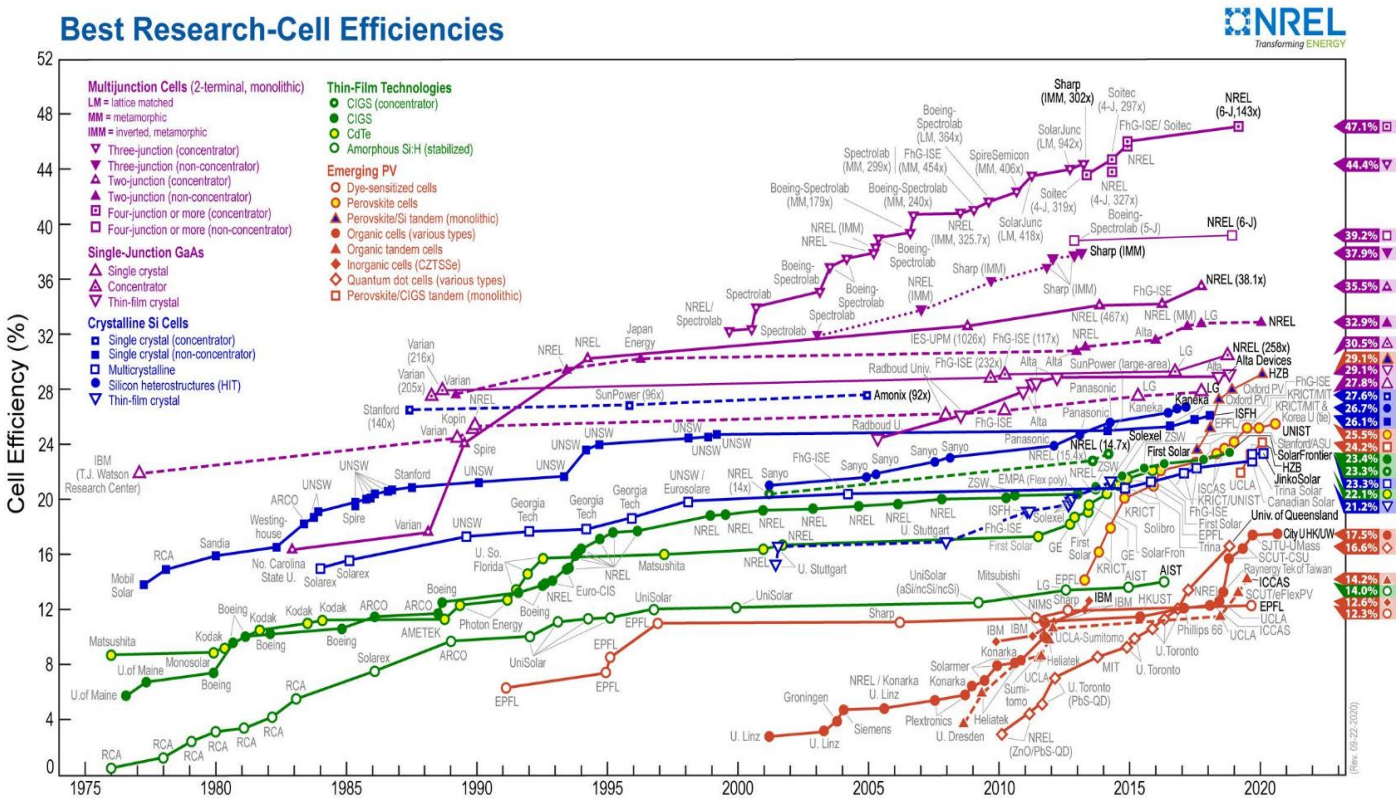

Рисунок. 1.5 - Дані Національної лабораторії з відновлюваної енергетики (NREL, США) щодо розробок сонячних елементів з максимальною ефективністю за 2020 рік.

2. ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ФЕП

2.1 Одержання полікристалічного та кристалічного кремнію. Сіменс-процес.

Вихідною сировиною для полікристалічного кремнію є діоксид кремнію (кремнезему). Кремнезем широко поширений у природі як піску, кварцу і глини. Для отримання полікремнію сонячної якості розглядається кілька різних підходів: традиційні підходи, засновані на перекладі металургійного кремнію у форму трихлорсиланів та моносіланів з подальшим очищенням та відновленням; підходи, що ґрунтуються на

доочищенні металургійного кремнію до необхідної чистоти; підходи, засновані на одержанні кремнію з особливо чистого кварцу шляхом його відновлення з подальшим доочищенням.

Найбільш поширеним є перший із наведених підходів. Перша стадія одержання полікристалічного кремнію полягає у реалізації карботермічного відновлення діоксиду кремнію в дуговій печі при температурі близько 2100°К. В результаті виходить технічний (металургійний) кремній..

В даний час найбільш поширеним є метод виробництва полікремнію з використанням процесу і реактора Сіменс (Siemens). Сіменс-процес – це процес хімічного осадження полікремнію з газової фази (chemical vapore deposition, CVD). У цьому процесі U-подібні зливки полікремнію отримують водневим відновленням трихлорсиланів (ТХС) за високої температури. При цьому полікремній осідає на стрижні-затравки, поміщені в Сіменс-реактор, що має охолоджуваний куполоподібний корпус.

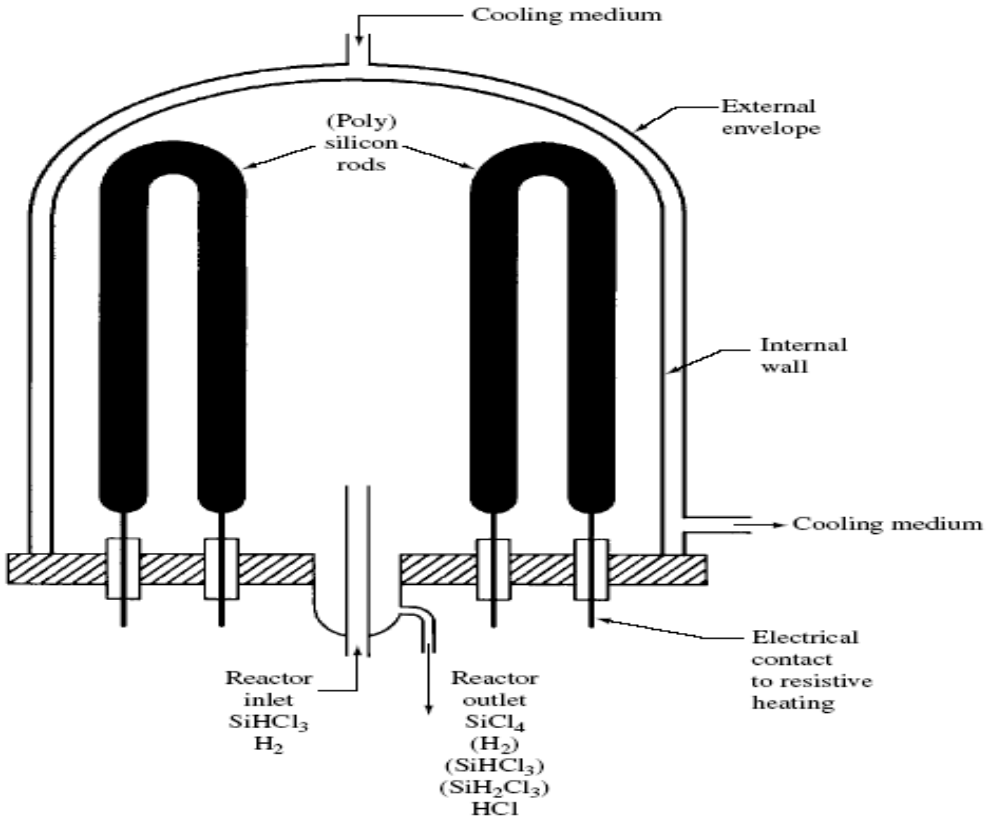

Рисунок. 2.1 – Схема Сіменс-реактора

2.2 Методи виробництва ФЕП на квантових точках

Спроби створення методами молекулярно-променевої епітаксії (МПЕ) та хімічного осадження з парової фази металоорганічних сполук (MOCVD) високоефективних СЕ на основі наногетероструктур з КТ, де як матричний матеріал використовується GaAs, а матеріалу для квантових точок – InAs, не увінчалися успіхом, так як введення КТ не збільшувало, а зменшувало квантову ефективність СЕ, причому з підвищенням кількості масивів КТ ефективність СЕ зменшувалась [11]. Це пов'язують із наявністю в гетероструктурах деформованих напружених «змочують» шарів вузькозонних напівпровідників, що утворюються між КТ, у яких створюються генераційно-рекомбінаційні центри, відповідальні за безвипромінювальні канали рекомбінації.

Розглянемо методи, що дозволяють отримувати гетероструктуру з масивами КТ, які не містять «змочуючих» шарів у проміжках між КТ.

Метод рідкофазної епітаксії (РФЕ) з імпульсним охолодженням підкладки (ІОП) заснований на процесах кристалізації та розчинення твердого тіла в рідкій та газовій фазах і може використовуватися для отримання різних напівпровідникових наногетероструктур з КТ.

Сутність даного методу отримання епітаксійних структур із рідкої фази полягає: у нагріванні розчину-розплаву до температури насичення; приведенні його в контакт з робочою поверхнею підкладки, нагрітої до такої самої температури; приведенні поверхні підкладки, протилежної робочої, в контакт з теплопоглиначем; проведенні кристалізації багатошарових епітаксійних структур при використанні розчинів-розплавів різного складу шляхом багаторазового створення на робочій стороні підкладки імпульсів охолодження величиною, тривалістю та швидкістю наростання переднього фронту в інтервалах (0,5–15,0) °С, (5·10^2 ÷ 5) с, (5÷0,5)·10^3 град./с відповідно; кристалізації масивів КТ з розчинених матеріалів з постійними

решітки, що відрізняються більш ніж на 0,6 % від постійних решіток монокристалічних матеріалів, на яких вони нарощуються.

Метод РФЕ з ІОП полягає в тому, що тильна сторона підкладки при фіксованій температурі Т стикається з теплопоглиначем з температурою Тр меншою, ніж температура підкладки на величину $\Delta T = T - Tp$, при цьому робоча поверхня підкладки знаходиться в контакті з розчином-розплавом, мають насичення згідно з цією фіксованою температурою. Через незначний відрізок часу ($\tau \approx 10\text{-}3 \div 10\text{-}1$ с), який визначає час імпульсу охолодження підкладки, теплопоглинач нагрівається до температури підкладки. За час на робочій поверхні підкладки відбувається кристалізація наношару або масиву КТ [12].

Так як постійні решіток матеріалів КТ і підкладки різні, вирощування КТ здійснюється за механізмом Кранського – Крастанова, згідно з яким у початковий момент зростання на підкладці формується суцільний «змочуючий» шар, у якого зі зростанням товщини місцями виникають механічні напруження з максимумами в середині періоду ноніуса досконалого будови на гетерограниці. Звідси щільність КТ лімітується переважно періодом ноніуса досконалої будови. Оскільки кристалізація здійснюється з рідкої фази, наявність розчину-розплаву, що є розчинником у процесі релаксації імпульсу охолодження, призводить до формування структурно досконалих КТ, оскільки в процесі низького пересичення відбувається «заліковування» структурних дефектів у КТ, що ростуть у зв'язку з тим, що процес їх формування здійснюється в умовах, близьких до динамічної рівноваги. При подальшій релаксації імпульсу охолодження «змочуючий» шар у проміжку між КТ розчиняється.

Наступний етап процесу – зарощування масиву КТ нанорозмірним шаром матричного матеріалу, званого спейсерним шаром, вирощуючи його такою товщиною, яка б забезпечила тунельний перехід носіїв заряду від одного масиву КТ до іншого, тобто по вертикально зв'язаних КТ. Розміщення багатошарових структур з вертикально зв'язаними КТ в області p-n-переходу

призводить до поділу електростатичним полем p-n-переходу носіїв заряду, що генеруються цими КТ.

Здійснюється вирощування багатошарової p–n-структури з КТ в одному технологічному процесі, що містить нанорозмірні шари та масиви КТ різної товщини, що досягається шляхом використання теплопоглинача, розчинів-розплавів різного складу та різних імпульсів охолодження на робочій поверхні підкладки.

Є метод на основі РФЕ, сутність якого полягає в тому, що зростання гетероструктур з КТ здійснювався у графітовій касеті «пінального» типу в горизонтальному реакторі в процесі протягування підкладки під розчином-розплавом при досягненні заданої температури. Експерименти з епітаксійного вирощування проводилися в температурному діапазоні (420–445) °С при швидкості охолодження системи 0,3 град./хв.[13].

Недоліком даного методу є те, що в умовах проведення процесів, описаних вище, неможливо отримувати якісні структури з властивостями, що відтворюються.

Один із перспективних методів формування наногетероструктур – краплинний. Сутність його полягає в тому, що на першій стадії процесу на поверхні підкладки утворюються нанорозмірні краплі елемента 3 групи (наприклад, In), а на другій стадії відбувається розчинення в цих краплях елемента 5 групи (наприклад, As), в результаті чого на підкладці утворюються нанорозмірні кристали груп 3-5.

Краплинний метод, на відміну від традиційної епітаксії за механізмом Странського – Крастанова, дає можливість отримання ізольованих квантових точок незалежно від ступеня неузгодженості періодів решіток і є одним із варіантів кристалізації за механізмом «пар – рідина – тверде тіло», що нагадує ізотермічну локальну рідкофазну епітаксию з підживленням. із газової фази. На якість вирощуваних наногетероструктур з КТ даним методом не впливає значення неузгодженості періодів кристалічної решітки

підкладки та осаджуваної речовини, що дозволяє формувати КТ в ізоперіодних системах і без шару, що «змочує».

Однією з переваг даного методу є те, що при високій якості отриманих структур їх вартість набагато нижча, ніж у структурах, отриманих методом молекулярно-променевої епітаксії.

Незважаючи на явні переваги, основні недоліки методу – складність технологічного процесу та дорожнеча обладнання, комплектуючих та матеріалів у порівнянні з методом РФЕ з ІОП.

2.3 Методи виготовлення каскадних ФЕП. МОС-гідридна епітаксія

Вперше епітаксійне зростання сполук А3В5 було здійснено в 1960 році, під час якого здійснювалося осадження InP з прекурсорів триметиліндії (TMIn) та фосфіну (PH3) у закритій системі. Пізніше, авторами роботи[14] було продемонстровано можливість проведення процесів епітаксійного зростання напівпровідникових сполук з МОС та гідридних джерел у відкритій системі, як для гомо- та гетероепітаксіальних шарів.

Завдяки низці переваг метод МОС - гідридної епітаксії, з часу перших повідомлень про його застосування, перетворився на один з найбільш поширених промислових методів, що дозволяють вирішувати складні завдання сучасної технології напівпровідникових структур, включаючи створення низькорозмірних структур, таких як каскадні ФЕП.

Метод МОС-гідридної епітаксії полягає в послідовному осадженні напівпровідникових шарів із парової фази, із застосуванням МОС – елементів третьої групи А3 та гідридів елементів В5. Осадження ґрунтується на реакціях:

$$A^3(CH_3)_3 + B^5H_3 \rightarrow A^3B^5 + 3CH_4$$
$$A^3(C_2H_5)_3 + B^5H_3 \rightarrow A^3B^5 + 3C_2H_5$$

Однією з найважливіших характеристик МОС є тиск пари, який характеризує легкість доставки МОС область реакції газом-носієм. Гідриди елементів В5 зазвичай застосовують у вигляді заздалегідь приготовленої суміші з високочистим воднем (від 10% до 30%, останнє характерне для PH3) або у вигляді концентратів. Гіриди четвертої групи (SiH4, SeH4) зазвичай використовуються для легування (n-тип), і тому вони застосовуються у вигляді сильно розведених сумішей з воднем.

Хімічна схожість газів, що використовуються як джерела різних елементів, забезпечує можливість епітаксійного нарощування широкого кола матеріалів без істотної зміни умов зростання. Схематичне зображення процесу МОС-гідридної епітаксії представлено рис 2.2, який можна умовно розділити на сім етапів.

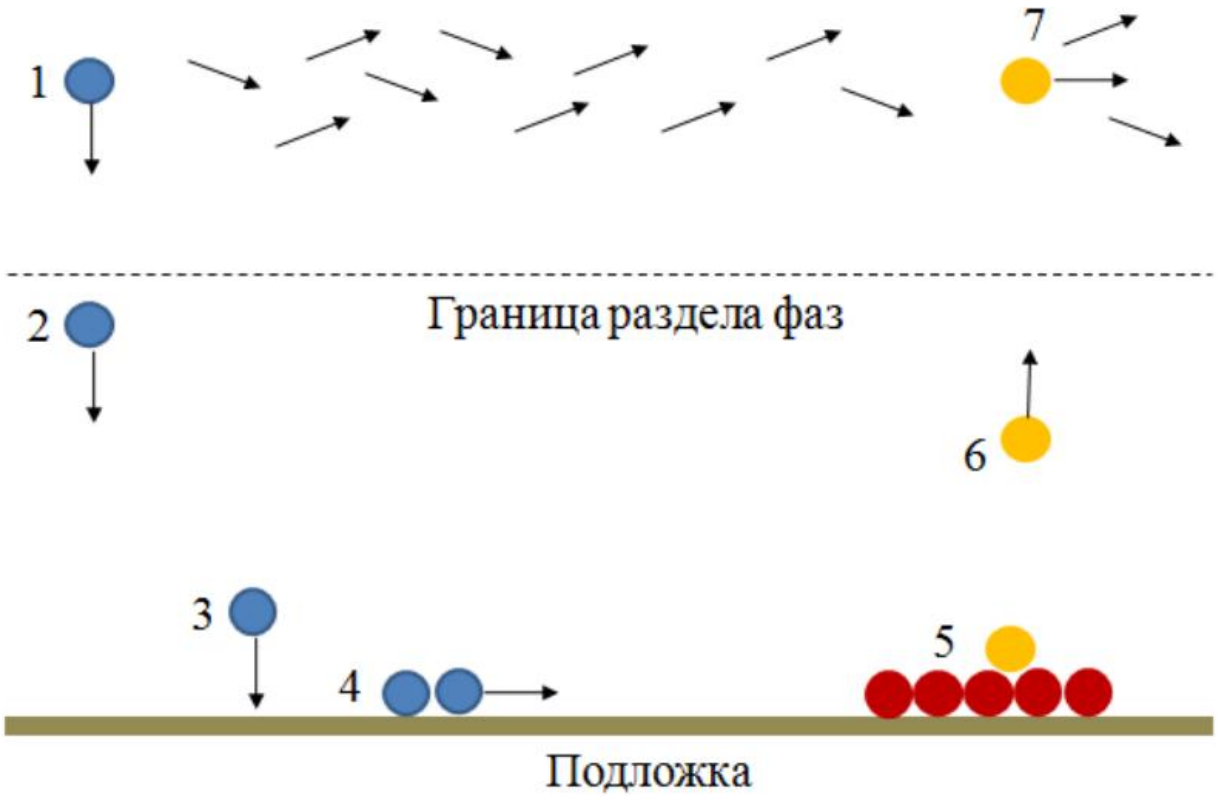

Рисунок. 2.2 - Процес формування епітаксійного шару

На першому етапі (1) відбувається доставка реагентів газом носієм реакційну камеру, найчастіше надчистим воднем. Потім відбувається дифузія молекул реагентів через межу розділу фаз (2) з наступною абсорбцією на поверхні підкладки (3). Наступним етапом є міграція молекул до зон кристалізації (4), в яких відбувається їх хімічне розкладання під дією температури (5). Останнім етапом є десорбція побічних продуктів (6) та їх подальше видалення з реакційної камери (7).

Основною вимогою до застосовуваних матеріалів є низький вміст сторонніх домішок, з метою запобігання їх входження в епітаксійний шар, що росте.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕССУ ПОГЛИНАННЯ У БАГАТОПЕРЕХІДНОМУ СОНЯЧНОМУ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІ

3.1 Методика розрахунку поглинальної здатності багатошарового сонячного елемента

Сонячні елементи виготовляють у вигляді структур на основі кристалічного (c-Si) та гідрогенізованого аморфного кремнію (a-Si :H), телуриду кадмію (CdTe), диселеніду індію (CuInSe2 - CIS), диселеніду галію (CuGaSe2 - CGS), CuIn1−xGaxSe2 - CIGS та інших матеріалів. У спеціальних застосуваннях (наприклад, у космічних апаратах) дуже важливою є висока ефективність сонячного елемента на одиницю площі та маси. У цьому випадку використовують дорогі матеріали та складні конструктивні рішення, зокрема багатоперехідні (2…6) структури фотоперетворювачів.

Розробка багатошарових структур фотоперетворювачів потребує великих витрат і на етапі моделювання їх можна істотно зменшити. Підвищення ефективності фотоперетворювачів залежить насамперед від

їхньої поглинальної здатності та коефіцієнта конверсії сонячної енергії в електричну. Поглинальна здатність визначається залежністю коефіцієнта поглинання матеріалу від довжини хвилі в діапазоні сонячного випромінювання. Розрахунки поглинальної здатності сонячних елементів, виготовлених на основі різних матеріалів [15,16], ґрунтуються на відомих спектральних розподілах коефіцієнтів поглинання матеріалів у діапазоні основного потоку сонячного випромінювання [17]. Досліджено експериментально структури багатоперехідних сонячних фотоперетворювачів [18,19], які мають високу ефективність (35…50%). Результати вимірювань конверсійної ефективності найпоширеніших напівпровідникових матеріалів показують, що для кожного є діапазони довжин хвиль з максимальною ефективністю [20]. Тому можна підібрати послідовність шарів багатоперехідного фотоперетворювача. Аналогічна структура 4-х перехідного елемента використовувалася апробації запропонованої методики.

Для адекватного порівняння ефективності поглинання світла матеріалами слід враховувати їх коефіцієнт поглинання в діапазоні як мінімум 0,3...2,5 мкм, в якому знаходиться більше 99% сонячної енергії, що досягає поверхні Землі. Тому ефективність фотоперетворювача повинна розраховуватися з урахуванням відношення значень поглиненої до падаючої потужності у зазначеній області спектра. Вочевидь, такий широкий діапазон вимагає застосування кількох активних шарів (тандемних фотоперетворювачів) для максимального ефекту поглинання [15]. У роботі наведено результати розрахунку поглинальної здатності структури Ge/InAs/GaAs/InP. Розрахунки виконані на основі методики [15,16], доопрацьованої стосовно багатоперехідних структур, і дозволяють порівнювати ефективність поглинання спектру 0,3...2,5 мкм для багатошарових тонкоплівкових структур.

Спектр сонячного випромінювання досить докладно досліджений та представлений у публікаціях. У роботі використано розподіл, отриманий

American Society for Testing and Materials (ASTM) [17] для певних атмосферних умов та географічного положення. Цей розподіл було використано для розрахунків у цій роботі (рис.3.1). Верхній графік є спектральною щільністю потужності сонячного випромінювання за межами атмосфери (AM0).

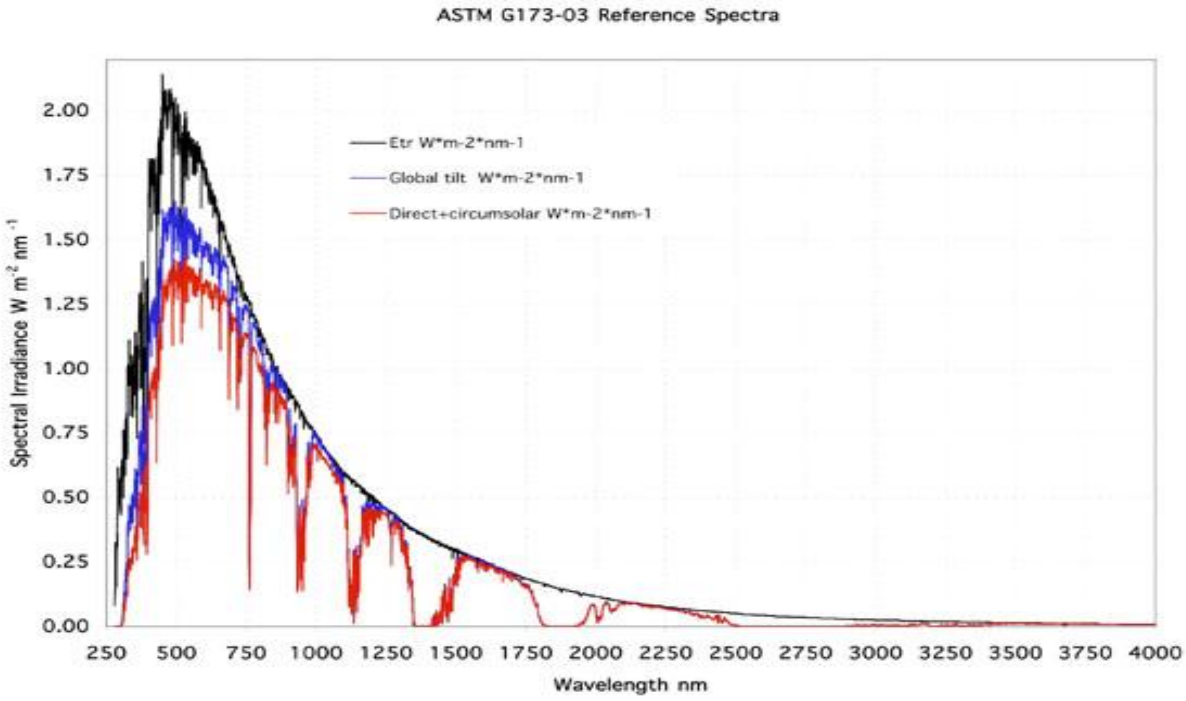

Рисунок. 3.1 – Розподіл спектру сонячного випромінювання AM0(Etr), AM1.5 з урахуванням розсіювання світла (+10%) (Global), прямий AM1.5 (Direct+)

Середній власне і є залежністю AM1.5, що використовується в роботі, з урахуванням розсіяного атмосферою (відповідно до закону Релея) випромінювання. Нижній графік – це пряме сонячне випромінювання AM1.5. Облік розсіяного атмосферою випромінювання, як видно з графіків, додає потужність переважно у видимій частині спектра. В цілому ця добавка становить близько 10%.

Розподіл представлений в діапазоні 0,25 ... 4,0 мкм (мал. 8), проте очевидно, що більшість цікавого для нас потоку потужності AM1.5 Global знаходиться в діапазоні 0,3 ... 2,5 мкм. Тому всім досліджуваних матеріалів використовувався однаковий діапазон сонячного спектра 0,3…2,5 мкм.

Для підтвердження було виконано розрахунки щільності потужності випромінювання спектра Сонця AM1.5 Global, обрізаного зверху довжиною хвилі [4]. Розрахунки показують, що у діапазоні 0,3…2,5 мкм Землю падає 99,1% загальної потужності сонячного випромінювання. Літературні дані виміру щільності потужності Сонця дають 0,846 кВт/м^2 для AM1.5 Direct+ та 0,93 кВт/м^2 для AM1.5 Global, що непогано узгоджується з розрахунком. Оскільки спектр сонячного випромінювання представлений дискретною функцією [19], у розрахунках поглинаючої здатності можна скористатися цими даними безпосередньо. Спектральні залежності коефіцієнтів поглинання матеріалів представлені експериментальними даними чи розраховані виходячи з емпіричних формул [21,22], з достатньою точністю наших розрахунків. Враховуючи викладене вище, була виконана обробка зазначених залежностей, діапазон спектру, що нас цікавив, був розбитий на піддіапазони розміром 10...50 нм (розмір диктується необхідною точністю розрахунків). Для розрахунків поглинальної здатності використовувалося співвідношення [1], яке стосовно чотириперехідної структури має вигляд

$$AA(dd1,dd2) := \left[\frac{\sum_{k=0}^{n1} \left[FY_k \cdot \lambda_k \cdot \left[1 - \left(e^{-A1_k \cdot dd1 \cdot 100} \cdot e^{-A2_k \cdot dd2 \cdot 100} \cdot e^{-A3_k \cdot dd3 \cdot 100} e^{-A4_k \cdot dd4 \cdot 100} \right) \right] \right]}{\sum_{k=0}^{n1} \left(FY_k \cdot \lambda_k \right)} \right], \quad (1)$$

де *FYk* – щільність потужності сонячного випромінювання AM1.5 Global, усереднена по k-му піддіапазон спектру;

λ_k – довжина хвилі, що відповідає середині k-го піддіапазону спектру;

A_{mk} – коефіцієнт поглинання матеріалу m-го шару, усереднений по k-му піддіапазон спектру;

dd_m– товщина матеріалу m-го шару;

k – номер піддіапазону спектру;

$n1$ – кількість піддіапазонів спектру, на який розбитий основний діапазон випромінювання;

$1...4$ – номер шару відповідного матеріалу у структурі фотоперетворювача.

У кожному піддіапазоні визначаємо середнє значення функцій FYk, A_{mk}, λ_k. Ці масиви даних використовуються у програмі для безпосередніх розрахунків.

3.2 Розрахунок поглинальної здатності фотоперетворювача

Розрахунки поглинальної здатності представлені для чотириперехідної структури фотоперетворювача Ge/InAs/GaAs/InP. У розрахунках передбачено визначення поглинання кожним шаром окремо та всією структурою загалом. У процесі моделювання змінювалися товщини шарів відповідних матеріалів. Розрахунки проводилися для діапазону довжин хвиль 300...1800 нм.

В рис. 3.2 наведено розрахунки поглинальної здатності структури при зміні товщини шару 1 (Ge) від 1 до 1000000 нм. При товщині 1…50 нм матеріал мало впливає поглинання всієї структури. У діапазоні 50-3000 нм матеріал істотно впливає на поглинання фотоперетворювача. Подальше збільшення товщини призводить до значного перевитрати матеріалу і це не дає адекватного приросту ефективності. На рис. 3.3, 3.4 та 3.5 наведені аналогічні залежності з урахуванням зміни товщини шарів 2, 3, 4, відповідно.

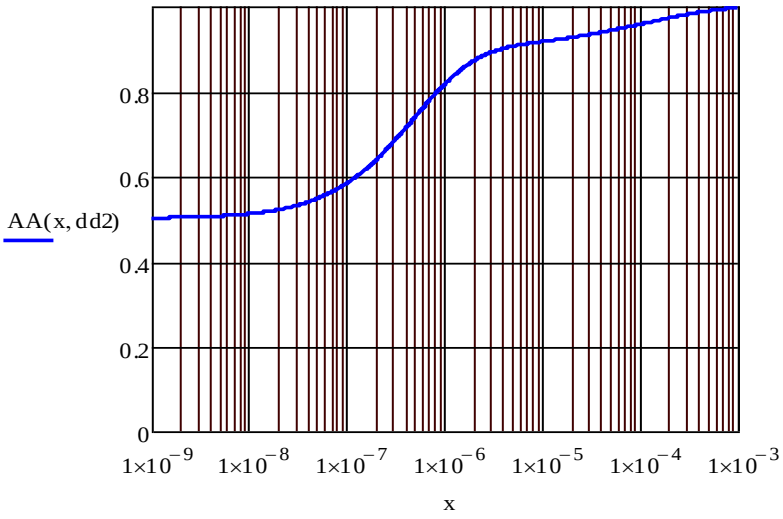

Рисунок. 3.2– Поглинання структури при зміні товщини шару 1 (d2, d3, d4 =100нм)

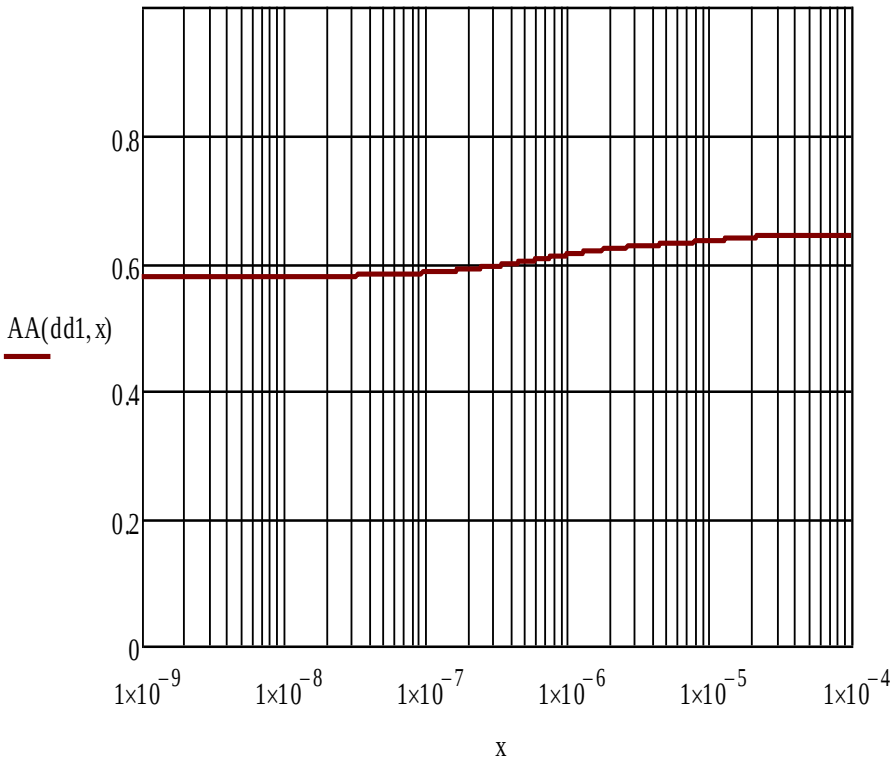

Рисунок. 3.3– Поглинання структури при зміні товщини шару 2 (d1, d3, d4 =100нм)

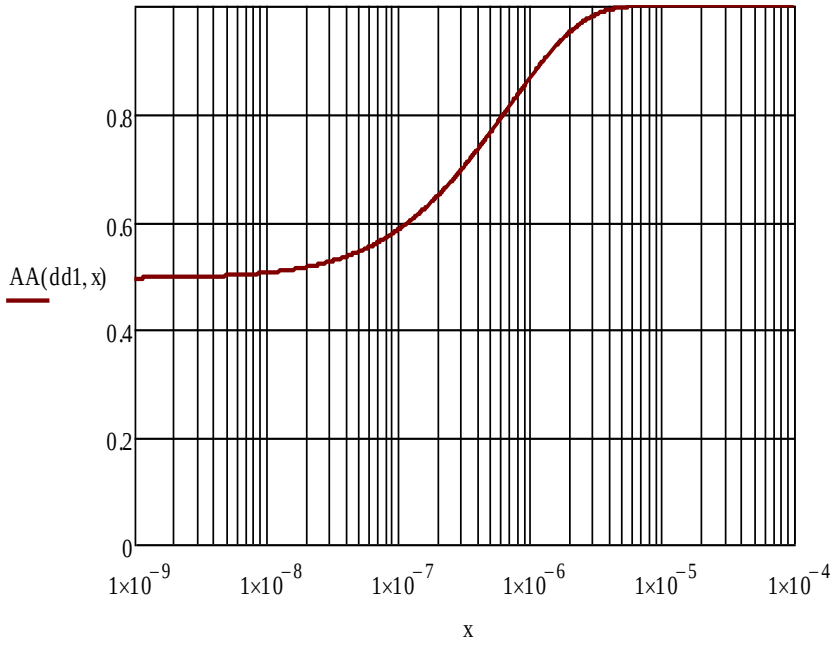

Рис. 3.4 – Поглинання структури при зміні товщини шару 3 (d1, d2, d4 =100нм)

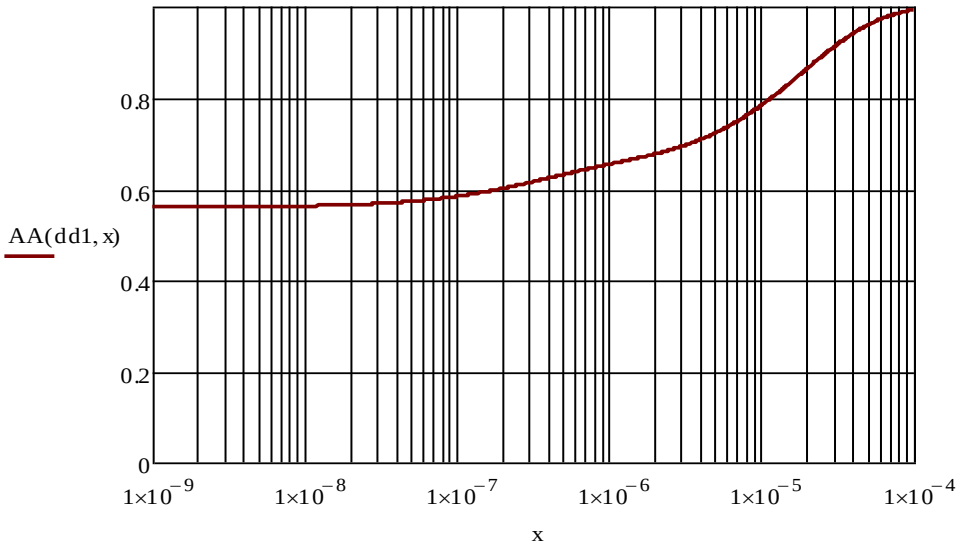

Рисунок. 3.5 – Поглинання структури при зміні товщини шару 4 (d1, d2, d3 =100нм)

Як видно з наведених розрахунків залежності поглинання для багатоперехідної структури за зміни товщини того чи іншого шару істотно

відрізняються. Криві поглинання мають досить різкі злами. Це говорить про складну залежність поглинання від геометричних параметрів. Швидке зростання поглинальної здатності свідчить про істотний вплив даного матеріалу на властивості структури. Незначна зміна поглинання говорить про надмірну товщину матеріалу.

ВИСНОВКИ

В процесі виконання атестаційної роботи магістра були розглянуті технологічні властивості, переваги та недоліки різних типів сонячних фотоперетворювачів.

Також були розглянуті методи виготовлення різних типів фотоперетворювачів, їх особливості та технологічні якості.

У роботі запропоновано використовувати аналітичні розрахунки поглинальної здатності багатошарових сонячних елементів визначення оптимальної структури фотоперетворювача. Аналітичні оцінки поглинання випромінювання різними матеріалами дозволяють вибрати товщину шарів у першому наближенні, а енергетичні характеристики, розраховані, наприклад, програмою GPVDM або SCAPS, дозволяють уточнити всі параметри структури сонячного елемента.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Jeger-Waldau A. (2012) PV Status Report 2012. Luxembourg, Publications Office of the European Union. 45.

2. Jeger-Waldau A. (2014) PV Status Report 2014. Luxembourg, Publications Office of the European Union. 50.
3. Jeger-Waldau A. (2017) PV Status Report 2017. Luxembourg, Publications Office of the European Union. 90.
4. Nozik A. J. (2002) Quantum Dot Super Solar Cells. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, 14 (1–2), 115–120.
5. Nozik A. (2007) Believes Quantum-Dot Solar Power Could Boost Output in Cheap Photovoltaics. NY, Technology Review. 49
6. Intermediate Band Photovoltaics Overview / L. Cuadra [et al.] // 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, May 11–18, 2003. PCD IPL-B2-01.
7. Жидкофазная эпитаксия и свойства наногетероструктур на основе соединений III–V / И. Е. Марончук [и др.] // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології: сб. наук. пр. 2012. Т. 10, № 1. С. 77–88.
8. Kulyutkina T. F., Maronchuk I. I., Velichko O. V. [et al.] (2011) Ultra-High-Efficiency Solar Cells. Novi Tekhnologiï = New Technologies, 3 (33), 9–16
9. Guter W., Kern R., Kostler W. et al. III-V Multijunction Solar Cells – New lattice matched products and development of upright metamorphic 3J solar cells. 7 th Int. Conf. on Concentrating Photovoltaic Systems, 2011, pp. 5–8.
10. Philipps S., Guter W., Welser E. et al. Present status in the development of III-V multijunction solar cells. In: Next Generation of Photovoltaics, Luxembourg, Springer Verlag, 2012, pp. 1–22.
11. Alferov Zh. I. (1998) The History and Future of Semiconductor Heterostructures. Semiconductors, 32 (1), 1–14.
12. Dimova-Malinovska D., Nichev H., Maronchuk I. I., Maronchuk I. E., Sanikovich D. D. (2016) Study of the Morphology of Ge Quantum Dots Grown by Liquid Phase Epitaxy. Journal of Physics: Conference Series, 700, 012043. https://doi.org/10.1088/1742-6596/700/1/ 012043.
13. Квантовые точки InSb/InAs, полученные методом жидкофазной эпитаксии / К. Д. Моисеев [и др.] // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, № 7. С. 50–57.

14. Manasevit, H.M. Single- crystal Gallium Arsenide on insulating substrates / H.M. Manasevit // App. Phys. Lett. – 1968. – V.2. – P. 156.
15. A. Sliusarenko, L. Sviderska,A. Galat Calculation Of The Absorption Capacity Of Multi-Junction Solar Photoconverters// XII International Scientific Conference "Functional Basis of Nanoelectronics" September, 2021, Kharkiv-Odesa, Ukraine. Collection of scientific works. – P.98-100.
16. Галат А.Б. Расчет поглощательной способности солнечных фотопреобразователей // 9-я Международная научная конференция «Функциональная база наноэлектроники». Сб. науч. трудов. – Харьков: ХНУРЭ, 2017. – С.103–106.
17. Galat, A.B. Calculation of the absorbing capacity of a solar CuIn1−XGaXSe2 photovoltaic converter//Telecommunications and Radio Engineering, Volume 77, Issue 1, 2018, Pages 61-67
18 http://www.astm.org/
19 В.М. Емельянов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц, В.М. Лантратов Многопереходные солнечные элементы с брэгговскими отражателями на основе структур GaInP/GaInAs/Ge //Физика и техника полупроводников, 2010, том 44, вып. 12. – С. 1649-1654.
20. Aho A, Isoaho R, Raappana M, et al. Wide spectral coverage (0.7–2.2 eV) lattice-matched multijunction solar cells based on AlGaInP, AlGaAs and GaInNAsSb materials. Prog Photovolt Res Appl. 2021;29: 869–875. https://doi.org/10.1002/pip.3412
21. Kuznicki Z.T., Multiinterfase Solar Cells I. Limits, Modeling, Desing//First Polish-Ukrainian Symposium "New Photovoltaic Materials for Solar Cells", E-MRS, Krakow (Poland). −1996. − P. 58−78.
22. K. Papatryfonos, T. Angelova, A. Brimont, B. Reid, S. Guldin, P. R. Smith, M. Tang, K. Li, A. J. Seeds, H. Liu, D. R. Selviah. Refractive indices of MBE-grown $Al_xGa_{1-x}As$ ternary alloys in the transparent wavelength region, *AIP Adv.* **11**, 025327 (2021)

23. S. Adachi. Optical dispersion relations for GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, InSb, $Al_xGa_{1-x}As$, and $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$, *J. Appl. Phys.* **66**, 6030-6040 (1989)