Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____Електронної та біомедичної інженерії_____
(повна назва)

Кафедра _____Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв_____
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

_____другий (магістерський)_____
(рівень вищої освіти)

_____Використання сучасних тонко плівкових технологій у_____
_____відновлювальній енергетиці_____.
(тема)

Виконав:
студент _2_курсу, групи ___ЕППм 18-1___
_____Кувакін А.В._____
(прізвище, ініціали)
Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма «Електронні прилади та__
пристрої»_____
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Грицунов О.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Бондаренко І.М._____
(підпис) (прізвище, ініціали)

2019 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет_____Електронної та біомедичної інженерії_____
(повна назва)

Кафедра_____Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв_____
(повна назва)

Рівень вищої освіти_____другий (магістерський)_____

Спеціальність___171 «Електроніка»_____
(код і повна назва)

Тип програми_____освітньо-професійна_____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма ___«Електронні пристрої та системи»_____
(повна назва)

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

ЗАВДАННЯ

НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові_____Кувакіну Артему Володимировичу_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи __Використання сучасних тонко плівкових технологій у відновлювальній енергетиці_____

затверджена наказом по університету від __04.__ 11._____ 2019 р. № __1635СТ___

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії ____ _грудня___ 2019 р.

3. Вихідні дані до роботи _____
_____
_____
_____
_____
_____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____
_____
_____
_____
_____
_____
_____

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел	04.11.19	Виконано
2	Дослідження		Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків характеристик		Виконано
4	Аналіз розрахунків та параметрів		Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки		Виконано
6	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів		Виконано
7	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії		Виконано
8	Підготовка та захист атестаційної роботи		Виконано

Дата видачі завдання _03__ ___листопада____2019_ р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ _____
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи бакалавра містить 57 с., 11 рис., 4 табл., 7 джерел.

АМОРФНІ, ПЛІВКИ, ВИСОКОЧАСТОТНИЙ, КРЕМНІЙ, МАГНЕТРОН, МЕТОД, ОПІР ,ОСНАСТКА. ПОГЛИНАННЯ,

Об'єкт дослідження - плівки аморфного кремнію.

Мета роботи - те, що бере плівок аморфного кремнію методом магнетронного розпилюваного, та вимірювання їх оптичних та електрофізичних параметрів.

Метод досліджень - технологічний експеримент, дослідження спектру оптичні поглинання та вимірювання темнового та світлового опору.

Проведено огляд технологій одержаний плівок аморфного кремнію та параметрів плівок, що вони забезпечують, проведено розрахунок оптимальної відстані мішень-підкладка для рівномірного нанесення плівок на підкладку. Отримані зразки плівок аморфного кремнію та проведення вимірювання оптичної прозорості зразків у спектральному діапазоні 400-900 нм. Розроблено конструкція вимірювальної оснастки для контролю фотоелектричних властивостей плівок. Проведено вимірювання темнового та світлового опору зразків плівок.

Отриманні результати свідчать про актуальність теми и можуть буди використані при створенні тонкоплівкових та гетероструктурних ФЕП.

ABSTRACT

Explanatory note of the certification work of the bachelor contains 57 p., 11 Fig., 4 table., 7 sources.

AMORPHOUS FILMS, HIGH FREQUENCY, SILICON, MAGNETRON, METHOD, RESISTANCE, TOOLING. ABSORPTION,

The object of research is amorphous silicon films.

The aim of the work is to take amorphous silicon films by magnetron sputtering, and measure their optical and electrophysical parameters.

The method of research is a technological experiment, the study of the optical absorption spectrum and the measurement of dark and light resistance.

A review of the technology of the films of amorphous silicon and parameters of the films that they provide the calculation of the optimal distance target-substrate for uniform film deposition on the substrate. Obtained samples of amorphous silicon films and measurement of optical transparency of samples in the spectral range 400-900 nm. The design of measuring equipment for control of photovoltaic properties of films is developed. The dark and light resistance of the film samples was measured.

The results obtained testify to the relevance of the topic and can be used in the creation of thin-film and heterostructured FEP.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .6
ВСТУП.....7
1 ОСОБЛИВОСТІ ПЛІВОК НА ОСНОВІ АМОРФНОГО КРЕМНІЮ.....8
1.1 Переваги аморфних модулів.....9
1.2 Недоліки аморфних модулів.....11
1.3 Область застосування аморфних модулів.....12
2 ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ АМОРФНИХ ГІДРОГЕНІЗОВАНИХ КРЕМНІЮ 13
2.1 Синтез a-Si: H методом тліючого розряду.....13
2.2 Метод розпилення.....15
2.3 Хімічне осадження з газової фази.....20
3.1 Технологія отримання зразків плівок a-Si: H.....22
3.2 Розрахунок оптимального відстані мішень - підкладка для заданої неоднорідності розподілу по товщині.....26
4 ВИМІР ОПТИЧНИХ І ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЛІВОК.....35
4.1 Методика вимірювання спектрів поглинання напівпровідникових зразків тонких плівок 35
4.2 Вимірювання параметрів зразків.....44
4.3 Виробнича санітарія в лабораторії.....48
4.4 Пожежна профілактика лабораторії.....48
ВИСНОВКИ 50
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 51
ДОДАТОК А 52
ДОДАТОК Б.....53
ДОДАТОК В.....54
ДОДАТОК Г.....55

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ВН - високовакуумний насос

ВЧ - високочастотний

ГВЧ - генератор високої частоти

ДД - датчик тиску

ЕОМ - електронно-обчислювальна машина

ІК - інфрачервоний

ККД - коефіцієнт корисної дії

МДН - метал - діелектрик - напівпровідник

МН - механічний насос

МОП - метал-оксид-напівпровідник

П - пастка

РВГ - регулятор витрати газів

ТР - тліючий розряд

ТСО - transparent conductive oxide

УФ - ультрафіолет

ФЕП - фотоелектричний перетворювач

ХОГФ - хімічне осадження з газової форми

ВСТУП

Тонкоплівкові технології часто розглядають як майбутнє фотоелектричної енергетики, незважаючи на те, що в даний час близько 83% усіх вироблених у світі сонячних модулів - на основі полі-і монокристалічних матеріалів. Проте, технології тонкоплівкових модулів розвиваються дуже швидко, причому в декількох напрямках. Історично першою технологією тонкоплівкових модулів, яка отримала комерційне поширення, були ФЕП на основі плівок аморфного кремнію. Перше покоління з однoперехідному сонячними елементами мало малий термін служби (до 10 років) і ККД 4-6%. Друге покоління, яке зараз найбільш поширене, також має однoперехідні елементи, але їх термін служби вже практично зрівнявся з терміном служби кристалічних елементів, а ККД становить 8-11%. До третього покоління можна віднести найбільш ефективні багатоперехідних тонкоплівкові елементи, які дозволяють досягти ще більшого ККД (до 14%) при тривалому терміні служби. Також виробляються гібридні аморфно-кристалічні модулі, що поєднують переваги як аморфних, так і кристалічних модулів. Однак вони дорожче, ніж модулі другого покоління.

1 ОСОБЛИВОСТІ ПЛІВОК НА ОСНОВІ АМОРФНОГО КРЕМНІЮ

Необхідно звернути увагу на одноперехідні модулі з аморфного кремнію другого покоління, які в загальному випадку дешевше, ніж кристалічні тієї ж потужності, оскільки при виробництві тонкоплівкових модулів витрачається приблизно в 10 разів менше кремнію, ніж для кристалічного.

Найбільш широкою сферою застосування гидрогенизированного аморфного кремнію є фотоелектричні перетворювачі сонячної енергії, так звані сонячні батареї. Це обумовлено, з одного боку, тим, що максимальна фоточутливість такого матеріалу добре узгоджується по спектру з максимумом інтенсивності сонячного випромінювання, а з іншого боку, тим, що вартість гидрогенизированного аморфного кремнію істотно нижче, ніж монокристалічних напівпровідників. В якості робочої області сонячних елементів використовується контакт аморфний кремній - метал (найчастіше платина). Альтернативний варіант - це контакт областей аморфного кремнію з різним типом провідності. Для отримання більшої ефективності елементи з'єднують в батареї шляхом створення інтегральних планарних або багатошарових конструкцій.

В даний час ККД фотоелектричних перетворювачів на аморфному кремнії досягає в експериментальних зразках 15%, а в структурах великої площі -10%, що хоча і нижче досягаються в монокристалічних елементах 22%, але компенсується дешевиною продукції. Крім сонячних батарей на основі аморфного гидрогенизированного кремнію створені тонкоплівкові польові МДП - транзистори з великим ставленням струмів у відкритому і закритому станах.

1.1 Переваги аморфних модулів

Фотоелектричні модулі з аморфного кремнію мають ряд переваг в порівнянні з моно- і полікристалічний панелями, а саме:

− краща робота при підвищенні температури. Фотоелектричні модулі з тонкої плівки аморфного кремнію протягом теплого періоду року виробляють більше електричної енергії, в той час як кристалічні модулі в міру підвищення температури знижують свою ефективність. Тонкоплівкові сонячні модулі менше схильні до зниження потужності при нагріванні, при якому кристалічні модулі втрачають 15-20% потужності;

− велике вироблення при низькій освітленості і при розсіяному світлі. Модулі з аморфного кремнію можуть працювати при освітленості, при якій кристалічні модулі вже припиняють генерацію енергії, тому при слабкому і розсіяному сонячному світлі робота фотоелектричних модулів з аморфного кремнію набагато краще, ніж моно- і полікристалічних кремнієвих панелей. У похмуру і дощову погоду тонкоплівкові сонячні батареї генерують на 10-20% більше енергії, ніж кристалічні панелі;

− можливість архітектурної інтеграції в будівлю (заміна вікон, скління стін, і т.п.);

− меньша вартість за ват потужності. Виробничі витрати за цією технологією значно знизилися, і, завдяки інвестиціям і наукових досліджень, вони продовжать падати;

− меньша ймовірність виробничих дефектів. Оскільки процес виробництва аморфних модулів більш простий, то в продукції значно менше дефектів. При виробництві кристалічних сонячних модулів використовується пайка для електричного з'єднання сонячних елементів між собою. Це було і залишається слабким місцем, де традиційні модулі відчувають багато проблем. Зовсім по-іншому йде справа з тонкоплівковими сонячними модулями - модуль формується відразу практично будь-яких розмірів, пайка окремих сонячних елементів не потрібна;

– менша втрата потужності при частковому затіненні. Кристалічні кремнієві модулі втрачають 25% і більше відсотків своєї продуктивності при навіть незначному затіненні або бруду на модулях. Тонкоплівкові модулі зменшують вироблення зовсім незначно, що в результаті призводить до реально кращої продуктивності протягом всього терміну служби модулів, видно на рисунку 1.1 (примітка - падіння вироблення тонкоплівкових модулів залежить від того, як затінюється модуль - по довжині або ширині рисункок 1.2).

Рисунок 1.1 - Залежність величини вироблюваної потужності різних типів фотоелектричних модулів від інтенсивності світла[www.draw.io]

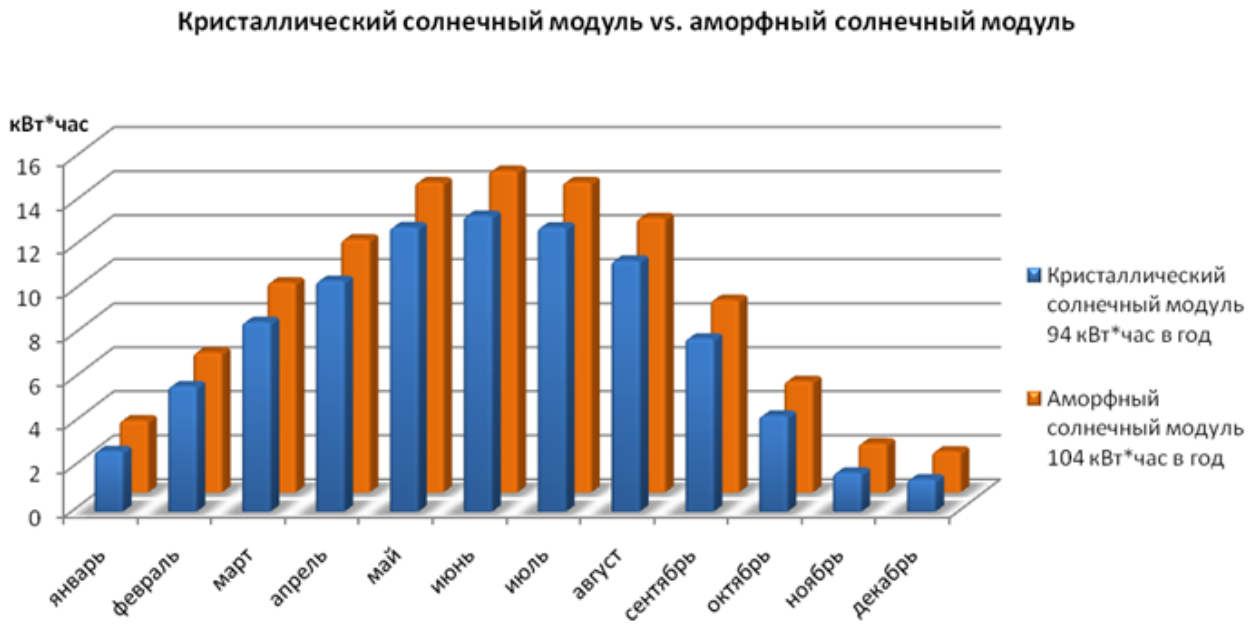


Рисунок 1.2 - Порівняння вироблення енергії аморфних і кристалічних модулів[www.draw.io]

1.2 Недоліки аморфних модулів

Недолік у аморфних модулів один, але часто він перекриває їх гідності - приблизно в 2 менший ККД у порівнянні з полікристалічний модулями. Однак, це правильно для стандартних умов вимірювання - яскравий і пряме сонячне світло і при температурі модуля 25 ° С. У реальних умовах ця різниця в ККД хоч ненабагато, але зменшується.

В якості підкладки для аморфних модулів можна використовувати як скло, так і гнучкі прозорі матеріали. Є модулі на гнучкій основі, які використовуються в якості гнучкої черепиці, є модулі, які можна скачувати в рулони для транспортування, є інтегровані в різні побутові предмети - одяг, сумки, головні убори і т.п. Однак в більшості випадків використовуються модулі на склі, причому для захисту задньої сторони модулів також застосовують скло. Це веде до другого істотного недоліку аморфних модулів - більшій вазі за рахунок застосування подвійного скла (як відомо, у кристалічних модулів з заднього боку зазвичай використовується захисна плівка).

1.3 Область застосування аморфних модулів

Аморфні модулі рекомендується застосовувати в наступних випадках:

- в регіонах з традиційно хмарної погодою (розсіяний або відбите світло);
- в жаркому кліматі, коли модулі зазвичай нагріваються більше 50-60 градусів;
- якщо немає обмежень по площі і максимального вазі сонячної батареї;
- якщо потрібно інтегрувати фотоелектричні модулі в будівлю - аморфні модулі практично неможливо відрізнити від тонованого скла. На відміну від традиційних кристалічних, тонкоплівкові модулі можуть бути використані для різних дизайнерських і конструкторських рішень. На додаток до традиційної установці на даху, міцні, стильні і витончені фотоелектричні модулі з аморфного кремнію широко застосовуються для обробки фасадів будівель як окремі елементи, архітектурні композиції і рішення, що до останнього часу вважалося неможливим;
- якщо потрібна часткова прозорість модулів - аморфні модулі можна робити з прозорістю від 5 до 20% (з відповідним зменшенням вироблюваної потужності).

Сучасні аморфні модулі мають таку ж деградацію, як і кристалічні модулі. Виробник дає гарантію на те, що потужність модулів знизиться не більше 10% від номінальної за 10 років експлуатації, і не більше 20% - за 25 років експлуатації. Це відповідає деградації і гарантіям на модулі з кристалічного кремнію.

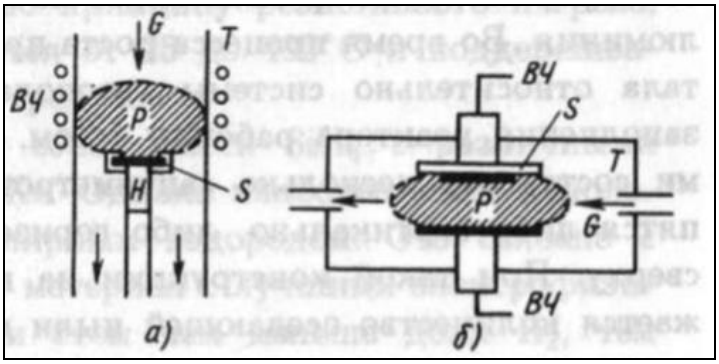
2 ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ АМОРФНИХ ГІДРОГЕНІЗОВАНИХ КРЕМНІЮ

На відміну від монокристалічних напівпровідників, у яких різні технології їх синтезу забезпечують отримання порівнянних параметрів, у аморфних напівпровідників, зокрема у a-Si: H, спостерігається пряма залежність між структурними, електрофізичними і термодинамічними параметрами і способом отримання. У зв'язку з цим для різних практичних додатків матеріалу знаходять поширення різні технології синтезу a-Si: H. В даний час найбільшого поширення набули наступні: метод тліючого розряду сіланосодержащіх сумішей (ТР); розпорошення; хімічне осадження з газової форми (ХОГФ); методи, що реалізують селективну дію на плазму, а також комбіновані методи.

2.1 Синтез a-Si: H методом тліючого розряду

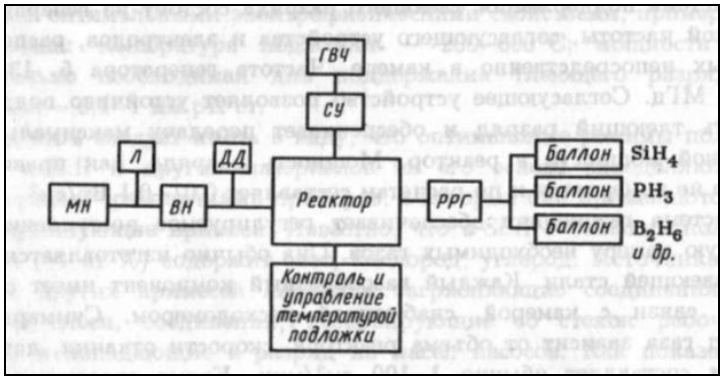
Метод тліючого розряду використовується в більшості промислових установок. На матеріалі, отриманому цим способом, виконано більшість робіт експериментального характеру. Це обумовлено наступними причинами: метод забезпечує отримання шарів a-Si: H з прийнятними для практичного застосування властивостями при досить високих швидкостях росту; метод має конструктивні можливості для створення на його основі установок для широкомасштабного промислового отримання приладів на основі a-Si: H; забезпечує можливість найбільш простого в технічному відношенні легування a-Si: H. Суть методу ТР полягає в розкладанні сіланосодержащіх сумішей в плазмі тліючого розряду до утворення активних компонент з подальшим їх осадженням на поверхні зростання. Установки, що реалізують метод ТР,2.1, а, б). У переважній більшості випадків використовуються установки з ємнісний зв'язком меньше 5 (рис. Рис.2.1, а,б). Вони мають очевидну перевагу над індуктивної системою, яке полягає в можливості збільшення розмірів електродів і отримання однорідних зразків великої площі. Загальна конструкція

установки методу ТР показана на рис.2.2. Основні складові її елементи: реактор, вакуумна система, система підтримки ВЧ-розряду, система подачі газу, система управління температурою підкладки.



а- індуктивний зв'язок; б - місткість; Р - плазма, Т - реактор, S - підкладка, Н - нагрівач, G - газ

Рисунок 2.1 - Схеми отримання a-Si: H методом ТР;



ДД -датчик тиску; *ВН*- високовакуумний насос; Л-пастка,

МН - механічний насос; *СУ* - пристрій, що погодить;

ГВЧ - генератор високої частоти; *РРГ* - регулятор витрати газів

Рисунок 2.2 - Структурна схема установкідля отримання a-Si: H методом ТР;

2.2 Метод розпилення

Розпилення - це процес, в якому перенесення речовини здійснюється за рахунок бомбардування мішені іонами газу з високою енергією. Для повідомлення високої енергії іонів вони прискорюються електричним полем. При ударі іона об поверхню мішені відбувається серія міжатомних зіткнень, що призводять до викиду одного з атомів. Для отримання плівок a-Si: H використовуються в якості плазми суміші аргону і водню. Останній виконує в даному випадку ту ж роль, що в методі тліючого розряду, - терминацию обірваних і слабких зв'язків кремнію. Головна перевага методу розпилення в порівнянні з методом тліючого розряду - це відсутність токсичних і вибухонебезпечних речовин: силана, фосфіну, диборана і т.д. Однак цей метод не дозволяє отримувати матеріал з необхідної для приладового застосування чистотою, так як робочий газ аргон впроваджується в плівку в значних кількостях (до 5 атм). Метод має кілька модифікацій, що відрізняються способом розпилення: на постійному струмі, високочастотне магнетрона і зі зміщенням на підкладці.

Структура і властивості одержуваних плівок залежать від ряду технологічних параметрів, серед яких найбільш важливими є: температура підкладки, тиск газової суміші, потужність розряду, зміщення на підкладці. Встановлено, що плівки з задовільними електрофізичними властивостями отримують при тиску приблизно 0,05 Па, температура підкладки приблизно 250 ° С. Оптимізація параметрів ускладнюється через складності контролю процесів, що визначають зростання шарів a-Si: H. Ці труднощі цілком аналогічні тим, що характерні для методу тліючого розряду.

Високочастотний розпорошення плівок в планарном магнетроні є добре відпрацьованою технологією для напилення, яка має переваги при нанесенні плівок аморфного кремнію (a-Si: H). Присутність магнітного поля на мішені ефективно локалізує вторинні електрони, що випускаються мішенню, запобігаючи таким чином бомбардування ними підкладки, на якій знаходиться

плівка. Було встановлено, що, так як бомбардування іонами сильно впливає на властивості аморфного кремнію (a-Si: H), магнетронного напилення становить значний інтерес, особливо для багатоперехідних електронних пристроїв, таких як кремнієві МОП-транзистори, так як можна уникнути радіаційних ушкоджень напилених шарів зарядженими частинками, під час напилення наступних шарів, рисунок 2.3.

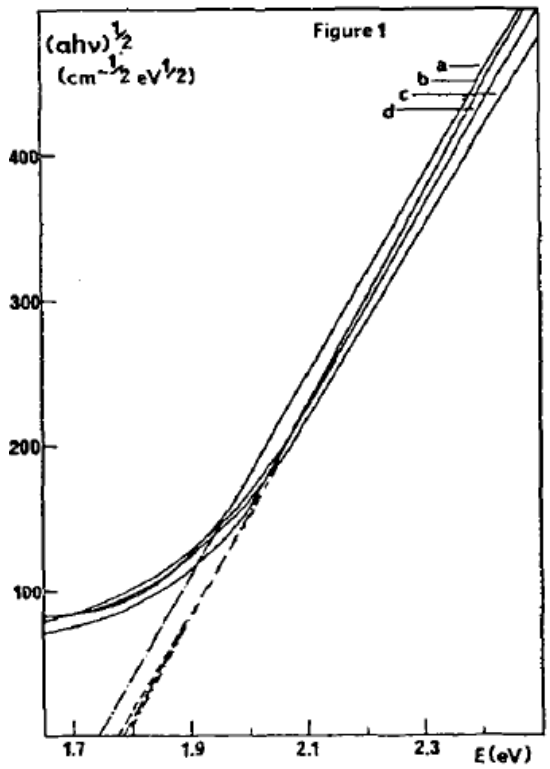


Рисунок 2.3- Оптична поглинання для різних парціальних тисків водню PH = (a) 2; (b) 4; (C) 6; (D) $8 \cdot 10^{-4}$ тор

Як видно з рис. 2.4, плівки a-Si: H, виготовлені магнетронним розпиленням при парціальному тиску PH = $6 \cdot 10^{-4}$, тож мають гарну фотопроводимостью.

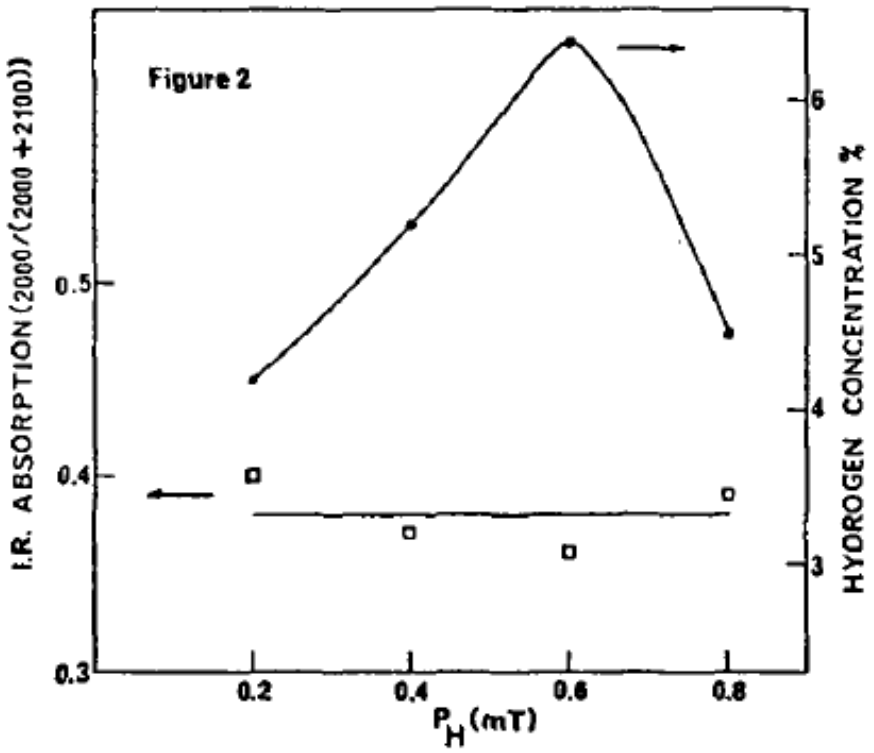


Рисунок 2.4- Частка однозв'язного водню і водородадля різних парціальних тисків водорода PH = (a) 2; (b) 4; (C) 6; (D) $8 \cdot 10^{-4}$

Останнім часом були отримані хороші результати в отриманні плівок a-Si: H високочастотним доданими розпиленням в якості альтернативи розкладання силану в плазмі тліючого розряду.

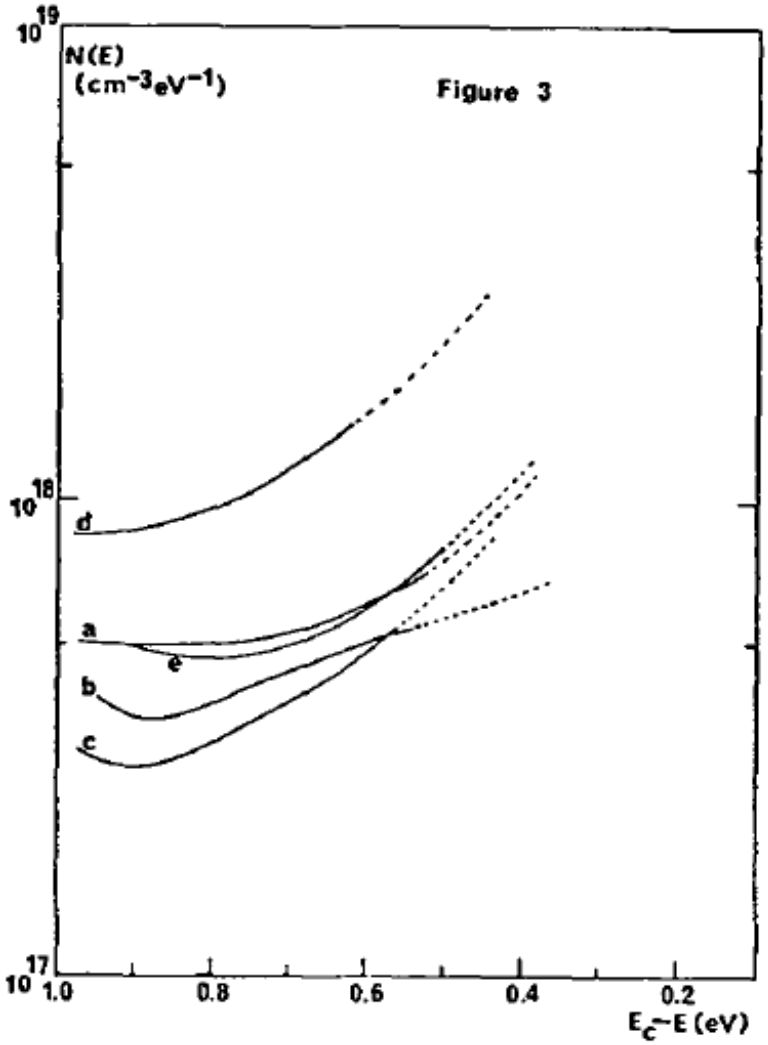


Рисунок 2.5- Щільність станів на хвостах зон провідності

Високочастотний розпорошення дозволяє масштабувати процес по площі, чим більше площа, тим більш рівномірно напилюється плівка. У лабораторіях Nordico були виготовлені окремі плівки площею понад 300см^2; з товщиною плівки порядку 1 мкм і з прямим контролем вмісту водню в a-Si, це дозволяє адаптувати властивості, такі як спектр поглинання, до конкретних вимог. У конвеєрній системі з декількома розпорошуються мішенями: метал, ізолятор і плівки a-Si можуть наноситися послідовно, без порушення вакууму структури багатошарових пристроїв. Низька напруга розпилення, що характеризує цей процес, зменшує кількість багатозарядних розпорошених частинок, що зменшує нагрів підкладки. Таким чином, низька енергія частинок і утримання плазми в області мішені плюс висока швидкість осадження

дозволяють зменшити кількість дефектів для шарів, чутливих до бомбардування. Крім того, змінюючи постійну напругу зміщення на підкладці можливо регулювати електрофізичні властивості одержуваних плівок.

Плівки a-Si: H були виготовлені (розроблені) в Nordico за допомогою високочастотної розпилювальної установки (системи), що має камеру з нержавіючої сталі, діаметром 0,5 м, в якій знаходилися два електроди: подложкодержатель, діаметром 20 і 15-ти сантиметрова мішень магнетрона . Максимальна поперечна складова магнітного поля на поверхні мішені склало 100G (0,01T), а відстань від мішені до підкладки 7см. Система попередньо откачивалась Турбомолекулярний насосом до тиску не менше, ніж на 10^{-6} тор. Температура підкладки становила 240ºС, а загальний робочий тиск газової суміші аргону і водню - $5 \cdot 10^{-3}$ тор. Парціальний тиск водню (PH) варіював від $2 \cdot 10^{-4}$ до $8 \cdot 10^{-4}$ тор для визначення оптимального значення PH ($6 \cdot 10^{-4}$ тор) для високочастотного діодного розпилення, яке виявилося таким же, як і для високочастотного магнетронного розпилення. Плівки аморфного кремнію товщиною приблизно 1 мкм, наносилися на підкладки зі скла (Corning 7059), кристалічного кремнію і кварцові підкладки, розмірами $2{,}5 \cdot 2{,}5$ см.

2.3 Хімічне осадження з газової фази

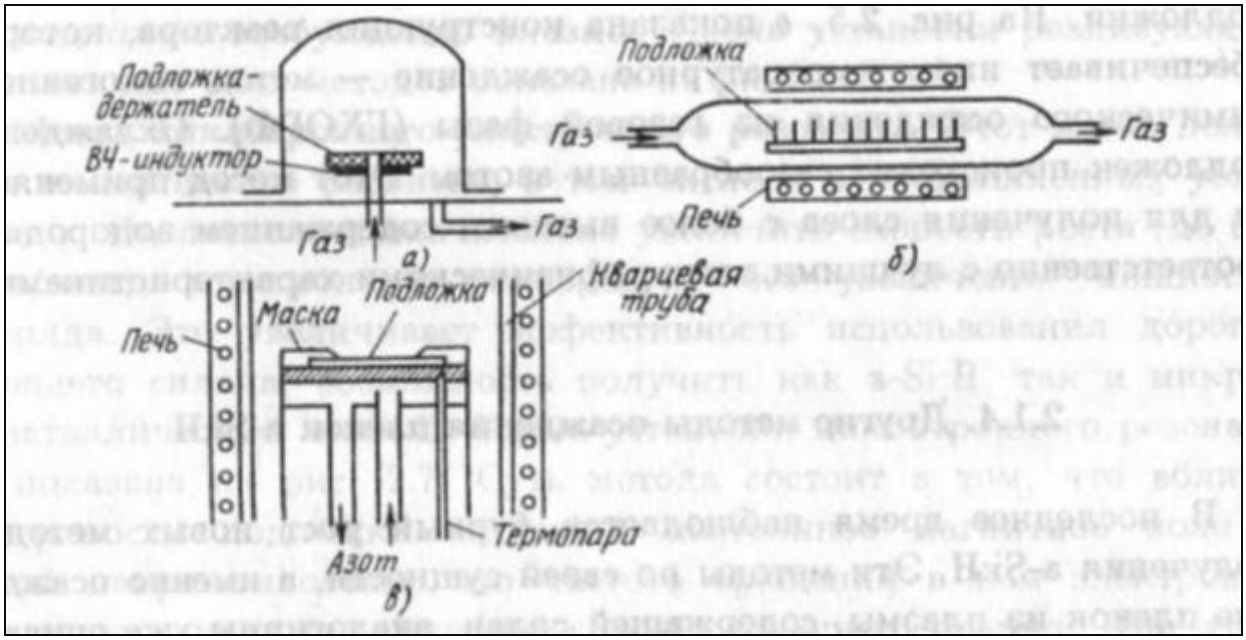
Різниця хімічного осадження з газової фази (ХОГФ) і епітаксії кристалічного кремнію при розкладанні силана полягає в температурі підкладки, яка при епітаксії становить 1100 - 1200° С, а при отриманні a-Si: H нижче 600° С. Плівки a-Si: H, отримані цим методом, термічно стабільні і є хорошим об'єктом для вивчення "власних" властивостей. З іншого боку, цей метод представляє інтерес і для впливу плазми і водню на структуру та електрофізичні властивості a-Si: H.

Найбільш важливими технологічними параметрами процесу ХОГФ є температура газу і підкладки, парціальний тиск газу. Вважається, що основним компонентом, що формує шар a-Si: H, є група SiH2, яка утворюється при термічному розкладанні силана в реакції:

$$SiH4 + T\,° = SiH2 + H2. \qquad (2.1)$$

В даний час для отримання аморфних шарів кремнію використовуються три типи конструкцій реакторів, показаних на рис. 2.6,*а*, б, в. На рис. 2.6,а приведена спрощена конструкція реактора з "холодними" стінками, який працює при атмосферному тиску. Нагрівання підкладок здійснюється високочастотним індуктором. В якості корпусу використовується скляний ковпак. Реактор з "гарячими" стінками показаний на рис. 2.6,б .Він використовується при низькому тиску і являє собою кварцову трубу, з торцевої частини якої відбувається подача газової суміші, а з іншого боку відкачування. Нагрівач розташовується навколо труби, що дозволяє задавати в робочій області реактора, де розташовуються підкладки, необхідну температуру. В цьому випадку осадження продуктів реакції відбувається не тільки на підкладках, а й на стінках кварцової труби. Осадження шарів при зниженому тиску збільшує швидкість дифузії газу між підкладками, що забезпечує більш однорідне осадження шарів по площі підкладки. На рис. 2.6,в показана конструкція реактора, яка забезпечує низькотемпературне осадження - метод гомогенного

хімічного осадження з газової фази (ГХОГФ). Охолодження підкладок відбувається газоподібним азотом. Цей метод застосовується для отримання шарів з більш високим вмістом водню і відповідно з кращими електрофізичними характеристиками.



а - реактор з "холодними" стінками, б - реактор з "гарячими" стінками, в - реактор для гомогенного хімічного осадження

Рисунок 2.6 - Спрощені конструкції реакторів для ХОГФ;

3 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗРАЗКІВ ПЛІВОК a-SI: H

3.1 Технологія отримання зразків плівок a-Si: H

Для вимірювання оптичних параметрів плівки наносилися на чисті скляні підкладки розміром 1.5X1.0 см. Для вимірювання електрофізичних параметрів одержуваних плівок a-Si: H були використані скляні підкладки, з попередньо нанесеними на їх поверхні плівками ТСО (рис. 3.1). Схема технологічного процесу отримання зразків буде розглянута далі по кроках.

Рисунок 3.1 - скляні підкладки, з попередньо нанесенниміна їх поверхні плівками ТСО

Крок 1: нанесення маски-трафарету на шар ТСО показано на рисунку 3.2.

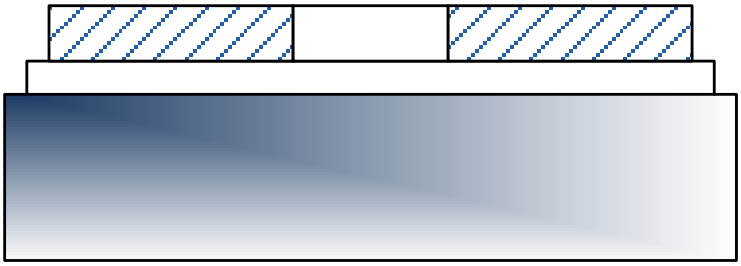


Рисунок 3.2 – Крок 1

Крок 2: нанесення плівки a-Si: H через маску-трафарет на поверхню шару ТСО (рис. 3.3).

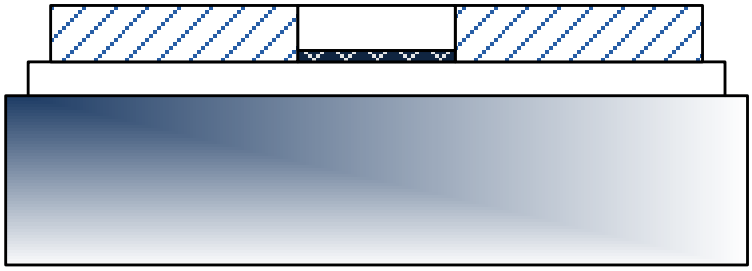


Рисунок 3.3 - Крок 2

Крок 3: нанесення контактного шару молібдену на шар a-Si: H (рис. 3.4).

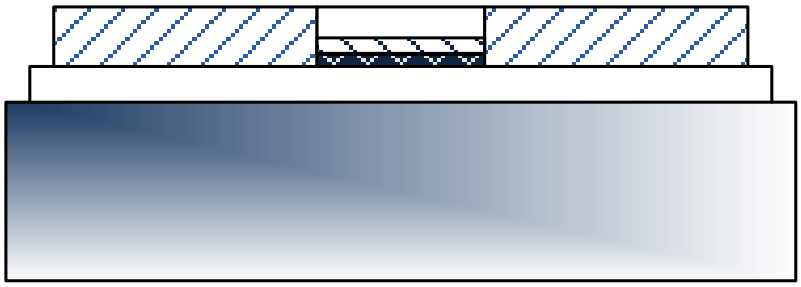


Рисунок 3.4 – Крок 3

Крок 4: зняття маски-трафарету і отримання фінальної плівки (рис. 3.5).

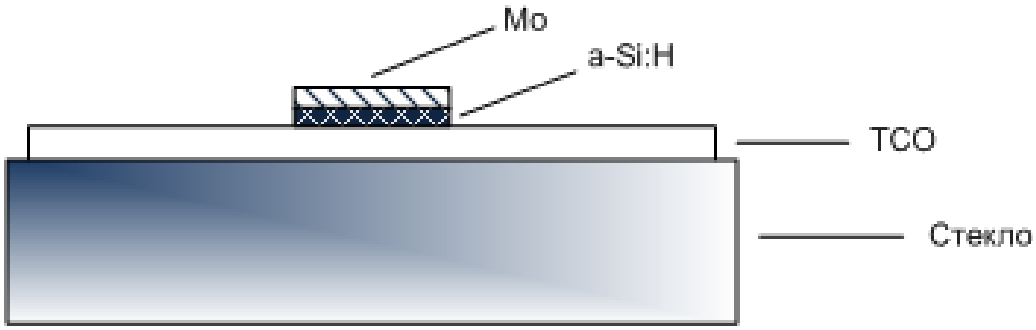


Рисунок 3.5 – Крок 4

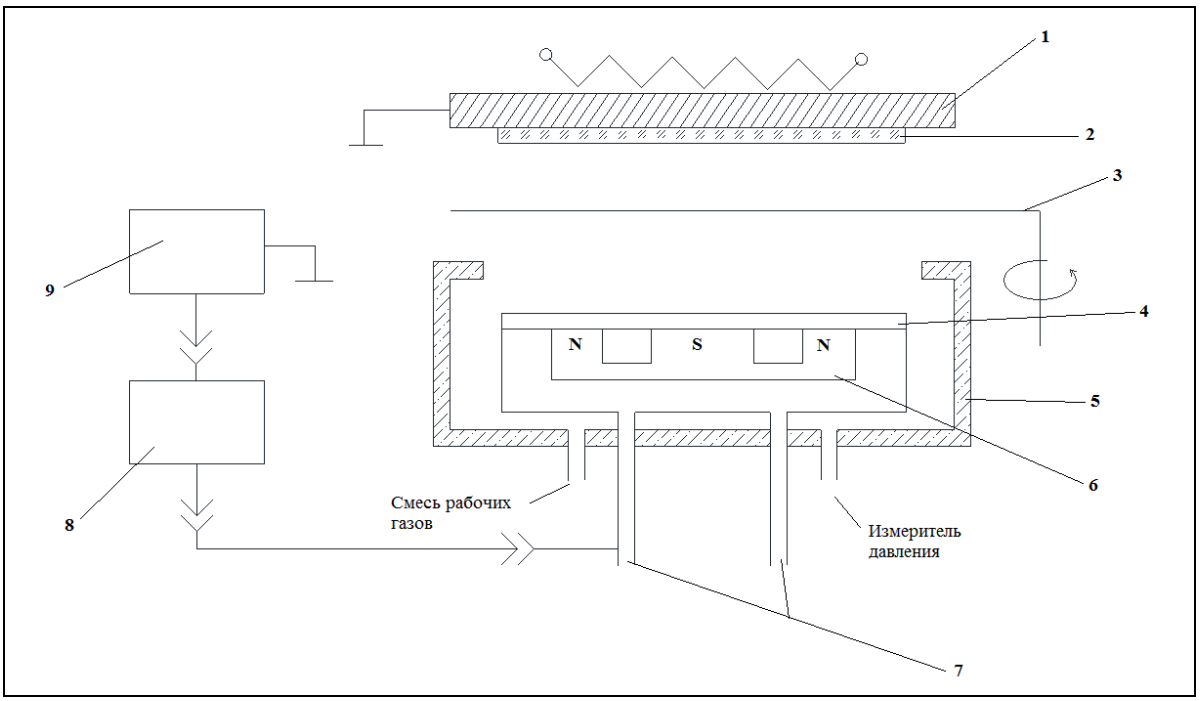
Плівки a-Si: H через маску-трафарет наносилися на поверхню плівки TCO. Без розгерметизації вакуумної камери установки ВУП-5М, не знімаючи маски, подложкотримач разом з підкладкою переміщався на іншу позицію з

магнетроном для нанесення контактного шару молібдену. Нанесення плівок проводилося в розпилювальнії камері при потужності ВЧ - розряду від 75 до 100 Вт. Магнетрон забезпечував зону ерозії на мішені з кремнію внутрішнім і зовнішнім діаметром 20 і 26 мм відповідно і таким чином щільність розпилювальної потужності склала 9,25 і 12,03 Вт / см^2. Процес розпилення проводився при робочому тиску $4 \cdot 10^{-1}$ Па, при цьому концентрація водню в робочій суміші аргон: водень склала 15%. Дані по оптимальної концентрації водню в робочій суміші взяті з огляду. Температура підкладки при нанесенні плівок a-Si: H становила 150ºС.

В якості базової була використана вакуумна установка ВУП-5М, що має три магнетронних позиції, кожна з яких дозволяє наносити на підкладку один матеріал. Важливою вимогою до конструкції є чистота процесу нанесення кожного шару, тобто неприпустимість забруднення розпиляним матеріалом сусідніх технологічних позицій.

Для вирішення поставленого завдання отримання плівок a-Si: H, грунтуючись на результатах проведеного аналізу, була обрана технологія ВЧ - магнетронного розпилення кремнієвої мішені в робочій суміші газів аргон + водень, яка дозволяє розпорошувати високоомні кремнієві мішені і отримувати плівки хорошої якості з високими швидкостями і відтворюється товщиною.

З урахуванням всіх вимог був розроблений макет розпилювальної камери, ескіз якої наведено на рис. 3.6



1 - підкладкокотримач; 2 - підкладка; 3 - заслонка; 4 - кремнієва мішень; 5 - розпилювальна камера; 6 - магнетрон; 7 - трубки водяного охолодження; 8 - пристрій, що погодить; 9 - ВЧ генератор типу УВ-1,5

Рисунок 3.6 - Схема технологічного експерименту

При наявності декількох камер в підколпачном обсязі, така конструкція дозволяє проводити розпилювання різних матеріалів в загальній камері, не забруднюючи інших мішеней.

Таке технологічне оснащення дозволяє:

– проводити напилення в єдиному технологічному циклі, який скорочує час виготовлення зразків;

– робить процес «чистим», не забруднюючи подколпачную оснащення сторонніми матеріалами;

–скорочує час на підготовку до напиленню чергового шару;

– економить робочий газ.

При товщині розпилюється мішені 2 мм і діаметрі 40 мм зовнішній і внутрішній діаметр зони ерозії рівні, відповідно, 20 і 26 мм.

Для відпрацювання технології його нанесення макет розпилювальної камери був розміщений всередині вакуумної камери автоматизованої установки типу ВУП-5М.

Для захисту камери установки від забруднення матеріалом мішені на аноді-екрані магнетрона монтувалася конструкція субкамери діаметром 100 мм з прозорою бічною скляною стінкою у вигляді циліндра, яка дозволяла спостерігати процес розпилення. Субкамера зверху перекривалася заземленою металевою діафрагмою з отвором діаметром 50 мм, яка лімітувала зону занапиленія подложкодержателя. Для підвищення достовірності вимірювань контроль тиску проводився безпосередньо в субкамере за допомогою приєднаної до неї манометричної лампи типу ПМТ-2.

Безпосередньо в субкамеру через кільцевої розподільник подавалася робоча газова суміш. Скляні підкладки розміщувалися на штатному подложкодержателе - термостаті установки, яка дає можливість стабілізувати температуру підкладок до 300° С. Субкамера відокремлена від подложкодержателя рухомий заслінкою. Перед нанесенням покриття подложкодержатель переміщався на сусідню позицію для очищення підкладки в плазмі тліючого розряду штатної секцією установки.

3.2 Розрахунок оптимального відстані мішень - підкладка для заданої неоднорідності розподілу по товщині

Одним з найбільш ефективних методів нанесення плівок в планарной технології є метод магнетронного розпилення матеріалів. Висока швидкість розпилення матеріалу в магнетронній системі розпилення визначається високою щільністю іонного струму на мішень. Висока щільність іонного струму досягається за рахунок локалізації плазми у поверхні мішені за допомогою сильного поперечного магнітного поля.

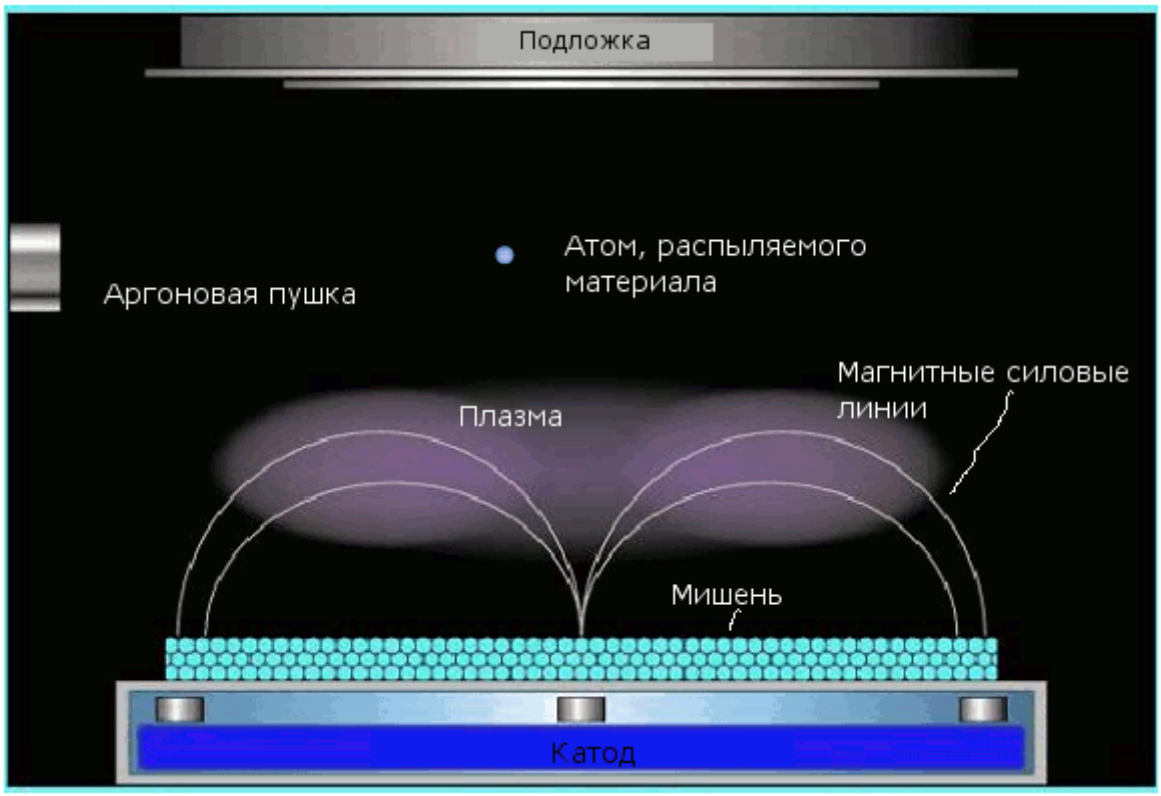


Рисунок 3.7 - Схема магнетронній системи розпилення

Схема магнетроннії системи розпилення показана на рисунку 3.7. Основними елементами системи є мішень і магнітна система. Магнітні силові лінії замкнуті між полюсами магнітної системи. Між мішенню і подложкодержателем прикладається електричне поле і збуджується аномальний тліючий розряд. Замкнутий магнітне поле біля поверхні мішені локалізує розряд поблизу цієї поверхні. Позитивні іони з плазми аномального тліючого розряду прискорюються електричним полем і бомбардують мішень (катод). Під дією іонного бомбардування відбувається розпорошення мішені. Електрони, емітовані з катода, під дією іонного бомбардування потрапляють в область схрещених електричного і магнітного полів, і виявляються в пастці. Траєкторії руху електронів в пастці близькі до циклоїдним. Ефективність іонізації і щільність плазми в цій області значно збільшується. Це призводить до підвищення концентрації іонів біля поверхні мішені, збільшення інтенсивності іонного бомбардування мішені і до значного зростання швидкості розпилення мішені.

При побудові моделі швидкості осадження плівки шляхом розпилення матеріалу з кільцевого випарника зробимо такі припущення:

- розпорошені атоми розподіляються в просторі за законом косинуса;
- розпорошені атоми зіштовхуються один з одним і з атомами робочого газу;
- розпорошені атоми осідають в точці зіткнення з підкладкою.

У загальному випадку товщина плівки в довільній точці підкладки описується виразом:

$$h = \frac{V}{\pi r^2} \cos\varphi \cos\phi \cdot t \quad , \qquad (3.1)$$

де V - швидкість розпилення по товщині;

ϕ - кут між нормаллю до поверхні розпилення і напрямком розпилення;

φ - кут між нормаллю до поверхні підкладки і напрямком осадження;

r - відстань від елемента розпилення до точки осадження;

t - час розпилення.

Модель процесу напилення будемо будувати для випадку, показаного на рис. 3.7, коли мішень і підкладка паралельні і соосни. У цьому випадку кут розпилення дорівнює куту конденсації, тобто $\phi=\varphi$. Розглянемо геометричну схему моделі мета - підкладка, яка представлена на рис. 3.8.

Розподіл розпорошеного матеріалу по підкладці є центрально-симетричним, і описуватися однієї змінної - відстанню від центру l. Нескінченно тонкий кільцевої елемент поверхні мішені можна представити у вигляді dS = R·dα·dR, де α - кут між l і проекцією R на площину підкладки X'Y '.

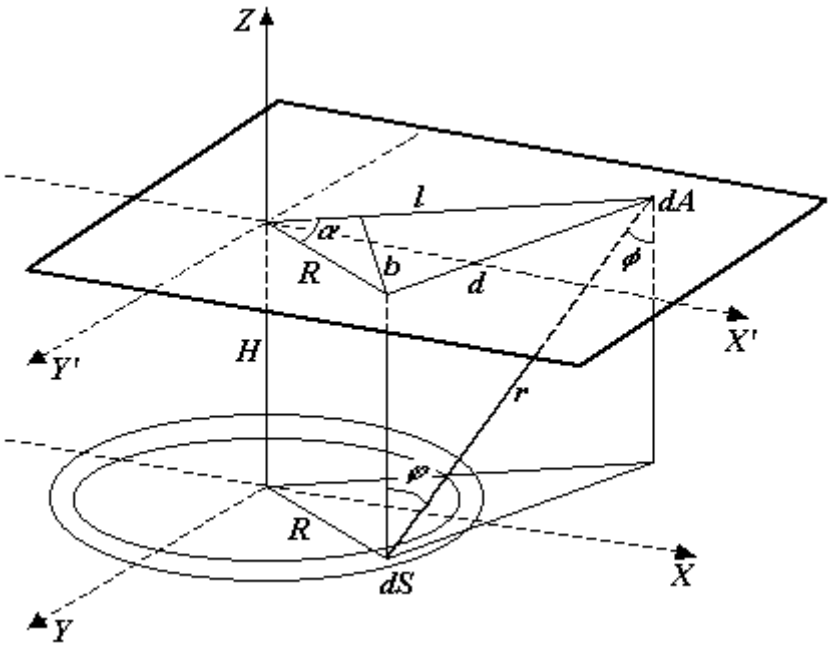


Рисунок 3.8 - Геометрична схема моделі мішень-підкладка

кут α можна виразити через радіус кільця і відстань між мішенню і підкладкою - cosϕ= H / r. Підставляючи ці співвідношення в рівняння (2.1) і підсумовуючи диференціальні елементи кільця мішені шляхом інтегрування, отримаємо:

$$h = \int_t \int_R \int_\alpha \frac{V}{\pi r^2} \frac{H^2}{r^2} R d\alpha dR dt \quad . \qquad (3.2)$$

Висловимо відстань r через елементи призми l, R, d, H, α:

$$r = \sqrt{H^2 + l^2 + R^2 - 2lR\cos\alpha}\,, \qquad (3.3)$$

де l2 + R2-2lRcosα= $d2$. Підставимо вираз (3.3) в рівняння (3.2):

$$h = \int_t \int_R \int_\alpha \frac{V}{\pi} \frac{H^2 R}{(H^2 + l^2 + R^2 - 2lR\cos\alpha)^2} d\alpha dR dt \quad . \qquad (3.4)$$

Проинтегрировав цей вислів по часу отримаємо повне кількість розпорошеного речовини. У нашому випадку вважаємо, що швидкість розпилення постійна в часі і не залежить від радіуса кільця розпилення, тоді:

$$h = \frac{Vt}{\pi} \int_R \int_\alpha \frac{H^2 R}{(H^2 + l^2 + R^2 - 2lR\cos\alpha)^2} dRd\alpha \quad . \qquad (3.5)$$

Для інтегрування виразу (3.5) по куту робимо заміну b = H2 + l2 + R2, *c = -2lR*, Отримуємо:

$$h = \frac{Vt}{\pi} \int_R \int_\alpha \frac{H^2 R}{(b + c \cdot \cos\alpha)^2} dRd\alpha \quad . \qquad (3.6)$$

Інтегрування проводимо від 0 до 2, Робимо зворотну підстановку, отримуємо:

$$h = 2Vt \int_R \frac{H^2 R}{[(H^2 + R^2 - l^2)^2 + (2lR)^2]^{3/2}} dR \quad . \qquad (3.7)$$

Можна провести подальше інтегрування, але результат буде дуже громіздким. Тому при розрахунку будемо використовувати чисельне інтегрування виразу (3.7).

Кількісною характеристикою процесу іонного розпилення матеріалів є швидкість розпилення, яка визначається як:

$$V = \frac{h}{t} , \qquad (3.8)$$

де h - товщина розпорошеного матеріалу;

t - час розпилення.

Для розрахунку швидкості розпилення матеріалів при нормальному падінні іонів можна користуватися виразом:

$$V = \frac{j_{Ц} \cdot S \cdot Ma}{e \cdot N_A \cdot \rho}, \qquad (3.9)$$

де ji - щільність іонного струму в перерізі, перпендикулярному напрямку падіння іонів, А / см^2;

S - коефіцієнт розпилення матеріалу, атом / іон;

ма - атомна маса атомів мішені, г / моль;

е - заряд електрона (1,6 · 10^{-19} Кл);

Na - число Авогадро (6,023 · 1023 атом / моль);

〉- щільність матеріалу, г / см^2.

Якщо розпорошення матеріалів проводиться в діапазоні тисків, при якому можливе повернення розпорошених частинок на мішень через процеси дифузії і розсіювання, то значення обраного або розрахованого коефіцієнта розпилення повинно бути скориговано.

Коефіцієнт розпилення S характеризує ефективність розпилення та визначається як середнє число атомів, що видаляються з поверхні твердого тіла однієї падаючої часткою:

$$S = \frac{число \quad удаленных \quad атомов}{число \quad падающих \quad частиц}. \qquad (3.10)$$

Падаючими частинками можуть бути іони, нейтральні атоми, нейтрони, електрони або фотони з великою енергією.

Для коефіцієнта розпилення типові значення 1 ... 5, хоча він може змінюватися від 0 до 100. Це залежить від енергії і маси первинних частинок і

кута їх падіння на поверхню, маси атомів мішені, кристалічного стану твердого тіла і орієнтації кристала, від поверхневої енергії зв'язку атомів мішені.

Для реалізації розпилення атомів мішені повинна бути повідомлена енергія, що перевищує енергію їх зв'язку в твердому тілі. Ця енергія позначається як порогова енергія розпилення Епор. Величина її коливається в межах 10 ... 40 еВ. При енергіях менше порогової розпорошення відсутня. При великих енергіях коефіцієнт розпилення зростає зі збільшенням енергії первинних частинок, досягає максимуму, а потім знову падає. Зменшення коефіцієнта розпилення при більш високих енергіях пов'язано з великою глибиною проникнення частинок в тверде тіло і меншим виділенням енергії в поверхневому шарі.

Відповідно до теорії Зигмунда для аморфних і полікристалічних матеріалів для низьких енергій іонів до 1 кеВ коефіцієнт розпилення визначається наступним виразом:

$$S = \frac{3}{\pi^2}\alpha\frac{M_и M_a}{(M_и + M_a)^2}\cdot\frac{E_и}{2E_{суб}}, \qquad (3.11)$$

де Мі і Ма - атомні маси іонів і атомів мішені, г / моль;

єї - енергія падаючих іонів, еВ;

Есуб - енергія сублімації атомів мішені, еВ;

(- безрозмірний параметр, що залежить від Мі / Ма.

залежність параметра α від відносини Ма / Мі при нормальному падінні пучка іонів показана на рисунку 3.9.

Оскільки енергія іонів при розпилюванні в магнетронній системі при роботі на аргоні лежить в діапазоні 350–450 еВ, то при розрахунку коефіцієнта розпилення буде використовуватися вираз (3.11).

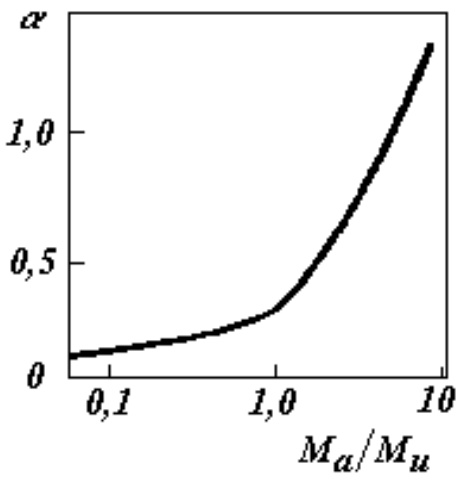


Рисунок 3.9 - Залежність коефіцієнта α від відносини маси атома розпорошується матеріалу Ма до маси іона Мі

Розрахунки проводяться в зворотному порядку. Спочатку розраховується коефіцієнт розпилення і швидкість розпилення матеріалу мішені. Потім проводиться побудова контурного зображення розподілу товщини напиляемой плівки в залежності від радіуса пластини і відстані до випарника. Після цього розраховується розподіл товщини напилень плівки по пластині і нерівномірність цього розподілу. З урахуванням виданого завдання проводиться оптимізація положення подложкодержателя з пластиною щодо мішені.

Математичні розрахунки проведені за допомогою програми MathCAD.

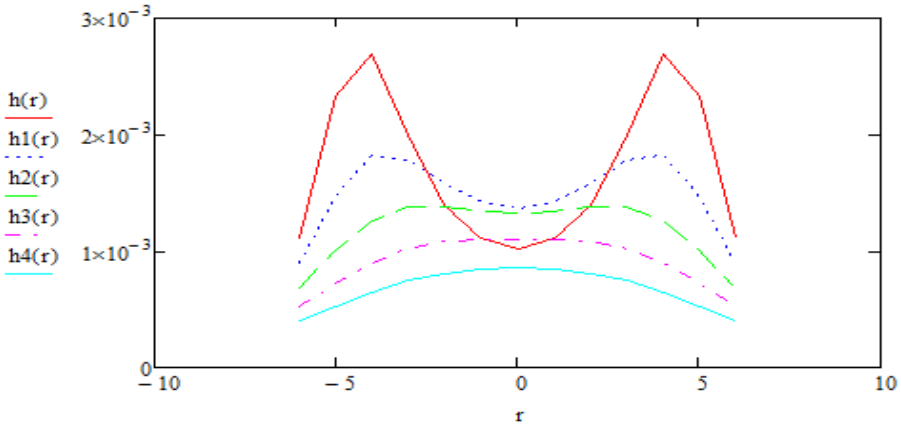


Рисунок 3.10 − Розподіл конденсату a-Si: H по поверхні підкладки при різних відстанях катод - підкладка

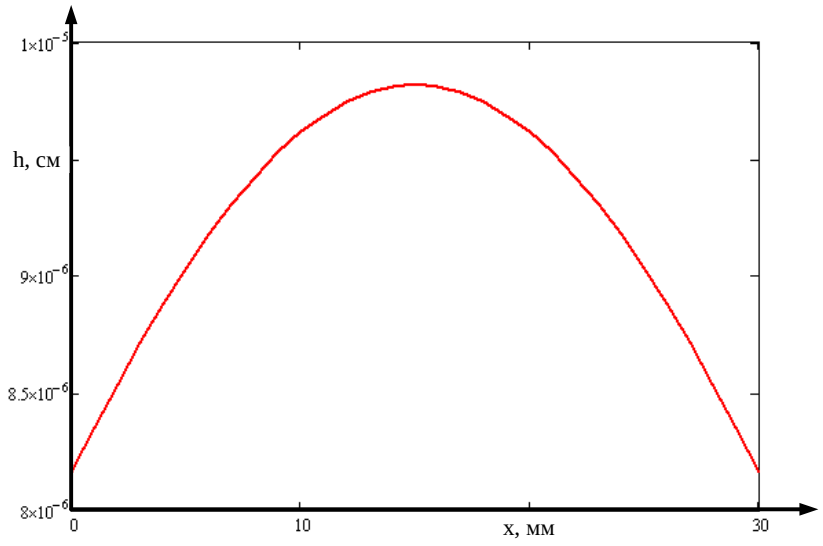


Рисунок 3.11 – Профіль товщини плівки a-Si: H на підкладці при відстані катод - підкладка 5.5см

Розрахунок показав хорошу рівномірність товщини отриманого на нерухомій підкладці конденсату при відстані катод-підкладка більш 3см. Результати розрахунку наведені на рисунку 3.10. Був розрахований також профіль товщини плівки на підкладці діаметром 30мм при відстані катод-підкладка рівному 55мм, зображений на рисунку 3.11. Розрахунок показав, що нерівномірність товщини плівки не перевищила 4,5%.

4 ВИМІР ОПТИЧНИХ І ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЛІВОК

4.1 Методика вимірювання спектрів поглинання напівпровідникових зразків тонких плівок

При проходженні оптичного випромінювання через напівпровідник відбувається його ослаблення внаслідок процесів відображення і поглинання. Нехай на плоскопараллельную пластину напівпровідника падає паралельний пучок монохроматичного випромінювання інтенсивністю I0λ (рис.4.1). Спектральний коефіцієнт пропускання пластини Tλ, який може бути експериментально визначений за допомогою спектрофотометра, являє собою відношення інтенсивності минулого через зразок випромінювання Iλ до інтенсивності падаючого випромінювання I0λ:

$$T_\lambda = \frac{I_\lambda}{I_{0\lambda}}. \tag{4.1}$$

Відповідно до закону Бугера-Ламберта і з урахуванням відображення від поверхонь зразка коефіцієнт пропускання

$$T_\lambda = \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha_\lambda d)}{(1-R^2)\exp(-2\alpha_\lambda d)}. \tag{4.2}$$

Тут R – коефіцієнт Френелевскую відображення від поверхні

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \tag{4.3}$$

де *n* - показник заломлення напівпровідника;

αλ - коефіцієнт поглинання напівпровідника;

d - товщина зразка.

В області сильного поглинання багаторазовими відображеннями всередині зразка можна знехтувати і вираз (4.2) істотно спрощується:

$$T_\lambda = (1-R)^2 \exp(-\alpha_\lambda d). \tag{4.4}$$

Коефіцієнт поглинання αλ є характеристикою матеріалу і залежить від довжини хвилі випромінювання. Залежність коефіцієнта поглинання від енергії фотона α (ħω) або довжини хвилі випромінювання α (h) називають спектром поглинання. Вираз (4.2) дозволяє розрахувати спектр поглинання матеріалу по експериментально виміряного на спектрофотометрі спектру пропускання плоскопараллельного зразка Tλ (λ), покажемо на рисунку 4.1.

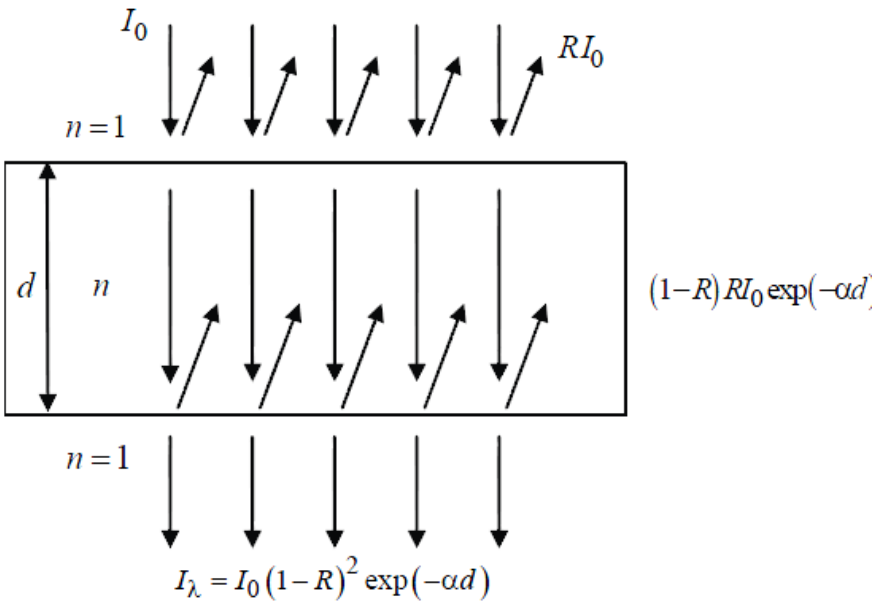


Рисунок 4.1- Проходження випромінювання через пластину напівпровідника

У багатьох ситуаціях, зокрема для аморфних і микрокристаллических матеріалів, отримання об'ємного зразка неможливо або недоцільно. При цьому досліджуваний зразок являє собою тонку плівку матеріалу, нанесену на прозору

діелектричну підкладку, і в експерименті вимірюється не спектр пропускання напівпровідника, а спектр пропускання структури напівпровідникова плівка - діелектрична підкладка (рис. 4.2). У вираженні для коефіцієнта пропускання подібних систем необхідно враховувати Френелевскую відображення від трьох кордонів розділу: повітря-плівка (R1), плівка-підкладка (R2), підкладка-повітря (R3):

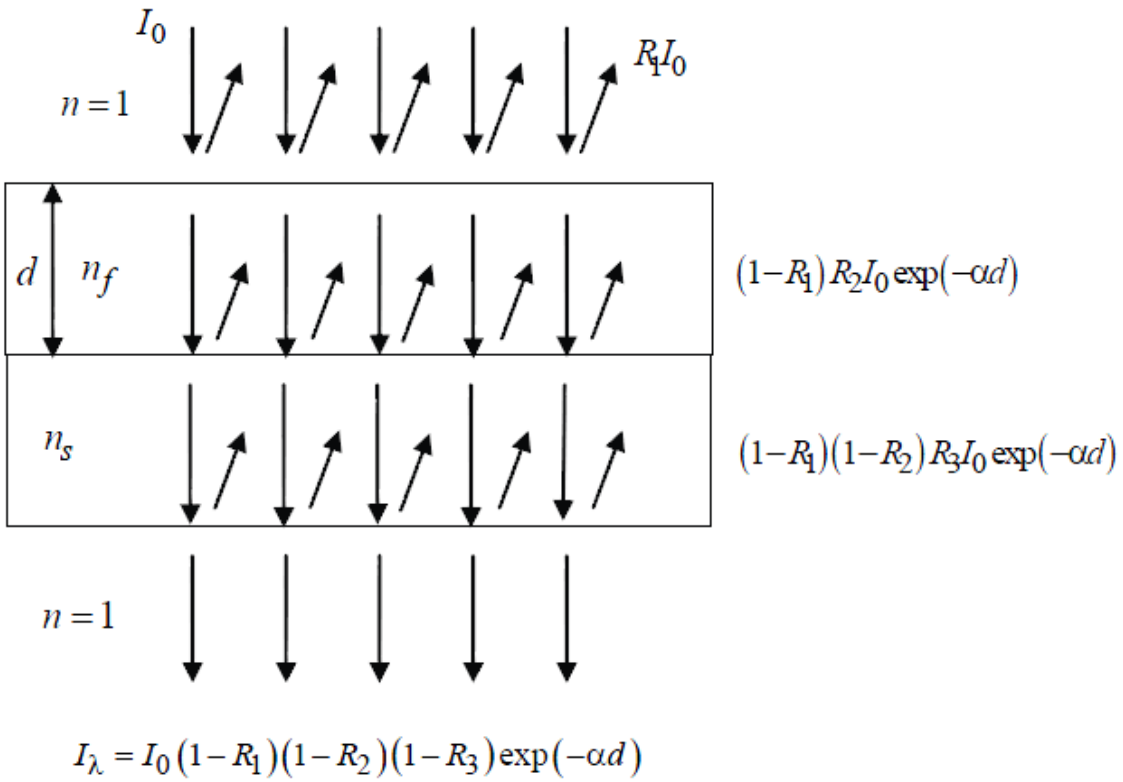


Рисунок 4.2 - Проходження випромінювання через структуру плівка-підкладка

$$T_\lambda = (1-R_1)(1-R_2)(1-R_3)\exp(-\alpha_\lambda d),$$

$$R_1 = \frac{(n_f - 1)^2}{(n_f + 1)^2} \quad R_2 = \frac{(n_f - n_s)^2}{(n_f + n_s)^2} \quad R_3 = \frac{(n_s - 1)^2}{(n_s + 1)^2}, \tag{4.5}$$

де nf - показник заломлення матеріалу плівки; ns - показник заломлення матеріалу підкладки.

Вираз (4.3) записано для випадку, коли підкладка не поглинає випромінювання в робочій спектральної області і ефектами багаторазового відбиття можна знехтувати.

4.2 Механізми оптичного поглинання в напівпровідниках. Визначення ширини забороненої зони за спектрами поглинання

У напівпровідниках розрізняють 5 основних механізмів оптичного поглинання:

– власне (фундаментальне);

– екситонів;

– поглинання вільними носіями;

– домішкові;

– граткову.

В ультрафіолетовій (УФ), видимій і ближній інфрачервоній (ІЧ) областях спектру домінуючим є власне (фундаментальне) поглинання, обумовлене переходами електронів з валентної зони в зону провідності. Екситонів поглинання пов'язано з утворенням екситонів - квазічастинок, що представляють собою зв'язані стани електронів і дірок; воно спостерігається тільки в особливо чистих напівпровідниках при низьких температурах. Поглинання вільними носіями, домішкові поглинання і граткову поглинання проявляються в ІЧ і далекої ІЧ-областях. При взаємодії електронів напівпровідника з електромагнітним випромінюванням повинні виконуватися 2 закони: закон збереження енергії і закон збереження квазіімпульса:

$$E' = E + \hbar\omega, \qquad \mathbf{p}' = \mathbf{p} + \hbar\mathbf{k},$$

де E, p - енергія і квазіімпульс електрона до взаємодії з фотоном;

E ', P '- енергія і квазіімпульс після взаємодії;

ħω - енергія фотона;

ħ k - імпульс фотона.

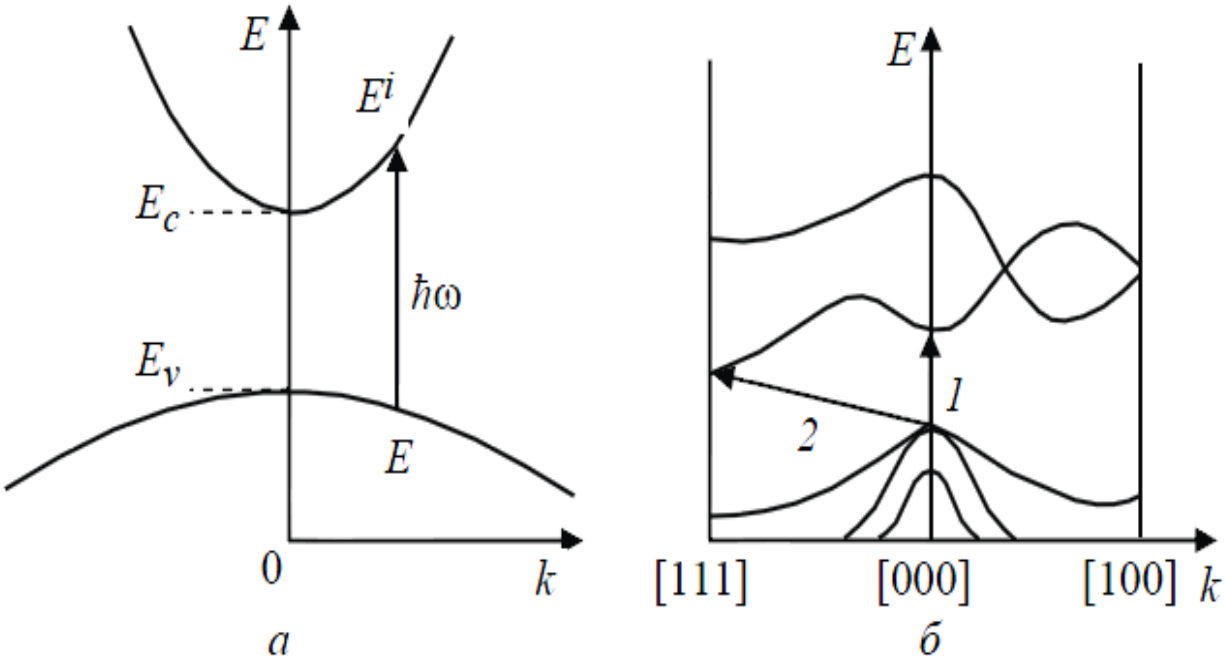
Імпульс фотона дуже малий у порівнянні з квазіімпульсом електрона, тому їм можна знехтувати, так що p '= p. Останнє співвідношення показує, що при взаємодії електрона в кристалі з полем випромінювання можливі тільки такі переходи, при яких квазіімпульс (хвильової вектор) електрона зберігається. Ці переходи прийнято називати вертикальними, або прямими.

При вивченні власного поглинання напівпровідника слід враховувати особливості його зонної структури. Напівпровідники можна розділити на дві групи, в яких механізми міжзонних переходів істотно розрізняються. У прямозоні напівпровідниках екстремуми валентної зони і зони провідності розташовані в одній і тій же точці зони Брілюена, зазвичай в точці k = 0, що забезпечує виконання закону збереження квазіімпульса. До прямозонних напівпровідників відносяться такі широко використовувані матеріали, як арсенід галію, нітрид галію, антимонід індію і ряд інших.

Якщо матричний елемент переходу відмінний від нуля в першому порядку теорії збурень, то такий перехід називають дозволеним. На рис. 3.6, а показані прямі дозволені переходи. Для напівпровідників, у яких зона провідності і валентна зона мають сферичної симетрією, коефіцієнт власного поглинання для прямих дозволених переходів виражається формулою:

$$\begin{aligned} \alpha\hbar\omega &= A\left(\hbar\omega - E_g\right)^{1/2}, \quad & \hbar\omega \geq E_g, \\ \alpha &= 0, & \hbar\omega < E_g. \end{aligned} \tag{4.6}$$

Відповідно до закону збереження енергії, прямі міжзонного переходи можливі лише тоді, коли енергія фотона перевищує ширину забороненої зони напівпровідника, або для випромінювання з довжиною хвилі, що не перевищує деякого критичного значення, званого краєм власного поглинання.



Власне поглинання

при прямих міжзонних переходах (а); оптичні переходи в напівпровідниках зі складними енергетичними зонами (б)

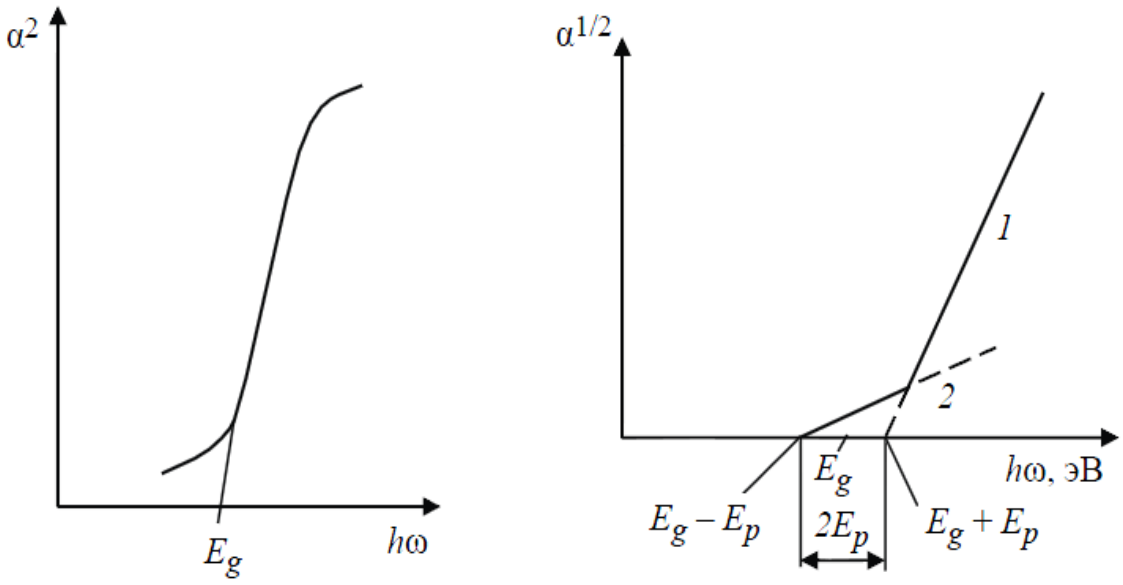
Рисунок 4.3 - Екстремуми валентної зони

У непрямозонних напівпровідниках, до яких належать кремній і германій, екстремуми валентної зони і зони провідності розташовані в різних точках зони Бріллюена (рис. 4.3, б). Виконання закону збереження квазіімпульса в цьому випадку забезпечується за рахунок участі в процесі третьої частки - фонона. Непрямі переходи можуть відбуватися як з поглинанням, так і з випусканням фонона; залежність коефіцієнта поглинання від енергії фотона при цьому розділяється на дві гілки:

$$\alpha\hbar\omega = A\left[\frac{\left(\hbar\omega - E_g + E_p\right)^2}{\exp\left(E_p/kT\right)-1} + \frac{\left(\hbar\omega - E_g - E_p\right)^2}{1-\exp\left(-E_p/kT\right)}\right], \quad \hbar\omega > E_g + E_p, \tag{4.7}$$

$$\alpha\hbar\omega = A\frac{\left(\hbar\omega - E_g + E_p\right)^2}{\exp\left(E_p/kT\right)-1}, \quad \hbar\omega \le E_g - E_p. \tag{4.8}$$

Співвідношення (3.5), (3.6), (3.7) справедливі в обмеженому діапазоні зміни енергії фотонів, відповідному переходах з енергетичних рівнів поблизу стелі валентної зони на рівні поблизу дна зони провідності, де залежність E (k) може бути апроксимована параболою.



а б

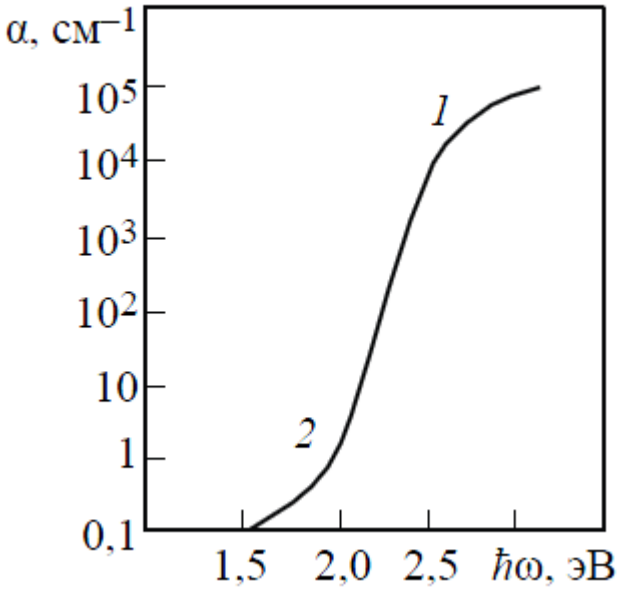
Залежність α2 (ħω)

для прямих дозволених переходів (а) і непрямих переходів (б)

Рисунок 4.4 – Точка перетину прямої з віссю

Для визначення ширини забороненої зони Eg по спектру поглинання для прямих дозволених переходів необхідно побудувати графік залежності квадрата твори коефіцієнта поглинання на енергію фотона (αħω) 2 від енергії фотона ħω, виділити на ньому лінійна ділянка і екстраполювати його до перетину з віссю абсцис. Точка перетину прямої з віссю дозволяє визначити Eg (рис. 4.4, а). У разі непрямих переходів слід побудувати графік (αħω) 1/2 = f (ħω), на якому присутній 2 лінійних ділянки, що відповідають переходам з поглинанням і випусканням фотона, і екстраполювати їх до перетину з віссю абсцис. Ширина забороненої зони в цьому випадку визначається по середній точці відрізка, обмеженого точками перетину екстраполюючих прямих з віссю абсцис (рис. 4.4, б).

В аморфних і микрокристаллических напівпровідниках трансляційна симетрія істотно порушена або відсутня зовсім, що призводить до істотної зміни характеру залежності α = f (ħω) і спотворення форми краю власного поглинання в порівнянні з відповідними монокристаллическими матеріалами. На рис. 4.5 наведено приклад спектру аморфного (склоподібного) напівпровідника.



(1 - параболічна ділянка, 2 - хвіст Урбаха)

Рисунок 4.5 - Спектр поглинання аморфного напівпровідника

В області енергій, що перевищують ширину забороненої зони ħω ≥ Eg, спостерігається більш різкий у порівнянні з монокристалами спад поглинання, що є наслідком порушення правила відбору по квазіімпульсів; відповідну ділянку кривої поглинання описується параболою:

$$\alpha\hbar\omega = B\left(\hbar\omega - E_g\right)^r, \quad \hbar\omega \geq E_g, \tag{4.9}$$

де r - змінний показник ступеня, який в залежності від конкретного матеріалу приймає значення від 1 до 3 (в більшості випадків r = 2). В області ħω <Eg залежність α = f (ħω) описується експоненціальною функцією

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left(\frac{\hbar\omega - E_g}{E_0}\right), \quad \hbar\omega < E_g \tag{4.10}$$

де E0 - характеристична енергія Урбаха, а відповідну ділянку кривої носить назву хвоста Урбаха. Наявність хвоста Урбаха обумовлено, зокрема, високою щільністю локалізованих станів в забороненій зоні.

У порівнянні з відповідними монокристалами край власного поглинання аморфних напівпровідників зрушать в область менших довжин хвиль. При цьому, чим менше ступінь впорядкованості матеріалу, тим даний зрушення більше.

Для визначення ширини забороненої зони аморфного напівпровідника відповідно до вираження (3.6) необхідно побудувати графік залежності (αħω) 1/2 = f (ħω), виділити на ньому лінійна ділянка і екстраполювати його до перетину з віссю абсцис; точка перетину прямої з віссю відповідає Eg. Для знаходження характеристичної енергії Урбаха E0 необхідно побудувати графік залежності α = f (ħω) в напівлогарифмічному масштабі. В області хвоста Урбаха (ħω <Eg) відповідно до вираження (4.7) залежність набуває вигляду що дозволяє знайти E0 по куту нахилу лінійної ділянки кривої :

$$\lg\alpha = f(\hbar\omega) = \lg\alpha_0 + \frac{\hbar\omega - E_g}{E_0}.$$

4.2 Вимірювання параметрів зразків

В експериментальній частині роботи досліджувалася оптична ширина забороненої зони по спектральної характеристиці оптичного поглинання, а також опір зразків (темнового і світлового) плівок a-Si: H.

Оптичне пропускання плівок a-Si: H вимірювалося на USB-спектрофотометрі типу LR-1 (рис.4.6), який дозволяє автоматично враховувати спектр пропускання підкладки і спектр випромінювання джерела випромінювання, виділяючи тільки оптичні характеристики плівки. Для цього попередньо вимірюється оптична прозорість чистої підкладки в системі: джерело світла-підкладка-спектрофотометр.

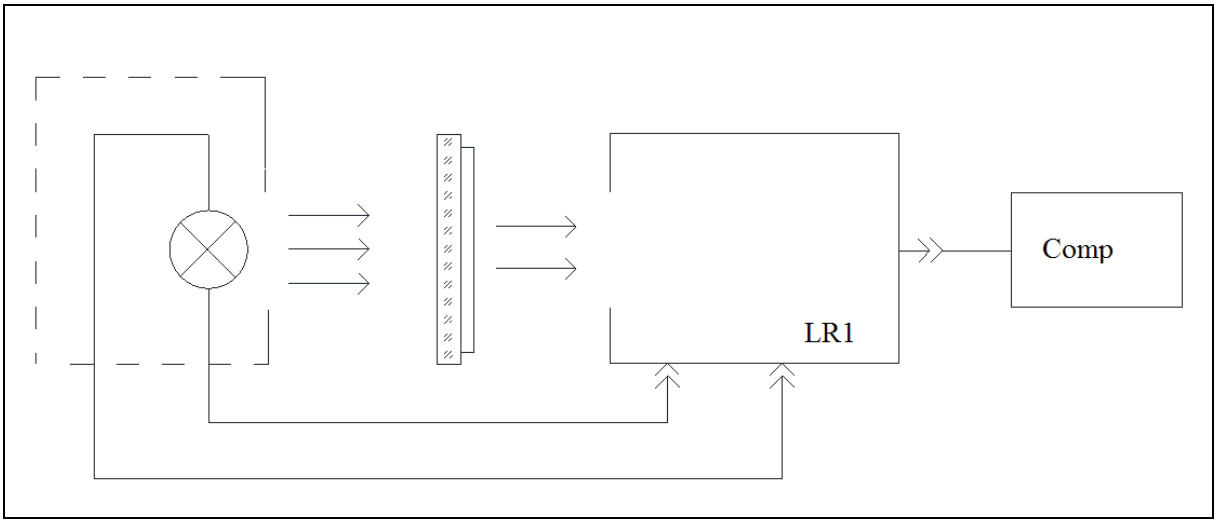


Рисунок 4.6 − Схема вимірювання Eg

Результати проведених вимірювань оптичного пропускання плівки зведені в таблиці 4.1, а спектральна характеристика показана на рисунку 4.6.

Величина hν розраховувалася за формулою:

$$h\nu\ (\text{еВ}) = 1{,}24 / \lambda\ (\text{мкм})$$

Використовуючи її, була побудована залежність √ (αhν) = f (hν) для визначення ширини забороненої зони. Необхідні розрахункові дані наведені в таблиці 4.2, а побудований графік показаний на рисунку 4.7.

Таблиця 4.1 - Спектральний пропускання плівки аморфного кремнію товщиною 1 мкм (експериментальна характеристика)

λ, мкм	0.52	0.54	0.56	0.59	0.62	0.65	0.69	0.73
hν, еВ	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	1.7
T / T0	0.0003	0.026	0.017	0.09	0.26	0.48	0.67	0.71

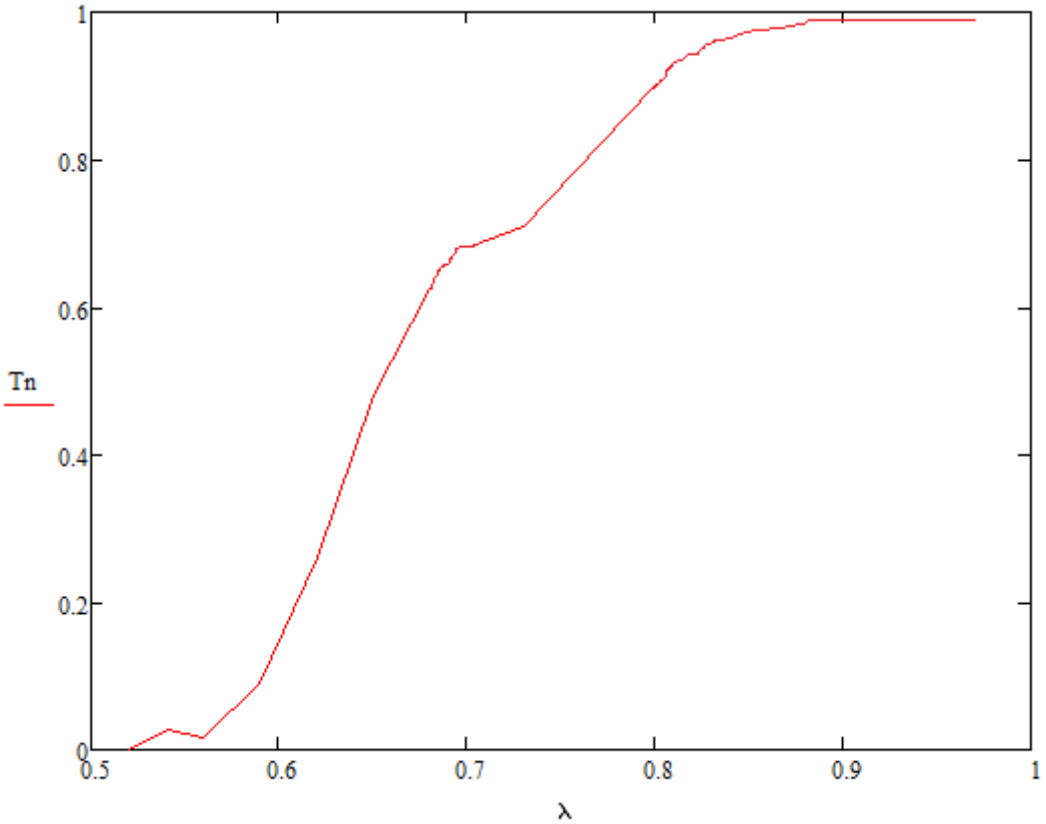


Рисунок 4.7 − Спектр прозорості плівки аморфного кремнію

Таблиця 4.2 - Спектральний поглинання плівки аморфного кремнію товщиною 1 мкм (розрахункові величини)

hν, еВ	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4
T / T0	0.71	0.67	0.48	0.26	0.09	0.017	0.026	0.000 3
α, см - 1	3308	4014	7579	13612	24107	40910	59522	80667
√ (αhν), см-1/2 еВ1 / 2	75	85	120	165	225	300	370	440

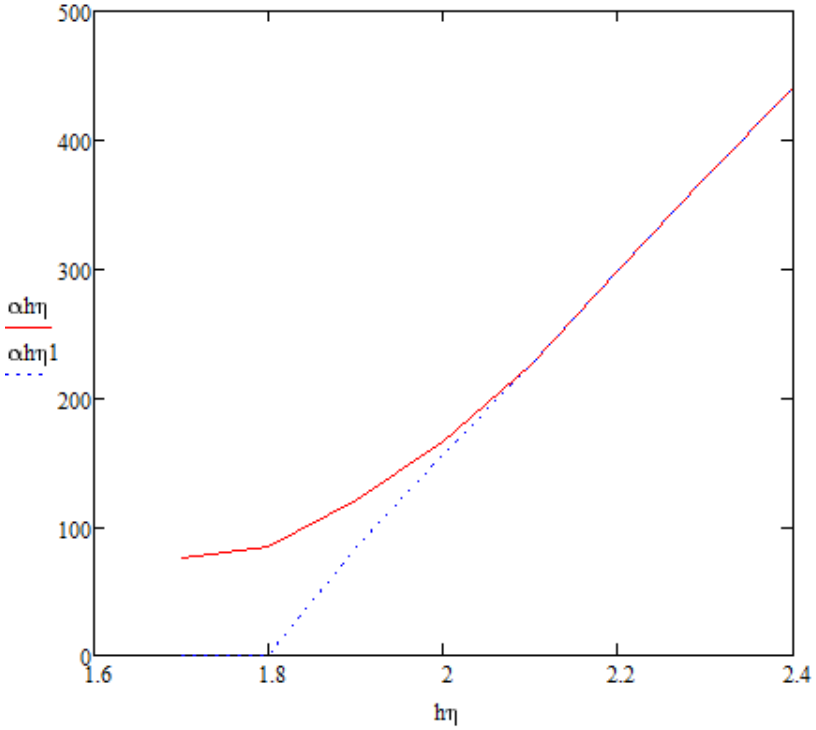


Рисунок 4.8– Залежність поглинання поглинання плівки аморфного кремнію від енергії кванта

Продовживши прямолінійний ділянку графіка до перетину з віссю абсцис, отримуємо величину ширини забороненої зони, яка склала 1,8 еВ

Зразок плівки a-Si: H з контактами містився в розроблену для вимірювань оснащення, наведену на рисунку 4.8, яка призначена для

вимірювання опору зразків плівок a-Si: H, як темнового, так і світового. Оснащення складається з нижнього фланця-5 і верхнього фланця-4, між якими затискається скляна підкладка зразка-6. Між ТСО плівкою на скляній підкладці зразка і верхнім фланцем конструкції, для забезпечення надійного контакту плівки ТСО, укладається індієвий зволікання. Зверху, для забезпечення електричного контакту, до молібденової плівці зразка кріпиться стеклотекстолитовую пластинка з пружинним срібним контактом. Нижній фланець має отвір, через яке можлива засвічення зразка плівки a-Si: H через прозору підкладку і шар ТСО для вимірювання світлового опору Rсв зразків плівок.

Вимірювання опору проводилось за допомогою вольтметра - електрометрії В7-30, що дозволяє вимірювати постійні напруги з вхідним опором 10^{15} Ом і опору зразків від 10^{3} Ом до 10^{15} Ом. Схема вимірювання наведена на рисунку. У комплекті В7-30 є екранована вимірювальна камера для високоомних зразків, в стінці якої зроблено отвір діаметром 4 мм.

Для проведення вимірювань темнового і світлового опорів підготовлений зразок в вимірювальної оснащенні розміщується в вимірювальній камері навпроти отвору, а на вікно оснащення поміщається рассеивающая лінза. При вимірі темнового опору плівок отвір у вимірювальній камері перекривається металевою заслінкою, а при вимірюванні світлового опору через цей отвір зразок засвічувався напівпровідникових лазером зеленого кольору з довжиною хвилі випромінювання 525 нм і потужністю випромінювання 5 мВт. Розсіюючої лінза необхідна для збільшення площі засвічення зразка. Виміряні величини Rтемн. і Rсвет. Склали ($2 \cdot 10^{6}$ Ом) і ($0,5 \cdot 10^{4}$ Ом) відповідно.

4.3 Виробнича санітарія в лабораторії

Роботи, що виконуються в приміщенні лабораторії, провадяться стоячи і не вимагають систематичних важких фізичних напружень, підняття і перенесення важких предметів. В таких умовах енерговитрати працівників становлять від 121 до 150 ккал / ч (140 - 174Вт). Отже, виконувані роботи відносяться до категорії 1б.

Згідно ДСН 3.3.6.042-99 "санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень" та категорії виконуваних робіт, для приміщення встановлені наступні оптимальні норми мікроклімату: температура від 22 до 240С, відносна вологість повітря від 40 до 60%, швидкість руху повітря менше 0,2 м / с.

Щоб забезпечити необхідні норми мікрокліматичних параметрів і чистоти повітря в лабораторії використовується кондиціонування. Підтримка зазначених параметрів в холодний період здійснюється системою опалення відповідно до СНиП 2.04.05-91 "Отопление, вентиляция и кондиционирование".

При проектуванні ще одним шкідливим фактором є розумове перенапруження.

Основні заходи щодо захисту від розумового перенапруження людини: регулярно, через кожні 40-50 хвилин робочого часу робити технологічні перерви, для розрядки розумового напруження.

4.4 Пожежна профілактика лабораторії

Виробництво в приміщенні по пожежовибухонебезпеки згідно НАПБ Б.03.002-2007 "Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою" відноситься до категорії В. Згідно ДБН В.1.1.7-2002 "Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва "будівля має 1 ступінь вогнестійкості, а по НПАОП 40.1-1.21-98 приміщення належить до класу П-IIа. Приміщення лабораторії розташоване в будівлі, виконаному із залізобетонних конструкцій, при

виконанні робіт застосовується електрообладнання - установки вакуумного напилення і системи ультразвукового очищення підкладок.

Причиною пожежі можуть бути: несправність електрообладнання, порушення правил пожежної безпеки; перевантаження в мережі, перегрів провідників. Для попередження пожежі необхідно проводити ряд технічних і організаційних заходів, спрямованих на дотримання встановленого режиму експлуатації електричної мережі, обладнання та дотримання правил пожежної профілактики.

Відповідно до ДБН В.2.5-56-2010 "Інженерне обладнання будинків і споруд. Пожежна автоматика будинків і споруд" дане приміщення оснащений системою автоматичної пожежної сигналізації з димовими пожежними сповіщувачами в кількості 2 штук (з розрахунку 1 сповіщувач на площу приміщення до 86м^2 при висоті приміщення до 3,5 м, але не менше 2 в приміщенні з установками).

Відповідно до НАПБ Б.03.001-2004 "Типові норми належності вогнегасників" приміщення лабораторії повинне бути оснащено переносними вуглекислотними вогнегасниками з розрахунку один вогнегасник ВВК-1,4, на три установки, але не менше, ніж 1 вогнегасник зазначеного типу на приміщення. Отже, в приміщенні лабораторії встановлені 3 вогнегасника ВВК-1,4, так як кількість установок - 8 шт.

Також виконані наступні організаційні заходи:

– призначений відповідальний за пожежну безпеку;
– питання пожежної безпеки включені в усі інструктажі з безпеки праці;
– щорічно проводиться контроль опору ізоляції електропровідниками.

При виникненні пожежі евакуація людей, які перебувають в приміщенні, здійснюється через робочий вихід відповідно до плану евакуації. План евакуації розміщений на видному місці біля виходу з лабораторії.

ВИСНОВКИ

Проведено огляд технологій отримання плівок аморфного кремнію і параметрів плівок, які вони забезпечують, був проведений розрахунок оптимальної відстані мішень-підкладка для рівномірного нанесення плівок на підкладку і результат показав, що ця відстань повинна бути близько 5,5 см. Отримані зразки плівок аморфного кремнію і вироблено вимір оптичної прозорості зразків в спектральному діапазоні 400-900 нм. Расчитаная ширина забороненої зони отриманих плівок склала величину близько 1.8 еВ. Розроблено конструкцію вимірювального оснащення для контролю фотоелектричних властивостей плівок. Проведено вимірювання темнового і світлового опору зразків плівок. Rтемн. і Rсвет. склали $2 \cdot 10^6$ Ом і $0{,}5 \cdot 10^4$ Ом відповідно. Відмінність від типових значень Rтемн / Rсвет (10^4) пояснюється недостатньо високим вихідним питомим опором кремнієвої мішені (50 Ом / см).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Михайлов А. Н. Люминесцентные свойства систем на основе оксидов с ионно-синтезированными нанокристаллами кремния: дис. ... канд. физ.-мат. наук. –Н. Новгород, 2006. –153с.

2. Хрипко С. Л., Кидалов В. В. Сонячні батареї створенні на основі низько-розмірних нанокомпозитних структур // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2016. – Vol. 8. P. 19-27.

3. Мельниченко М.М., Свеженцова К.В., Шмирєва О.М. Використання субмікронних шарів поруватого кремнію в сонячних елементах. –Київ, 2003. – 207 с.

4. Каган М.Б., Полисан А.А. Солнечная энергетика: современное состояние и перспективы развития // Материалы электронной техники. Москва, 2003. Вип 3 С. 15 – 19.

5. Дмитрук Н.Л., Мамонтова И.Б. Фотоэлектрические преобразователи солнечного излучения с тектурированной поверхностью // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. 2000. Вип. 35. С. 67 – 90.

6. Качурин Г.А., Яновская С.Г. О формировании нанокристаллов кремния при отжиге слоев SiO2, имплантированных ионами Si // Физика и техника полупроводников. 2002. Вип. 19. С. 685 –689.

7. Бурдов В.А. Зависимость ширины оптической щели кремниевых квантовых точек от их размера // Физика и техника полупроводников. 2002. Вип. 2. С. 233 – 236.