

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки  
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра Мікроелектроніки  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## **Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 153 «Мікро – та наносистемна техніка  
(код і назва)

на тему: Діелектричні плівки для ІЧ фотодетекторів нанесені методом  
хімічного газофазного осадження

Виконав : студент 2 курсу, групи ДП-81мп  
(шифр групи)

Бондаренко Максим Олександрович  
(прізвище, ім'я, по батькові) \_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник доц. , к.т.н. Мачуляньський О.В.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) \_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант з нормоконтролю проф., к.т.н., доц. Орлов А.Т. \_\_\_\_\_

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н. Діденко Ю.В. \_\_\_\_\_

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) \_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань. Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2019 року

## РЕФЕРАТ

Загальний обсяг роботи складає 74 сторінок, 22 рисунка, 28 таблиць та 22 бібліографічних найменування.

Актуальність теми пов'язана із досить активними дослідженнями у даній області, навіть з урахуванням того, що вже наявні досить велика кількість досліджень саме в цій області. Відбувається це із-за того, що вчені намагаються вдосконалити процес нанесення діелектричних плівок для отримання максимально ефективних параметрах для відповідних областей використання. В даній роботі основний акцент зроблений на захисних властивостях та стабільності плівок.

Метою роботи є отримання діелектричних плівок для ІЧ фотодетекторів, які повинні володіти гарними захисними властивостями, гарною полосою пропускання та саме головне – стабільністю в робочому діапазоні спектру.

Розглянуті різні методи нанесення діелектричних плівок, технологічний маршрут формування діелектричних плівок на пластинах InSb, обладнання за допомогою якого виконуються процеси формування плівок. За рахунок аналізу різних методів формування діелектричних плівок, знайдено найбільш ефективний метод для виконання поставленої цілі, а саме метод хімічного газофазного осадження. Далі були розглянуті переваги та недоліки використання саме цього методу формування діелектричних плівок та приведені приклади готових зразків та їх характеристик.

Для досягнення поставленої мети в роботі проводилися експериментальні дослідження з нанесення діелектричних плівок в різних умовах, їх аналіз за допомогою методів ІЧ-спектроскопії, та знаходився максимально оптимальний режим нанесення плівок, для отримання гарного результату.

Практичне значення даної роботи полягає в дослідженні отриманих плівок та отриманні якісних характеристики для їх подальшого використання завдяки отриманим даним.

Ключові слова: ІЧ фотодетектор, фотодіод, антимонід індію, діелектричні плівки, хімічне газофазне осадження, спектр, спектральна характеристика.

## ABSTRACT

The total volume of the work is 74 pages, 22 figures, 28 tables and 22 bibliographic titles.

The relevance of the topic is related to the quite active research in this area, even considering that there is already a large amount of research in this area. This is due to the fact that scientists are trying to improve the process of applying dielectric films to obtain the most effective parameters for the respective areas of use. In this work the main emphasis is on the protective properties and stability of the films.

The purpose of the work is to obtain dielectric films for IR photodetectors, which should have good protective properties, a good bandwidth and most importantly - stability in the operating range of the spectrum.

Various methods of applying dielectric films, the technological route of forming dielectric films on InSb plates, the equipment by which the processes of film formation are performed, are considered. Due to the analysis of different methods of forming dielectric films, the most effective method for achieving the goal, namely the method of chemical gas-phase deposition, was found. Further, the advantages and disadvantages of using this particular method of forming dielectric films were discussed, and examples of finished samples and their characteristics are given.

In order to achieve this goal, experimental studies were conducted on the application of dielectric films in different conditions, their analysis using IR spectroscopy, and found the optimum mode of application of films, to obtain a good result.

The practical significance of this work is to study the films obtained and to obtain qualitative characteristics for their further use through the data obtained.

Keywords: IR photodetector, photodiode, indium antimonide, dielectric films, chemical gas-phase deposition, spectrum, spectral characteristic.

## ЗМІСТ

Перелік скрочень.....	5
ВСТУП.....	6
1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ.....	8
1.1 Поняття про детектори.....	8
1.2 Використання діелектричних плівок .....	10
1.2.1 Діелектричні плівки SiO <sub>2</sub> .....	11
1.2.2 Діелектричні плівки Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> .....	12
1.3 Загальні положення про метод хімічного осадження із газової фази .....	13
1.3.1 CVD при атмосферному тиску.....	14
1.3.2 CVD при пониженому тиску.....	15
1.3.3 CVD посилений плазмою.....	17
1.4 Методи дослідження параметрів тонких плівок .....	19
1.4.1 Оптичні методи.....	21
1.4.2 Метод профілометрії .....	22
1.4.3 Поляриметричний метод .....	23
1.4.4 Метод інтерферометрії .....	24
1.4.5 Метод ІЧ-спектроскопії .....	25
Висновки до розділу 1 .....	28
2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ФОРМУВАННЯ ПЛІВОК ЗА МЕТОДОМ ХІМІЧНОГО ГАЗОФАЗНОГО ОСАДЖЕННЯ.....	30
2.1 Підготовка пластини для проведення хімічного осадження .....	30
2.2 Протікання процесу хімічного осадження із газової фази.....	36
2.3 Обробка пластини після використання методу хімічного газофазного осадження .....	39
Висновки до розділу 2.....	41
3. ПРОВЕДЕННЯ ПРОЦЕСУ ТА АНАЛІЗ ПЛІВОК .....	42
3.1 Проведення процесу хімічного газофазного осадження .....	42
3.2 Визначення товщини отриманої діелектричної плівки .....	47
3.3 Аналіз плівки методом ІЧ-спектрос.....	48
3.4 Знаходження оптимального режиму та морфологія плівки .....	52
Висновки до розділу 3.....	55
4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	56
ВИСНОВКИ.....	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУР.....	73

## Перелік скорочень

InSb - indium antimonide , антимонід індію.

ІС – інтегральні схеми.

ІЧ- випромінювання – інфрачервоне випромінювання.

ІЧ-спектр – інфрачервоний спектр

CVD, ХОГФ – chemical vapor deposition, хімічне осадження із газової фази

APCVD - Atmospheric pressure CVD, хімічне осадження при атмосферному тиску.

LPCVD - Low-pressure CVD, хімічне осадження при пониженому тиску.

PECVD - Plasma-Enhanced CVD, хімічне осадження посилене плазмою.

ALCVD - Atomic-layer CVD - атомно-шарове осадження.

ВЧ – високочастотне.

ІМС – інтегральні мікросхеми.

## ВСТУП

На сьогоднішній день, фотодетектори завоювали весь ринок та світ майже у всіх сферах промисловості. Одні із головних областей це медицина, військова промисловість, прилади які визначають та виявляють елементарні частинки, навіть гаджети, якими ми користуємося декілька разів на день і навіть не замислюємося над тим, як це працює.

Саме тому, метою дослідження було, знаходження найбільш ефективного методу нанесення діелектричних плівок, які б володіли гарною стабільністю і саме головне, це працювали в заданому спектральному діапазоні: 2-5 мкм.

В даний час актуальним завданням є розробка низькотемпературних методів отримання діелектричних матеріалів у вигляді тонких високоякісних плівок різного функціонального призначення. Використання високотемпературних процесів для синтезу подібних шарів призводить до генерації і розвитку структурних дефектів в напівпровідникових структурах, термічної деформації підкладок, перерозподілу домішок в структурах, що неминуче викликає зниження виходу придатних приладів. У зв'язку з цим велике поширення останнім часом отримали установки, що реалізують низькотемпературний процес плазмохімічного осадження з газової фази (ПХОГФ), з допомогою якого можна отримувати діелектричні плівки нанометрових товщин хорошої якості [1].

Метод хімічного осадження з газової фази є одним з найбільш поширених методів формування тонких плівок і покриттів, застосовуваних у мікроелектроніці ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  і ін.). При використанні в даній технології плазмової активації загрозованих речовин (PECVD), збільшується ефективність і швидкість процесу за рахунок значного зниження температур (80 - 350 ° C). Освіта покриттів при осадженні проходить в кілька стадій: освіту в плазмі радикалів та іонів, адсорбція на поверхні і перегрупування адсорбованих атомів. Плазмохімія, як метод створення плівок, забезпечує високу адгезію і хімічну чистоту продукту,

осаждяемого з газової фази, дозволяє наносити однорідні за складом і товщині покриття на деталі складної конфігурації [2].

Враховуючи вище сказане, задачею цієї роботи є:

- 1) Дослідити вплив режимів плазмохімічного осадження на властивості плівок нітриду кремнію.
- 2) Освоїти метод еліпсометрії для вимірювання показника заломлення і товщини плівки.
- 3) Дослідити вплив технологічних параметрів на показник заломлення

## 1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

### 1.1 Поняття про детектори

Фотодатчик або фотодетектор - датчик світла або іншої електромагнітної енергії.

Існують різні види фотодатчиків:

- Активно-піксельний датчик - світлочутлива матриця. Зазвичай зазвичай використовуються в камері мобільного телефону, веб-камерах.
- Хімічні детектори, такі як фотопластинки, в якому молекула галогенідусрібла розділяється на атом металевого срібла і атом галогену. Проявник аналогічно викликає поділ сусідніх молекул.
- Кріогенні детектори частинок досить чутливі, щоб виміряти енергію одного фотона рентгенівського, видимого і інфрачервоного випромінювання - Оптичні детектори, в основному квантові пристрої, в яких окремий фотон виробляє дискретний ефект.
- Оптичні детектори, які ефективні як термометри, що реагують на тепловий ефект вхідного випромінювання, такі як болометри, піроелектричні детектори.
- Фоторезистори які змінюють опір відповідно до інтенсивності світла. Зазвичай опір зменшується зі збільшенням інтенсивності світла, що падає на нього.
- Фотовольтаїчні детектори або сонячні батареї, які створюють напругу і виробляють електричний струм коли освітлені.
- Фотодіоди, які можуть працювати в фотоелектричному режимі або фотопровідних режимі.
- Фототранзистори, які діють як підсилюють фотодіоди.
- Фотопровідники з квантовою точкою або фотодіоди, які можуть уловлювати довжини хвиль у видимій та інфрачервоній областях спектру

InSb - це вузькозонний напівпровідник з шириною забороненої зони 0,17 eВ при 300 К і 0,23 eВ при 80 К.



Рисунок 1.1 Вигляд антимоніду індію

InSb має вигляд темно-сірих сріблястих металевих шматочків або порошку зі склоподібним блиском. При впливі температури вище 500 ° С він плавиться і розкладається, виділяючи пари сурми і оксиду сурми. [3]

Нелегований InSb володіє найбільшою рухливістю електронів при температурі навколишнього середовища (78000 см<sup>2</sup> / В · с), швидкістю дрейфу електронів і балістичної довжиною (до 0,7 мкм при 300 К) серед всіх відомих напівпровідників, за винятком вуглецю нанотрубки.

Індійські антимонідні фотодіодні детектори є фотоелектричними, генеруючи електричний струм при впливі інфрачервоного випромінювання. Внутрішня квантова ефективність InSb фактично становить 100%, але є функцією товщини, особливо для фотонів з ближньої смугою. Як і всі вузькозонні матеріали, детектори InSb вимагають періодичного калібрування, що збільшує складність системи формування зображень. Ця додаткова складність має сенс в тих випадках,

коли потрібно надзвичайна чутливість, наприклад, у військових тепловізійних системах великої дальності. Детектори InSb також вимагають охолодження, оскільки вони повинні працювати при криогенних температурах (зазвичай 80 До).

## 1.2 Використання діелектричних плівок

Створення, розвиток і широке впровадження в промисловість планарної технології в кремнієвих ІС значною мірою зобов'язані тому, що на поверхні кремнію можна сформувати діелектричну плівку, що володіє прекрасними маскувальними властивостями. Для цього найбільш поширеним і якісним діелектриком залишається діоксид кремнію.[4]

У сучасній мікроелектроніці широко використовуються різні види тонких діелектричних плівок. Найбільш широко застосовуються тонкі плівки  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  і тонкі плівки полікристалічного кремнію (які, строго кажучи, не є діелектричними, але методи їх отримання аналогічні методам отримання тонких плівок).



Рисунок 1.2 Пластини, на які наносяться діелектричні плівки

Залежно від функцій, які виконуються діелектричними плівками, до них висувають різні вимоги. Наприклад, плівки, що застосовуються в якості масок, повинні забезпечувати:

-селективність по відношенню до тих чи інших технологічних факторів (до

розчинів, опроміненню, газам, плазмі і т.п.);

-відсутність пор і тріщин;

-рівномірність товщини, структури фізико-хімічних властивостей по площі і глибині маски;

-хорошу адгезію до пластини.

Якщо діелектрична плівка застосовується в якості ізоляції, то її основними характеристиками є:

-питомий електроопір;

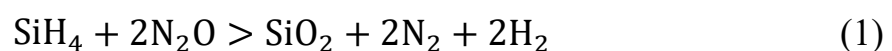
-тангенс кута діелектричних втрат ( $\text{tg } \delta$ );

-діелектрична проникність ( $\epsilon$ );

-рівномірність і стабільність цих властивостей.

### 1.2.1. Діелектричні плівки $\text{SiO}_2$

Діоксид кремнію  $\text{SiO}_2$ . Чаще застосовується в якості підзатворного діелектрика. Найбільш поширеним способом отримання тонких плівок  $\text{SiO}_2$  є термічне окислення. Шар двоокису кремнію формується на кремнієвій пластині за рахунок хімічної взаємодії в приповерхневої області напівпровідника атомів кремнію і кисню. Кисень міститься в окислювальному середовищі, з якою контактує поверхню кремнієвої підкладки, нагрітої в печі до температури  $900 \div 1200$  оС. Однак в даний час товщина підзатворного діелектриків знизилася більш ніж на порядок і наблизилася до  $5 \div 10$  нм. Сформувати такі шари оксиду звичайним термічним окисленням складно, так як процеси нагрівання та охолодження напівпровідникових пластин в дифузійних печах дуже інерційні, що не дозволяє точно контролювати технологічні режими окислення і, отже, призводить до розкиду електрофізичних параметрів напівпровідникових структур.



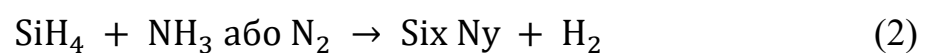
Тому тонкі ( $10 \div 20$  нм) і ультратонкі (менше 10 нм) шари оксиду формують методом швидкої термічної обробки (БТО). Особливістю цього методу є швидке

нагрівання та охолодження підкладок з використанням некогерентних джерел світла. Обробка напівпровідникових пластин здійснюється в режимі теплового балансу з тривалістю нагріву від одиниць до десятків секунд. Істотним достоїнством технології БТО є можливість відслідковувати процес окислення в реальному режимі часу з точністю до часток секунди.

Але і це не вирішує всіх проблем. При подальшій мініатюризації мікросхем на основі SiO<sub>2</sub> виникає ще одна проблема: при зменшенні товщини подзатворного діелектрика до 1 нм і нижче струми витoku зростають експоненціально. Для подолання цього обмеження в якості подзатворного діелектрика використовують діоксид гафнію HfO<sub>2</sub>, а також інші діелектрики з високою діелектричною проникністю. Перевагами HfO<sub>2</sub> є: відносно висока величина діелектричної проникності ( $\epsilon \gg 25$ ) при великій ширині забороненої зони ( $E_g \gg 5,7$  eV) і термодинамічно стабільна межа розділу з кремнієм.

### 1.2.2 Діелектричні плівки Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

Нітрид кремнію Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Наряду з захисними діелектричними плівками діоксиду кремнію у виробництві напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем все більш широке застосування знаходять плівки нітриду кремнію. Плівки нітриду кремнію мають меншу проникність для дифузанта, використовуваних у звичайній планарній технології, ніж плівки діоксиду кремнію. Тому плівки нітриду кремнію виходять більш тонкими. Це є важливим чинником для фотолітографії, що сприяє збільшенню її роздільної здатності. Плівки нітриду кремнію можна вирощувати у багато разів швидше, ніж плівки діоксиду кремнію, і при більш низьких температурах.



Величина відносини витрати газів NH<sub>3</sub> / SiH<sub>4</sub> впливає на те, з яким елементом - кремнієм або азотом - виявляється переважно пов'язаний водень.

Нітрид кремнію використовується в мікроелектроніці для маскуванню поверхні кремнієвої підкладки при проведенні процесів локальної дифузії, локального окислення, локального травлення, а також для захисту готових структур від навколишнього середовища. [5]

### **1.3 Загальні положення про метод хімічного осадження із газової фази**

Хімічне осадження з газової фази — хімічний процес, метод нанесення покриття, що використовується для отримання високоякісних чистих твердих матеріалів з високими характеристиками.

Осадження парів хімічним шляхом (CVD) - один з найпоширеніших процесів, що застосовується для покриття майже будь-яких металевих або керамічних сполук, включаючи елементи, метали та їхні сплави та інтерметалічні сполуки. Процес хімічного осадження включає відкладення твердого матеріалу з газоподібної фази; це досягається за допомогою хімічної реакції між летючими попередниками та поверхнею матеріалів, що покриваються. У міру проходження газів-попередників над поверхнею нагрітого субстрату утворюється хімічна реакція утворює тверду фазу, яка осідає на субстраті. Температура субстрату є критичною і може впливати на виникнення різних реакцій.[6]

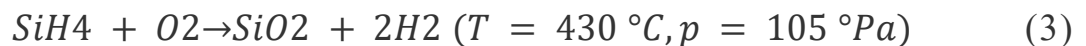
Існує кілька типів CVD процесу, включаючи хімічне осадження парів атмосферного тиску, осадження парів металоорганічним хімічним осадженням, хімічне осадження парів хімічного тиску низького тиску, лазерне хімічне осадження парів, фотохімічне осадження пари, хімічна інфільтрація пари, епітаксія хімічного пучка, хімічна пара в плазмі осадження та осадження хімічного випару, посилене плазмою.

Різні види цих процесів поділяють за способами запуску хімічних реакцій та за умовами протікання процесу. Розглянемо декілька найбільш популярних процесів які використовуються на сьогоднішній день.

1.3.1 CVD при атмосферному тиску — CVD-процес буде проходити саме при атмосферному тиску.

APCVD - метод при нормальному тиску (атмосферному тиску), який застосовується для осадження легованих та недоторканих оксидів. Осаджений оксид має низьку щільність і покриття помірно через відносно низьку температуру. Через вдосконалені інструменти APCVD переживає ренесанс. Висока пропускну здатність пластин є великою перевагою цього процесу.

В якості технологічних газів використовуються силан  $\text{SiH}_4$  (сильно азотний  $\text{N}_2$ ) та кисень  $\text{O}_2$ . Гази термічно розкладаються при температурі близько  $400^\circ\text{C}$  і реагують один з одним, утворюючи бажану плівку.[7]



Доданий озон  $\text{O}_3$  може спричинити кращу відповідність, оскільки покращує рухливість накопичених частинок. Оксид є пористим і електричним нестабільним і його можна ущільнити високотемпературним процесом.

Щоб уникнути ребер, які можуть спричинити труднощі при нанесенні додаткових шарів, для прошарків використовується фосфорне силікатне скло. Для цього фосфін додають до  $\text{SiH}_4$  та  $\text{O}_2$ , так що осаджений оксид містить від 4 до 8% фосфору. Велика кількість фосфору призводить до високого збільшення властивостей потоку, однак може утворюватися фосфорна кислота, яка роз'їдає алюміній (провідникові шляхи).

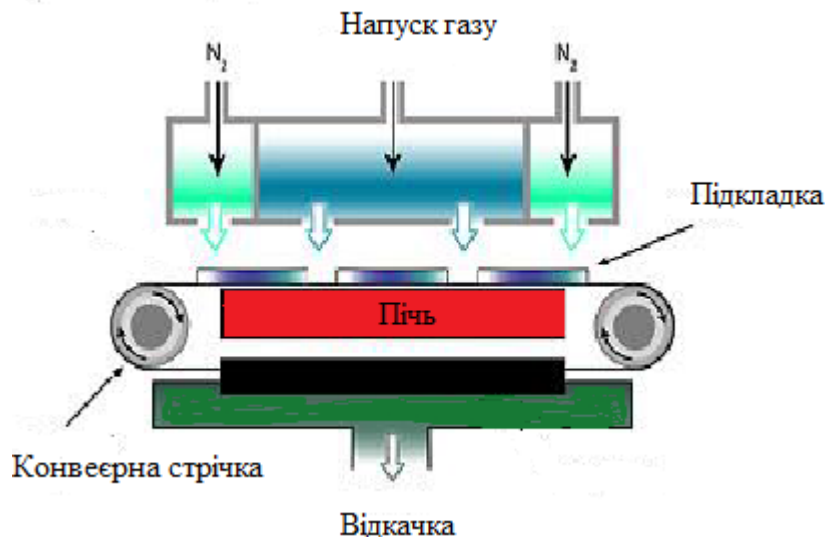


Рисунок 1.3 Конструкція реактора який при атмосферному тиску

### 1.3.2 CVD при пониженому тиску

CVD-процес проходитиме при тиску не златно нижче атмосферного. Використовується це для того, щоб знизити імовірність небажаної реакції та супроводжує до найбільше рівномірного покриття плівки на підкладці. У LPCVD використовується вакуум. Можуть бути створені тонкі плівки нітриду кремнію (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), оксинітриду кремнію (SiON), SiO<sub>2</sub> та вольфраму (W). Процеси LPCVD забезпечують високу відповідність майже 1. Це відбувається через низький тиск від 10 до 100 Па (атмосферний тиск = 100 000 Па), що призводить до нерівномірного руху частинок. Частинки поширюються через зіткнення і покривають вертикальні поверхні, а також горизонтальні. Відповідність підтримується високою температурою до 900 ° C. Порівняно з APCVD щільність і стабільність дуже високі.[8]

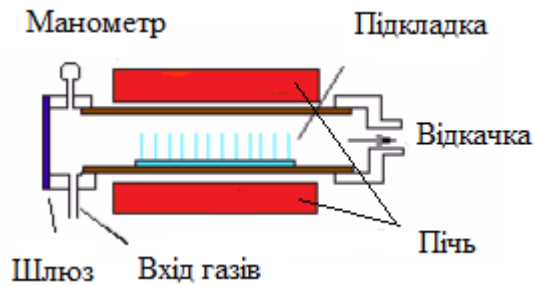


Рисунок 1.4 Конструкція реактора який працює при пониженому тиску

Процес LPCVD може здійснюватися в реакторі з кварцової трубки холодного або гарячого стін. Печі з гарячими стінами дозволяють проводити серійну обробку і, отже, високу пропускну здатність. Вони також забезпечують хорошу теплову рівномірність і, таким чином, утворюють рівномірні плівки. Недоліком систем гарячих стінок є те, що осадження також відбувається на стінках печі, що вимагає більшого обслуговування для очищення або можливої заміни трубки, щоб уникнути лущення відкладеного матеріалу та подальшого забруднення частинок. Реактори холодної стінки потребують нижчого обслуговування, оскільки на стінках реактора немає осадження плівки.[6]

У LPCVD трубка евакуйована до низького тиску. Після того, як трубка знаходиться під вакуумом, потім пробірку нагрівають до температури осадження, яка відповідає температурі, при якій розкладається газ-попередник. Температури можуть коливатися в межах 425-900 ° C, залежно від процесу та реактивних газів, що використовуються. Газ вводиться в трубку, де він дифундує і реагує з поверхнею підкладки, створюючи твердофазний матеріал. Потім будь-який надлишок газу викачується з трубки і проходить через систему відведення. Плівки LPCVD, як правило, більш рівномірні, менші за дефектами та демонструють кращу ступінчастість покриття, ніж плівки, виготовлені методами PECVD та PVD. Недоліком LPCVD є те, що він вимагає підвищення температури, що обмежує типи підкладки та інших матеріалів, які можуть бути присутніми на зразках.

### 1.3.3 CVD посилений плазмою.

CVD-процес, він використовує плазму для збільшення реакції швидкості реакції та розкладання прекурсора. Також саме цей метод дозволяє осаджувати при більш низьких температурах. Він використовується для осадження тонких плівок із газового стану (пари) у твердий стан на підкладці. У процесі беруть участь хімічні реакції, які виникають після створення плазми реагуючих газів. В основному плазма створюється радіочастотним змінним струмом частотою або розрядом постійного струму між двома електродами, простір між якими заповнений реагуючими газами.

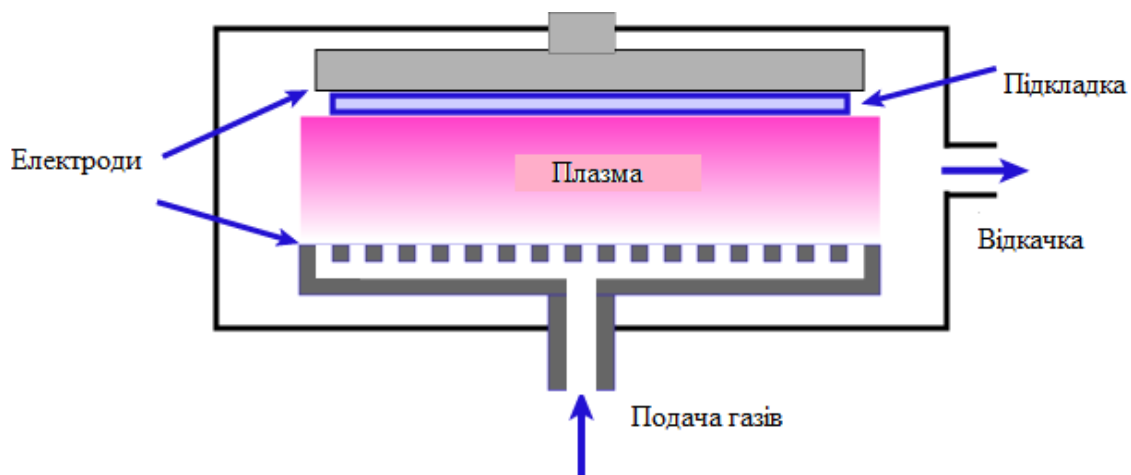


Рисунок 1.5 Конструкція реактора з використанням плазми

Плазма - це будь-який газ, в якому значний відсоток атомів або молекул іонізований. Фракційна іонізація в плазмах, що використовуються для осадження та пов'язаних з ними матеріалів, коливається від приблизно 10–4 у типових ємнісних розрядах до 5–10% у індуктивних плазмах високої щільності. Обробку плазми, як правило, виконують при тиску від декількох мілітор до кількох торр, хоча дугові розряди та індуктивні плазми можуть запалюватися при атмосферному тиску. Плазми з низькою фракційною іонізацією представляють великий інтерес для обробки матеріалів, оскільки електрони настільки легкі, порівняно з атомами та молекулами, що обмін енергією між електронами та нейтральним газом дуже неефективний. Отже, електрони можуть підтримуватися при дуже високих

еквівалентних температурах - десятках тисяч кельвінів, що еквівалентно середній енергії декількох електронвольтів, тоді як нейтральні атоми залишаються при температурі навколишнього середовища. Ці енергетичні електрони можуть викликати багато процесів, які в іншому випадку були б малоімовірними при низьких температурах, таких як дисоціація молекул-попередників та створення великої кількості вільних радикалів.[6-7]

Друга користь осадження всередині розряду впливає з того, що електрони більш рухливі, ніж іони. Як наслідок, плазма, як правило, більш позитивна, ніж будь-який об'єкт, з яким вона стикається, оскільки в іншому випадку великий плавний потік електронів перетікає з плазми до об'єкта. Різниця напруги між плазмою та предметами в її контактах зазвичай відбувається в тонкій області оболонки. Іонізовані атоми або молекули, що дифундують до краю оболонки, відчувають електростатичну силу і прискорюються до сусідньої поверхні. Таким чином, всі поверхні, які піддаються впливу плазми, отримують енергетичне іонне бомбардування. Потенціал на оболонці, що оточує електрично ізольований об'єкт (плаваючий потенціал), як правило, становить лише 10–20 В, але набагато вищий потенціал оболонки досягається за допомогою регулювання геометрії та конфігурації реактора. Таким чином, плівки можуть піддаватися енергетичному іонному обстрілу під час осадження. Це обстріл може призвести до збільшення щільності плівки та сприяти видаленню забруднень, покращуючи електричні та механічні властивості плівки. При використанні плазми високої щільності іонна щільність може бути досить високою, що відбувається значне розпилення осадженої плівки; цей розпилення може бути використаний для планування плівки та заповнення траншей або лунок.[9]

#### 1.4 Методи дослідження параметрів тонких плівок

Речовина у вигляді тонкої плівки є своєрідний стан матерії, за своєю структурою і характеристиками часто помітно відрізняється від цієї ж речовини в масі. Тому, якщо відомий показник заломлення, щільність, електропровідність або інші властивості речовини в масі, не можна без достатніх підстав приписувати їх значення тонкій плівці. Дослідження показують, що характеристики плівок надзвичайно чутливі до умов, в яких вони отримані. Цим пояснюються значні розбіжності в оптичних та інших фізичних постійних плівок, що приводяться різними дослідниками для одних і тих же речовин.

Оптичні методи визначення товщини тонких плівок або пластин, мабуть, отримали розвиток раніше інших методів. З тих пір як Ньютон виявив, що колір тонких предметів визначається їх товщиною, цей ефект інтенсивно використовується для визначення товщини плівок.[9]

При відсутності поглинання оптичними характеристиками тонкої плівки служать показник заломлення і товщина (геометрична або оптична). Властивості тонкої плівки як оптичної системи залежать від властивостей навколишнього середовища, від характеристик джерела і приймача випромінювання. Якщо товщина плівки порівнянна з довжиною хвилі випромінювання, то спостерігаються в ній явища інтерференції і поляризації світла можна використовувати для визначення зазначених оптичних характеристик.

В даний час для контролю товщини осаджуючих плівок широко використовують дві групи методів. Це методи оптичного контролю і методи, які використовують кварцові осцилятори.

Методи оптичного контролю засновані на явищі багатопроменевої інтерференції світла.

Історично першим був найпростіший метод контролю, який дозволяв контролювати осадження тільки чвертьхвильових покриттів. Суть методу полягає в наступному: випромінювання від білого джерела світла, проходячи через спеціально встановлюється світлофільтр, проходить через «свідок» (скло відомої товщини і відомим коефіцієнтом заломлення) і потрапляє на фотоприймач. За відсутності покриття на «свідка» фотоприймач буде детектувати максимум інтенсивності проходить випромінювання. При оптичній товщині осаджуючої плівки  $\lambda / 4$  буде детектуватиметься мінімум інтенсивності. Що означатиме закінчення осадження шару необхідної товщини.

Подальшим розвитком методу оптичного контролю став метод широкосмугового спектрального моніторингу . Як впливає з назви методу, в ньому використовуються випромінювання широкого спектра. Шляхом комп'ютерного моделювання можна з дуже високою точністю прогнозувати зміну спектра пропускання «свідка» в міру осадження тонкої плівки. Таким чином, метод дозволяє контролювати товщину осаджуючої плівки протягом усього процесу, не прив'язуючись до одного світлофільтри, а, значить, і одній довжині хвилі.

Інший широко використовується групою методів контролю товщини осаджуючих плівок є методи кварцового контролю.

Вимірювання товщини осадженої плівки в методах кварцового контролю базується на зміні частоти власних коливань датчика в міру збільшення його маси. Датчики в цих методах контролю являють собою монокристал кварцу, до обох сторін якого прикріплений провідникової електрод (як правило, тонкий шар золота). Спрощений прилад кварцового контролю зображений на малюнку 1.6

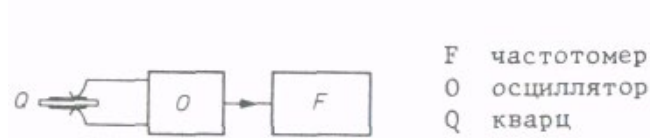


Рисунок 1.6 Спрощений прилад кварцового контролю

За наявними даними, використання спрощеного приладу кварцового контролю дає точність вимірювань близько 3%. Точність кварцового контролю можна збільшити майже на порядок (приблизно до 0,2%), якщо підтримувати стабільну температуру датчика, що є досить важким завданням, чи якщо використовувати прилад з двома датчиками (рис. 3.3). У приладі кварцового контролю осадження плівки виробляється тільки на один з датчиків, показання другого є опорними. Але для цього приладу дуже важливо, щоб датчики перебували в однакових температурних умовах.

#### 1.4.1 Оптичні методи

Метод відображення (пропускання) світла плівкою, обложеної на прозорій підкладці. Товщина зростає інтенсивність світла, що проходить через плівку, зменшується. Точність 10 - 15%.

Безконтактний фотометричний метод контролю. Заснований на зондуванні зростаючої плівки променем лазера і аналізі інтерференційної картини. Відбувається відображення від поверхні плівки і від кордону плівка - підкладка. Внаслідок інтерференції коефіцієнт відображення залежить від товщини. Для усунення перешкод використовується опорний промінь.[10]

Еліпсометрія. При висвітленні підкладки лінійно поляризованим світлом складові випромінювання (паралельна і перпендикулярна площині падіння) відображаються по-різному, в результаті після відображення випромінювання виявляється еліптично поляризованим. Вимірюючи еліптичності визначають властивості плівок

#### 1.4.2 Метод профілометрії

Параметри шорсткості поверхні - один з найважливіших показників якості продукції, що працює з великим зносом. Шорсткість - це одна з найважливіших експлуатаційних характеристик рухомих механізмів, виробів, двигунів внутрішнього згоряння. Саме від шорсткості залежить коефіцієнт тертя, корозійна стійкість, зносостійкість, і інші механічні характеристики деталей.

Таким чином, на поверхнях робочих деталей постійно відбуваються процеси, які можуть надавати на них негативний вплив. До таких процесів відносять: поява тріщин, механічний знос, який зумовлює тертям, ерозія, корозія металу, зминання, поява задирок. Такі дефекти можуть надавати навіть більший негативний вплив на роботу всього механізму, ніж деформація тіл, в результаті перегріву або гідроудару. До речі, перегрів може виникати і від посиленого тертя, в тому числі, викликаного підвищеною шорсткістю.

Якщо додати поверхні деякі мікрогеометрична властивості, то можна підвищити опірність деталі різних зовнішніх впливів, і тим самим, поліпшити параметри міцності і надійності.

Значення параметрів поверхні деталі, які змогли б забезпечити хороші експлуатаційні характеристики, можна підвищити шляхом технологічної обробки поверхні - тобто шліфування. Виміряти якість вже обробленої поверхні можна за допомогою приладів, що вимірюють шорсткість: профілометра і профілографа.

Відзначимо, що різниця в технічному будову та принцип дії у даних приладів невелика. Відрізняються вони, по-суті, тільки способом надання результатів. Профілометр відображає значення вимірюваного параметра шорсткості на спеціальному індикаторі (вбудованому дисплеї або шкалі). Профілограф, в свою чергу, представляє результати вимірювань в кінці всієї процедури у вигляді графіка - так званої профілограми, яка представляє собою криву лінію. Профілограмма, зазвичай, потребує аналізу і розшифровки.[11]

### 1.4.3 Поляриметричний метод

Метод еліпсометрії, який відноситься до поляриметричних методів, заснований на тому, що в загальному випадку світло після відбиття від досліджуваного зразка змінює свою форму поляризації.

Сукупність методів вивчення поверхонь рідких і твердих тіл станом поляризації світлового пучка, відбитого цією поверхнею і переломлених на ній. Падаючий на поверхню монохроматичне плоскополяризоване світло набуває при відображенні і ламанні еліптичну поляризацію внаслідок наявності тонкого перехідного шару на межі розділу середовищ. Залежність між оптичними постійними шару і параметрами еліптично поляризованого світла встановлюється на підставі формул Френеля.

На принципах еліпсометрії побудовані методи чутливих безконтактних досліджень поверхні рідини або твердих речовин, процесів абсорбції, корозії та ін.

### 1.4.4 Метод інтерферометрії

Вимірами за допомогою інтерферометра займається дисципліна інтерферометрія.

Інтерферометри застосовуються як при точних вимірах довжин, зокрема в верстато- та машинобудуванні, так і для оцінки якості оптичних поверхонь і перевірки оптичних систем в цілому.

Для точних вимірювань площинності і паралельності поверхонь різних деталей використовуються плоскі скляні пластини. Вони виготовляються у вигляді циліндрів розміром близько десятка сантиметрів з відполірованими підставами, які і служать для вимірювань методом інтерференції. При вимірі площинності поверхні вона прикладається до одної основи пластини плоскою скляною, яка через другу основу висвітлюється монохроматичним світлом. Якщо вимірювана

поверхню досить плоска, на освітленій поверхні пластини плоскою скляною утворюються рівні паралельні інтерференційні смуги. У разі відхилень від площинності смуги виходять в різного ступеня вигнутими.

#### 1.4.5 Метод ІЧ- спектроскопії

Цей метод аналізу заснований на записі інфрачервоних спектрів поглинання речовини. Поглинання речовиною в області інфрачервоного випромінювання відбуваються за рахунок так коливань атомів в молекулах. Коливання підрозділяються на валентні (коли в ході коливання змінюються відстані між атомами) і коливальні (коли в ході коливання змінюються кути між зв'язками).

Переходи між різними коливальними станами в молекулах квантованими, завдяки чому поглинання в ІЧ-області має форму спектра, де кожному коливанню відповідає своя довжина хвилі. Зрозуміло що довжина хвилі для кожного коливання залежить від того які атоми в ньому беруть участь, і крім того вона мало залежить від їх оточення. Тобто для кожної функціональної групи (C = O, O-H, CH<sub>2</sub> та ін) характерні коливання певної довжини хвилі, точніше кажучи навіть для кожної групи характерний ряд коливань (відповідно і смуг в ІЧ-спектрі). Саме на цих властивостях ІЧ-спектрів заснована ідентифікація сполук по спектральним даними. Однак не все так просто. По-перше метод ІЧ-спектроскопії не є розділяє методом, тобто при дослідженні будь-якого речовини може виявитися що досліджувалася насправді суміш декількох речовин, що звичайно сильно спотворить результати розшифровки спектра. Ну і все ж говорити про однозначну ідентифікації речовини за допомогою методу ІЧ-спектроскопії не цілком правильно, так як метод швидше дозволяє виявити певні функціональні групи, а не їх кількість в з'єднанні і їх спосіб зв'язку один з одним.

Дуже часто, в лабораторіях використовується ІЧ-спектрометр з Фур'є-перетворенням моделі «Spectrum One». Можливості приладу дозволяють проводити сканування в широкому діапазоні ІЧ-спектра з малим кроком сканування. Крім того в програмному забезпеченні приладу реалізована

можливість пошуку та ідентифікації речовини по ІЧ-спектрами за допомогою бібліотек ІЧ-спектрів. Ідентифікації в даному випадку проводиться програмним забезпеченням приладу і заснована по всі видимості на кількісному обрахунку і порівняно ІЧ-спектрів.

У нашій повсякденній практиці метод ІЧ-спектроскопії використовується при проведенні досліджень полімерних матеріалів, волокон, лакофарбових покриттів, наркотичних засобів (при ідентифікації наповнювача в якості якого часто виступають вуглеводи в тому числі полісахариди). Особливо метод незамінний при дослідженні мастильних матеріалів, тим що дає можливість одночасного визначення природи як основи мастильного матеріалу, так і можливих добавок (присадок) до цієї основи.

ІК-Фур'є спектроскопія - технологія аналізу для ідентифікації невідомих хімічних речовин. Метод заснований на мікроскопічному взаємодії інфрачервоного світла з хімічною речовиною за допомогою процесу поглинання. ІК-Фур'є спектроскопію використовують для ідентифікації хімічного складу речовин. З її допомогою можна виявляти водневі зв'язку атомів. У різних роботах по-різному ідентифікують характеристичні піки зв'язків, в таблиці 1 наведені дані з робіт дослідників.

Таблиця 1 - Характеристичні піки зв'язків з різних джерел

№ ист.	Тип зв'язку та волнове число піку			
[39]	Si-N ~840 $\text{cm}^{-1}$	Si-O 1100 $\text{cm}^{-1}$	O-H 1500 $\text{cm}^{-1}$	Si-H 2180 $\text{cm}^{-1}$
[40]	Si-N ~850 $\text{cm}^{-1}$	N-H 1150-1200 $\text{cm}^{-1}$	Si-H 2000-2150 $\text{cm}^{-1}$	-
[41]	Si-N 850-860 $\text{cm}^{-1}$	Si-N 850-860 $\text{cm}^{-1}$	Si-O 1080 $\text{cm}^{-1}$	N-H ~1160 $\text{cm}^{-1}$
[42]	Si-N 830 $\text{cm}^{-1}$	Si-O 1100 $\text{cm}^{-1}$	N-H 1160 $\text{cm}^{-1}$	Si-H 2200 $\text{cm}^{-1}$
[43]	Si-N 890 $\text{cm}^{-1}$	Si-H 2180 $\text{cm}^{-1}$	N-H 3340 $\text{cm}^{-1}$	-
[44]	Si-N 860 $\text{cm}^{-1}$	Si-O-Si 1100 $\text{cm}^{-1}$	Si-H 2160 $\text{cm}^{-1}$	-
[45]	Si-N 830-860 $\text{cm}^{-1}$	SiN-H 1150-1200 $\text{cm}^{-1}$	Si-H 2150 $\text{cm}^{-1}$	-
[46]	Si-N ~850 $\text{cm}^{-1}$	N-H 1175 $\text{cm}^{-1}$	Si-H 2000-2150 $\text{cm}^{-1}$	-
[47]	Si-N 840 $\text{cm}^{-1}$	Si-O 1100 $\text{cm}^{-1}$	Si-H 2160 $\text{cm}^{-1}$	-
[48]	Si-N 835 $\text{cm}^{-1}$	N-H 1171 $\text{cm}^{-1}$	Si-H 2188 $\text{cm}^{-1}$	-

Розмір і положення піку типу зв'язку несе достатньо інформації. Для одного і того ж типу зв'язку збільшення піку в висоту говорить про більшій кількості елементів даного типу зв'язку в плівці. Чим вже пік в ширину, тим більше кристалічна структура у речовини. зсувхвильового числа максимуму піку, говорить про зміну кількості хімічних елементів в плівці. Наприклад, зміщення піку зв'язку Si-N говорить про те, що змінилося вплив оточуючих атомів, пов'язано це зі збільшенням або зменшенням вмісту азоту в плівці.

Для аналізу складних піків вдаються до розкладання їх на складові [14] в спеціальних програмах. Для кількісного аналізу концентрацій зв'язків необхідно коефіцієнт пропускання перевести в коефіцієнт поглинання, використовуючи закон Бугера, який виражає залежність між поглинательної здатністю і товщиною шару речовини. Потік паралельних променів монохроматичного світла при

проходженні через гомогенну яка поглинає середу послаблюється по експоненціальному закону:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot d), \quad (3)$$

де  $I_0$  - інтенсивність падаючого монохроматичного випромінювання;  $I$  - інтенсивність минулого монохроматичного випромінювання;  $d$  - товщина яка поглинає шару;  $\alpha$  - коефіцієнт поглинання, індивідуальна характеристика речовини для кожної довжини хвилі.[15-16]

Залежність коефіцієнта поглинання від хвильового числа можна використовувати для оцінки концентрації зв'язків різних речовин, тому що площа смуги поглинання пропорційна концентрації зв'язків. Маючи еталонний спектр, можна отримати кількісне значення концентрації зв'язків досліджуваного зразка. Кількісна оцінка концентрації може бути зроблена при умови знання значень коефіцієнтів екстинкції коливальних груп, які істотно залежать від хімічної природи речовини. Коефіцієнти екстинкції визначають експериментально, дані наводяться в літературі.

Концентрація зв'язку визначається за формулою:

$$C = \frac{S}{\varepsilon}, \quad (4)$$

де  $S$  - інтегральна інтенсивність смуги поглинання (площа піку);  $\varepsilon$  -

коефіцієнт екстинкції.

Коефіцієнт екстинкції пов'язаний з молекулярною коефіцієнтом екстинкції через полуширину смуги поглинання:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \cdot H, \quad (5)$$

де  $\varepsilon_m$  - молекулярний коефіцієнт екстинкції;  $H$  - півширина смуги поглинання.

## Висновки до Розділу 1

В даному розділі було детально розглянуто основні положення про детектори, детально описані фізичні властивості матеріалу InSb, та чому саме він найбільш корисний при використанні в спеціальних призначеннях.

Розглянуто найбільш популярні методи ізоляції в вигляді плівок, та описано які найчастіше використовуються. Саме тому, далі описані різні методи контролю, аналізу та вимірювання як діелектричних характеристик так і товщини плівок. Також, враховуючи, що робота пов'язана з покриттям діелектричних плівок, в подальшому для використання в військових або спец призначеннях, розглянуто найбільш популярні методи хімічного осадження, та зроблений аналіз по кожному з них, який показаний в таблиці 2.

Таблиця 2. Порівняльний аналіз

Вид методу	Переваги	Недоліки
APCVD	Низька вартість процесу, проста конструкція, гарна швидкість осадження.	Низька продуктивність, забрудненість вихідних плівок, важкість контролю процесу
LPCVD	Нижча температура ніж у APCVD, гарне покриття і однорідність товщини плівок	Низька швидкість осадження, вартість процесу.
PECVD	Гарна однорідність плівок, швидкість осадження, гарне покриття, можливість використання в інших процесах	Вартість процесу, забрудненість плівок залишками частинок реакції.

Розглянувши переваги та недоліки, визначено, що найбільш ефективним для поставлених цілей, буде використання методу хімічного осадження з використанням плазми. Зрозуміло, що після проведення процесу, необхідно очистити пластини від забруднень, це і робить процес більш вартісним, але саме за допомогою цього методу, ми отримуємо найбільш ефективний результат.

## 2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ФОРМУВАННЯ ПЛІВОК ЗА МЕТОДОМ ХІМІЧНОГО ГАЗОФАЗНОГО ОСАДЖЕННЯ

### 2.1 Підготовка пластини для проведення хімічного осадження

Наявність на поверхні підкладки різного роду забруднень призводить до різкого зниження відсотка виходу придатних виробів на наступних технологічних операціях. Забруднення підкладок зазвичай відбувається при механічній обробці напівпровідникових злитків і пластин (різанні, шліфування та полірування), а також за рахунок адсорбції різних речовин з технологічних середовищ.

Серед всіх видів забруднень особливу увагу слід приділяти органічним забруднень, так як вони при нагріванні розкладаються і виділяють газоподібні речовини (кисень, оксид і діоксид вуглецю, пари води і інші.), які в значній мірі погіршують наступні технологічні процеси (дифузії, епітаксії, осадження захисних діелектричних плівок і ін.).

Для повного очищення підкладки від забруднень необхідно вибрати технологічний процес, який включав би в себе ряд послідовних операцій, кожна з яких дозволяла б видаляти з поверхні один або кілька видів забруднень.

При виборі остаточного технологічного процесу очищення напівпровідникових підкладок слід пам'ятати про економічні аспекти цього процесу і будувати його таким чином, щоб при мінімальних витратах отримати найбільш чисту поверхню. В цьому випадку треба завжди виходити з вимог по чистоті поверхні підкладки, що диктуються тією технологічною операцією, на яку надходять ці підкладки.[12]

Найпростішим способом очищення є механічна очистка поверхні. Вона призначена для видалення механічних забруднень, таких як: залишки окалини і іржі, великих скупчень мастильного матеріалу.

При механічному очищенні поверхню обробляють металевими щітками, наждачним папером і протирають ганчір'ям. Дану очищення в основному

застосовують при обробці поверхні металевих елементів вакуумної камери, внутрішньокамерних пристроїв і пристосувань [5].

Грубе хімічне очищення використовується для видалення з поверхні оброблюваних деталей видимих органічних забруднень, таких як: залишки масел, мастильні матеріали, барвники, відбитки пальців і жирові плями. Щоб видалити продукти очищення і забезпечити якісний стан поверхні після грубої хімічної очистки рекомендується застосовувати м'які тканини типу бязі і ін.

Тонку хімічну очистку в розчинах неорганічних кислот і лугах, а також в парах органічних розчинників застосовують для забезпечення якісної підготовки поверхні перед нанесенням покриття.

Для інтенсифікації процесу очищення використовують ультразвукові ванни; процес очищення ведуть, як правило, при температурі розчину вище кімнатної.[13]

Основні хімічні речовини, що застосовуються для очищення поверхні, наведені в Таблиці 3.

Ультразвукове очищення видаляє великі жирові забруднення завдяки інтенсивному локальному перемішуванню під дією ударних хвиль, створюваних в розчиннику. В ході промивки розчинник, насичений домішками, необхідно безперервно видаляти з поверхні підкладки; при цьому його замінює чистий розчинник. Механічні коливання, що створюються на підкладці, сприяють видаленню макро забруднень, лусочок металів, пилу та ін.

Таблиця 3. Характеристики деяких хімічних розчинників застосовуються для очищення поверхні

Розчинник	Призначення
Бензин з низьким октановим числом	Видалення грубих жирних забруднень і первинне очищення вакуумної камери і внутрішньокамерних пристроїв після механічної обробки
Бензин з високим октановим числом	Повторне очищення поверхні після обробки бензином низької якості
Ізопропіловий спирт	Видалення ефірних масел (замінник етанолу, етилового спирту)
Етиловий спирт (етанол)	Розчинення лакофарбових матеріалів
Ацетон	Розчинення перхлорвінілових і поліакрилових лаків, ацетатів целюлози та ін.
Тетрахлорид вуглецю	Очищення поверхні металів і деяких полімерів, наприклад полістиролу (в процесі обробки можливо травлення поверхні)
Трихлоретилен	Обезжирення поверхні металів, видалення масел, жирів, воску

При використанні ультразвукової ванни з частотами 20-50 кГц усунення забруднень відбувається за рахунок кавітаційного ефекту. Явище кавітації полягає в «схлопуванні» газових бульбашок, що утворюються при стисненні і розширенні рідини. При використанні ультразвукової ванни, в розчині, що омиває пластину, створюються змінні стискають і розтягують напруги, під дією яких утворюються бульбашки .

Ефективність ультразвукового очищення в основному визначається частотою коливань; крім того, воно залежить від потужності випромінювання і температури

розчинника. Фактично ультразвукове очищення ефективно видаляє тільки великі забруднення, тому рекомендується її завершувати знежиренням в парах органічних розчинників.

З підвищенням частоти збільшується проникаюча здатність рідини за рахунок зменшення довжини хвилі коливань, зменшується ймовірність руйнування зразків за рахунок зменшення розмірів кавітаційних бульбашок. З підвищенням потужності УЗ-коливань до певних значень інтенсивність кавітації зростає. Підвищення температури підвищує розчинність забруднень і впливає на умову виникнення кавітації. Для кожної рідини існує оптимальна температура обробки .

Обробку пластин і підкладок зазвичай ведуть при ультразвукових коливаннях, коли кавітація відсутня і очищення інтенсифікується за рахунок вихрових акустичних потоків рідини.

Ультразвукові коливання значно підвищують продуктивність і поліпшують якість не тільки знежирення, а й інших операцій рідинної обробки.

Схема обробки пластин в ультразвуковій ванні показана на Рис. 2.1.

Для видалення залишків органічних розчинників використовують промивання деонізуючою водою.

Після промивання в деонізуючій воді підкладку слід витягувати таким чином, щоб мінімізувати кількість рідини на поверхні. Решта на поверхні краплі води після висихання проявляться у вигляді видимих плям, що змінюють властивості формованого покриття. Тому краплі води слід здувати струменем чистого Обезпилення повітря або видаляти за допомогою центрифуги.

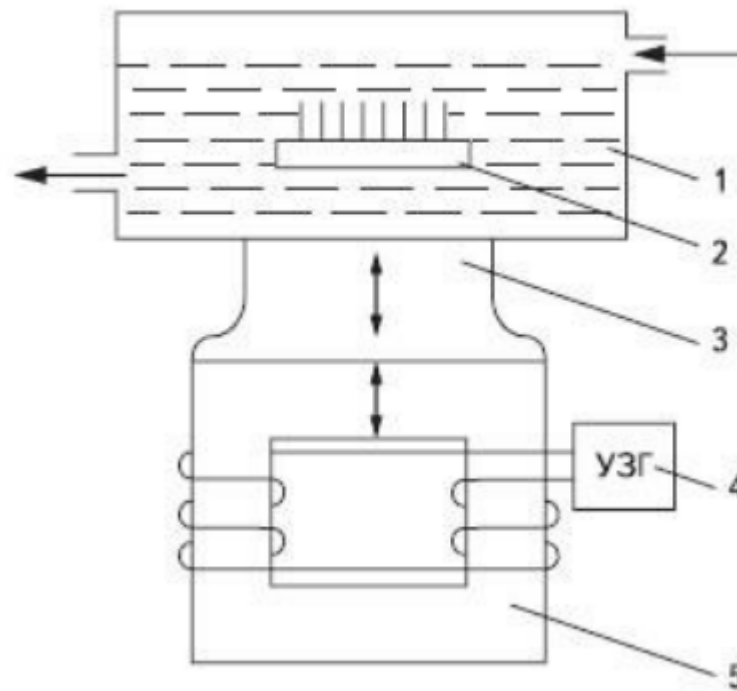


Рис. 2.1. Схема процесу ультразвукового очищення в протоці розчинника

1 - ванна; 2 - касета з пластинами; 3 - концентратор; 4 - Генератор  
ультразвукових коливань; 5 - магнітострикційний випромінювач

Сушка проводиться в паровому очищувачі або в чистій печі з використанням гарячого очищеного повітря або азоту. Очищення поверхні підкладки необхідно проводити безпосередньо перед приміщенням у вакуумну камеру, так як при тривалому очікуванні чистота поверхні може бути порушена, що призведе до зниження якості осаджаємой плівки.

Зазвичай після хімічної очистки, промивки в дистильованій воді і сушки підкладка надходить в камеру металізації. При цьому можливо повторне забруднення поверхні внаслідок адсорбції молекул різних речовин з навколишнього повітря.

Недоліком хімічної підготовки поверхні є також і те, що ця обробка в принципі не забезпечує видалення фізично адсорбованої вологи, тим більше хемосорбірованной. Фізична адсорбована волога виділяється в процесі відкачування тільки прогрівом підкладок в вакуумі при високій температурі.[14]

В рамках даної роботи у всіх експериментів з відпрацювання технології для проведення ультразвукового відмивання використовувалася ультразвукова ванна Водолій.



Рис. 2.2. Зовнішній вигляд ультразвукової ванни, що використовувалася для очищення

В якості хімічного розчинника використовувався ізопропіловий спирт. Ізопропіловий спирт, він же ізопропанол - це прозора безбарвна рідина з різким «спиртовим» запахом. Він досить просто змішується з органічними розчинниками і водою. Цей спирт не залишає розлучень після випаровування і тому вважається відмінним засобом для чищення оптичних лінз, дзеркал, глянцевої скляної і металевих поверхонь, а також для обробки поверхні підкладки. В якості підкладок у всіх експериментах використовувалися шліфовані пластини оксиду алюмінію з шорсткістю Ra 1,6 мкм. Перед нанесенням покриття проводилася підготовка пластин, яка полягала в наступному. Пластини відмивалися в розчині підігрітого ізопропілового

спирту в ультразвукової ванні протягом 10 хвилин. температура відмиваючої рідини становила 40 ° С. Сушка пластин проводилася при кімнатній температурі.

## **2.2 Протікання процесу хімічного осадження із газової фази**

Плазмохімічне осадження з газової фази є основним методом, що дозволяє отримувати плівки нітриду кремнію при порівняно низьких температурах (100-400 ° С).

Даний метод заснований на реакції хімічної взаємодії вихідних газоподібних реагентів, що призводять до утворення плівки на поверхні твердого тіла, за допомогою передачі енергії частинок, необхідних для протікання хімічних реакцій. Процеси відбуваються в плазмі високо- і надвисокочастотних розрядів низького тиску.

Температура електронів утворюється плазми становить аж до декількох тисяч кельвінів (типове значення для ВЧ розряду  $2 \cdot 10^4$  К). Перебіг хімічних реакцій дозволяє полегшити утворення великої кількості активних частинок, таких як радикали, молекули в збудженому стані, іони і іон-радикали за рахунок зіткнень високоенергетичних електронів з молекулами вихідних реагентів. При цьому як опромінення поверхні підкладки інтенсивним випромінюванням видимого і ультрафіолетового діапазонів, так і бомбардування її частками сприяє більш активному протіканню поверхневих процесів.

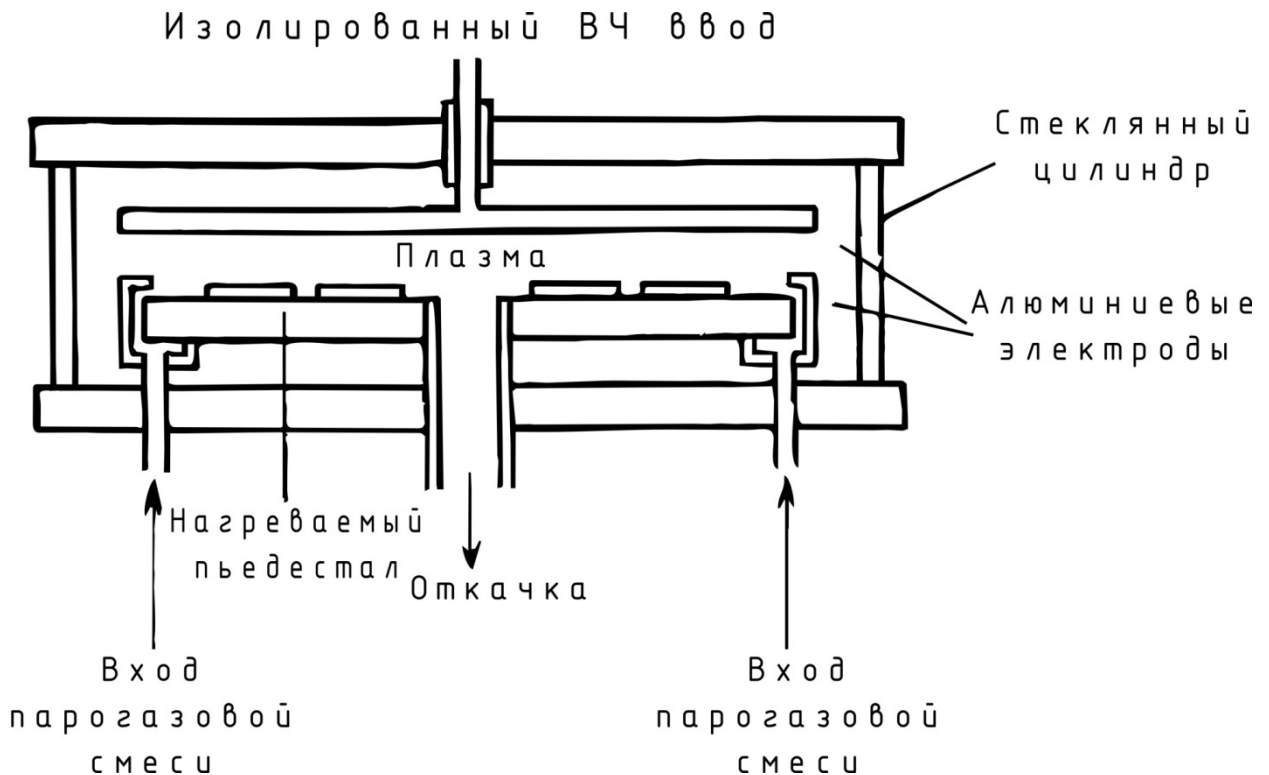
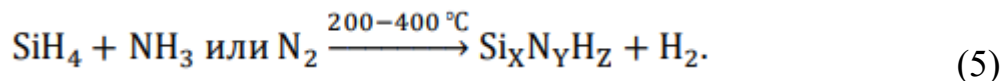


Рисунок 2.3 Схема реактору плазмового осадження з електродами.

При осадженні нітриду кремнію в тліючому ВЧ розряді зазвичай використовуються вихідні реагенти у вигляді силана і аміаку або азоту і реакція протікає в такий спосіб



Коли в якості джерела азоту використовують молекулярний азот, точерез його значно меншій швидкості дисоціації в порівнянні з  $\text{SiH}_4$  потрібен великий надлишок азоту ( $\text{N}_2 / \text{SiH}_4 \gg 10^2$ )

В процесі, щоб уникнути утворення збагаченої кремнієм плівки. Аміак, навпаки, може дисоціювати багатоступінчасто зі споживанням малої енергії, що забезпечує формування плівки активним азотом.

Плазмохімічне осадження з газової фази з індукційним збудженням розряду. Дана технологія є методом низькотемпературного осадження  $\text{Si}_3\text{N}_4$  плівок, в

якому індукційна котушка створює високо - щільну, великого діаметра плазму, в маленькому діапазоні тисків.

Технологія дозволяє проводити процес при більш низькому робочого тиску, скоротити кількість газу необхідного для осадження, а також знизити температуру процесу. Типові значення витрати газів для неї складають від 10 до 50 см<sup>3</sup>/ Хв. Більш низька швидкість осадження дозволяє виробляти більш точний контроль над параметрами тонких плівок, а процеси можуть протікати при температурі в діапазоні від 50 ° С і вище. При отриманні кремнійових з'єднань потрібно вихідний газ силан.

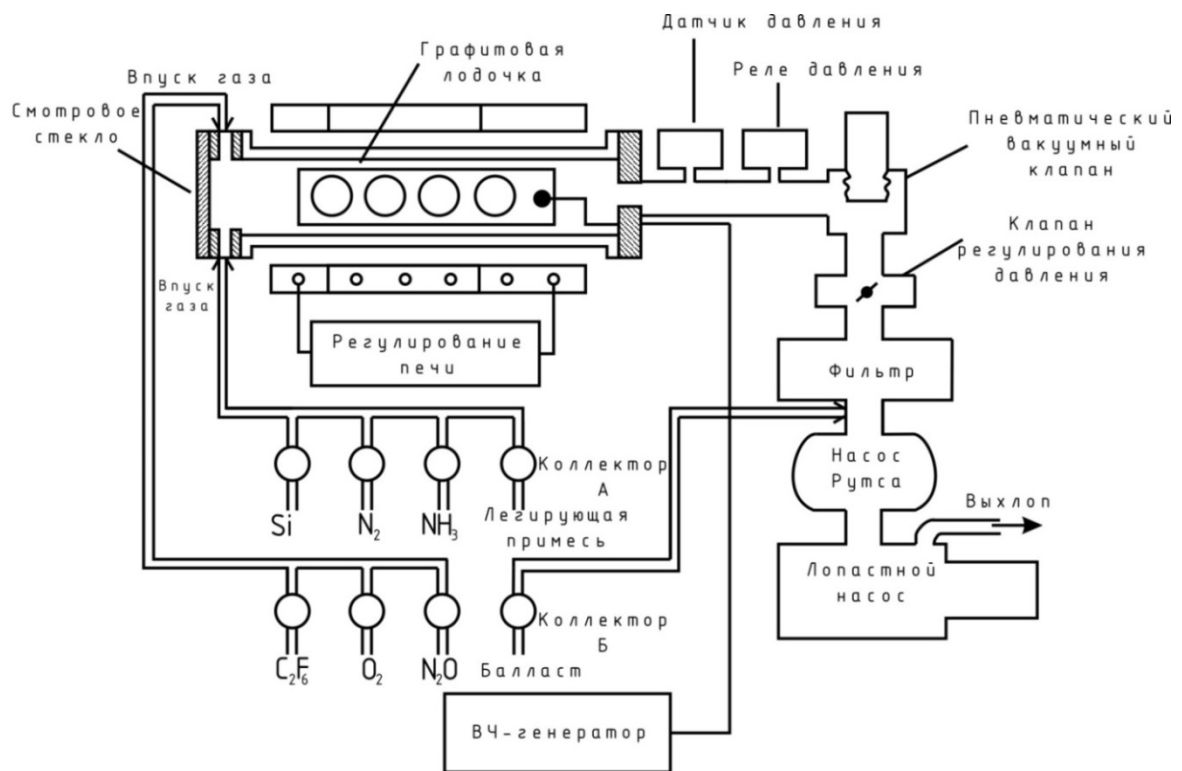


Рисунок 2.4. Реактор плазмохімічного осадження для поштучної обробки пластин

Сілан надходить в реактор через газорозподільне кільце, навколишній столик. Другий робочий газ вводиться через верхню частину камери, де ВЧ котушка іонізує її, створюючи різні радикали і іони. Електростатична різниця потенціалів між плазмою і столиком рухає іони до поверхні пластини, де вони

хімічно з'єднуються з сіланом, створюючи плівку. Типовий додатковий газ для нітриду кремнію - N<sub>2</sub>.

Ставлення потоку додаткового газу до потоку силана може бути використано для зміни показника заломлення обложеного матеріалу. Для плівки нітриду кремнію з показником заломлення 2,0 відношення потоків газів SiH<sub>4</sub> до N<sub>2</sub> - від 1,18 до 1,28. Значення показника заломлення також залежить від тиску в камері під час процесу і підводиться ВЧ-потужності.

Важливим параметром є напруженість (сила з якою плівка стискає або розтискає пластину, стрес) плівки. Його можна регулювати, змінюючи тиск в камері, потужність, що підводиться. Значення напруги плівки може змінюватися з негативного на позитивний, і також можливо нульове значення.

Побічним продуктом реакції силану і азоту є водень, який повинен випаровуватися, але деяка частина все-таки потрапляє в плівку. Кількість його в плівці залежить від технологічних параметрів і негативно впливає на якість плівки.

Головна перевага даної технології в порівнянні з класичним плазмохімічним осадженням - це його низька температура. Це дозволяє забезпечити мінімальну деградацію пристрою при високих температурах.

### **2.3 Обробка пластини після використання методу хімічного газофазного осадження**

Після проведення процесу хімічного осадження шорсткість поверхонь покриття пластини може збільшуватися, тому для уникнення всіх недоліків і забезпечення округлення різальних крайок пластини піддають «сухому» поліруванню, наприклад, на установках різних фірми, таких як Otec (Німеччина), Multi-Finish (Німеччина) та інших. Зазвичай, загальний вигляд установки та схеми мають

вигляд на рисунку 2.5.а , на якому представлена модель фірми Otex, а саме ДФ-35 для «сухого» полірування.



Рисунок 2.5 Установа для сухого полірування[26]

а) загальний вигляд

б) схема роботи

У процесі роботи та установки пластини, закріплюються в швидкозмінні кріплення, та вони здійснюють різноспрямовані кругові руху в нерухомому абразивному середовищі, вміщеного в робочу ємність (Рис. 2.5, б). Безконтактне обертання пластин зі змінною швидкістю і глибиною занурення в спеціально підібрану абразивну середу. Це дозволяє досягнути максимальну рівномірність обробки та максимально хорошу відтворюваність результатів. В якості абразивного середовища тут використовують, як приклад, гранули оксиду алюмінію - корракса або суміш, що складається з 70% карбиду кремнію зернистістю 1,4 мм та 30% гранул грецького горіха зернистістю 1,6 мм [17-18].

## Висновки до Розділу 2

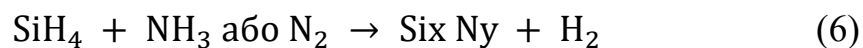
В цьому розділі детально розглянуто процес формування діелектричної плівки на пластинах InSb. А саме, починаючи від підготовки пластини, маршруту формування та проведення його, та закінчуючи обробкою та очисткою пластин після проведення процесу хімічного осадження саме з використанням плазми. Якщо розглянути кожний пункт окремо, то одразу стає зрозумілу, що сам процес формування займає не так багато часу, як підготовка пластин та обробка їх після проведення, для забезпечення чистої поверхні та потім, гарних характеристик. Це знову ж таки повторює вище сказані слова, щодо затрат часу проведення процесу, враховуючи всі процеси разом.

### 3. ПРОВЕДЕННЯ ПРОЦЕСУ ТА АНАЛІЗ ПЛІВОК

#### 3.1 Проведення процесу хімічного газофазного осадження

Розглянувши попередньо методи хімічного осадження, було визначено, що для поставлених цілей, а саме формування плівки в заданому спектральному діапазоні: від 2 до 5мкм, найкраще використати метод хімічного осадження з використанням плазми, тобто PECVD, який розглянутий більш детально в підпункті 1.3.1.

Для дослідження використовувалися пластини напівізолюючого InSb з нанесеною плівкою нітриду кремнію методом плазмо-хімічного осадження. Осадження плівок проводилося при різних технологічних параметрах, дані представлені в таблиці 4. Час осадження плівок становить 15-20 хвилин. Температура осадження 300 °С. Хімічна реакція в процесі осадження:



Швидкість травлення плівки нітриду кремнію в рідинному хімічному травнику залежить від щільності плівки. Метод є руйнівним, вимагає виконання ряду додаткових операцій (фотолітографія, вимірювання товщини плівки до і після травлення), робота з небезпечними розчинами.

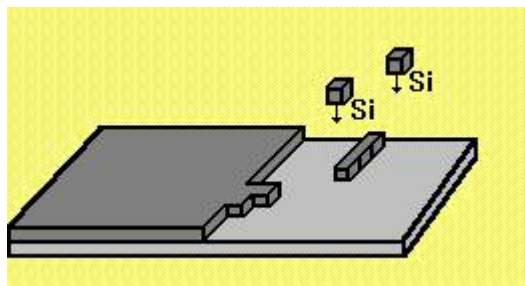


Рисунок 3.1 Формування діелектричного слою на підкладці

Дослідження структури та складу тонких пористих плівок Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> проводився за допомогою методу ІЧ - Фур'є - спектроскопії. Для цього використовувався прилад Фур'є - спектрометр «Інфралюм ФТ - 801». Він використовується для аналізу спектра електромагнітного випромінювання в ближній і середній ІЧ області, для отримання спектрів пропускання та поглинання твердих, рідких і газоподібних речовин (в тому числі наркотиків, лаків і фарб, нафтопродуктів, вибухових речовин, фармакологічних препаратів) з їх подальшою ідентифікацією, а також для якісного аналізу сумішей, що містять кілька компонентів, в лабораторіях судової експертизи, експертно-криміналістичних, митних, екологічних, науково-дослідних і навчальних лабораторіях; для контролю справжності ліків, якості сировини і продукції хімічних і фармакологічних виробництв, а також на інших підприємствах для вхідного і вихідного контролю продукції. [17]



Рисунок 3.2 Загальний вигляд спектрометра ФТ - 801

Робочий спектральний діапазон спектрометра від  $550 \text{ см}^{-1}$  до  $5500 \text{ см}^{-1}$ . Спектрометр забезпечує можливість вибору спектрального дозволу з ряду значень:  $1 \text{ см}^{-1}$ ,  $2 \text{ см}^{-1}$ ,  $4 \text{ см}^{-1}$  і  $8 \text{ см}^{-1}$ .

Спектрометр є на сьогоднішній день одним з найбільш малогабаритних в світі. Прилад автоматизований (використовується цифрова електроніка) і управляється комп'ютером (USB-інтерфейс).

Отже перед проведенням досліду, зразки пройшли хімічну обробку для очищення поверхні. Плівки нітриду кремнію використовувалися в якості пасивуючого покриття та отримані методом плазмового хімічного осадження, процес якого буде описаний нижче. Як було вже сказано, саме цей метод використовуємо для зменшення температурного режиму. Так як, технологія використання плівки в структурі мембрани датчика повинна мати високі вимоги щодо гарної адгезії, мінімальної шорсткості (до 15 нм) та гарної міцності та стабільності. Одні з ключових вимог – це рівень залишкової напруги, який залежить від самого складу газу, температури в реакторі, тиску в реакторі параметрів самої підкладки, та температурного режиму підкладки.[16]

Саме тому, в цій роботі основне дослідження було для встановлення взаємозв'язку між параметром процесу осаджуваної діелектричної плівки, тобто: потужність ВЧ генератору, потік робочого газу, а саме його швидкість, рівень напруги залишкової, та самої швидкості осадження. Саме підбором параметрів, можливо досягти заданого рівня напруги в плівці. Якщо, ми говоримо про метод хімічного осадження з використанням плазми, то в якості вихідних реагентів будуть силан, аміак або азот. За допомогою величин витрат, можливо дізнатись з яким елементом в подальшому буде пов'язаний водень, це або кремній або азот. Якщо ми збільшуємо рівень витрат силану, то він змістить розподіл водню в сторону Si – H зв'язку. В свою чергу, якщо збільшити витрати аміаку, то він знизить швидкість осадження плівки, та як наслідок, зменшить адгезію плівки з пластиною та зменшить її рівномірність. Це призведе із-за зменшення витрати силану.

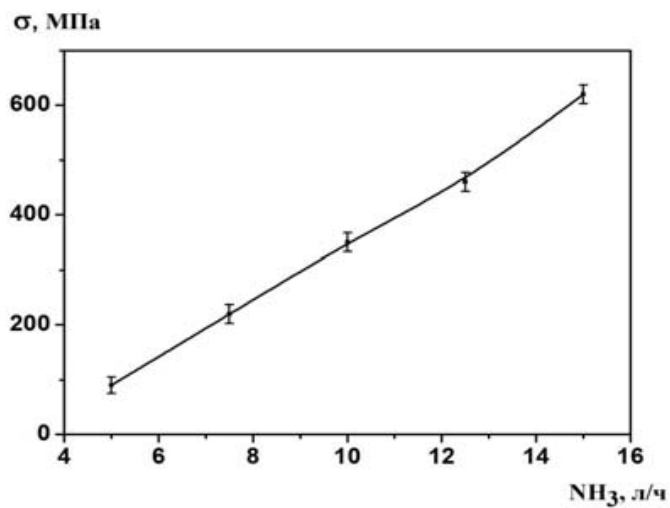


Рисунок 3.3 Залежність рівнів залишкової напруги від витрати аміаку

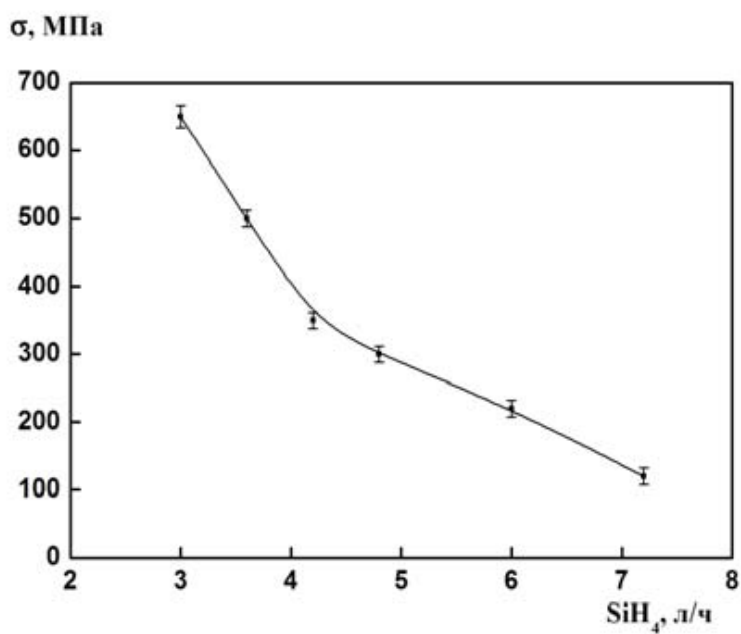


Рисунок 3.4 Залежність рівня залишкової напруги від витрати силану

В якості першого експерименту, були використані наступні параметри, які наведені в таблиці 4.

Таблиця 4. Параметри та співвідношення об'ємних витрат робочих газів

Витрата газів, л/год			Тиск, Па	Потужність ВЧ-генератора, Вт
SiH <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>	N <sub>2</sub>		
3	15	100	Від 60 до 120	800

Саме за рахунок того, що ми збільшили тиск, це призвело до того, що в камері збільшився вміст азоту у сформованому шарі, і це призвело до того, що в нас збільшився рівень залишкової напруги в самій плівці. Тому для підтвердження, були проведені ще 2 дослідів і в залежності від витрат та тиску ми отримали рівні залишкових напруг, які наведені в рисунку 3.5.

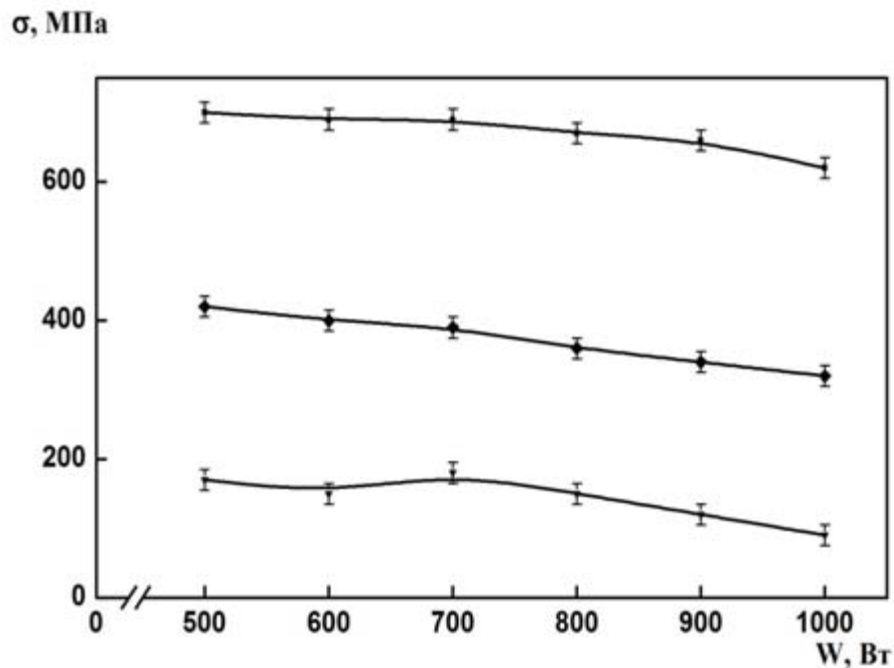


Рисунок 3.5 Залежність залишкової напруги від потужності генератора, в залежності від витрат газів.

В наступній таблиці приведені параметри ще 2 дослідів, які проводилися для того щоб намагатися отримати оптимальні параметри осадження. В подальшому проводилися ІЧ-спектроскопія, для отримання якісного та кількісного аналізу кожного з дослідів, та був в подальшому отриманий оптимальний режим витрати газів та параметрів ВЧ-генератору.[17]

Більш детально описано в останньому пункті цього розділу. В ньому буде описаний та наведений оптимальний режим нанесення, та більш детально описано методи аналізу отриманого зразка, за рахунок чого і визначено, що наш зразок виконує всі поставлені цілі.

### 3.2 Визначення товщини отриманої діелектричної плівки

Для визначення товщини діелектричних плівок, зазвичай використовують еліпсометри. В даній роботі також був використаний еліпсометр ЛЕФ-3м, який показаний на рисунку 3.6.



Рисунок 3.6 Загальний вигляд еліпсометра ЛЕФ-3м

Еліпсометр забезпечує особливо високу швидкодію і точність. Еліпсометрія призначений для прецизійних вимірювань товщини і оптичних параметрів тонких плівок, простих тонкоплівкових структур і об'ємних (в тому числі анізотропних) матеріалів і рідин. Забезпечується вимір ультратонких окремих шарів товщиною від 0.1 ангстрема.[19]

Як було вище сказано, еліпсометр призначений для вимірювання стану поляризації світлового пучка, яке визначається за результатами порівняння кутів повороту поляризатора, компенсатора та аналізатора.

Розташування оптичних елементів по ходу променя: лазер  $\lambda = 632,8$  нм, діапазон кута падіння пучка світла на зразок від 45 до 90 градусів.

Для вимірювання товщини плівок, проводили одразу 3 виміри. Це проводилося для визначення різниці товщини плівки по всій пластині. які показані на рисунку 3.7.

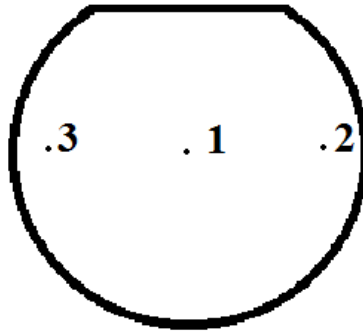


Рисунок 3.7 Схема вимірювання товщини плівки

### 3.3 Аналіз плівки методом ІЧ-спектроскопії

ІЧ-спектр молекули - це серія вузьких поглинань, кожна з яких відповідає певній вібрації або коливанню окремим груп атомів. Присвоєння окремих коливань певним смугам поглинання в спектрі базується на загальних можливих частотах різних типів коливань. Порівнюючи ІЧ-спектри, структури хімічних сполук та теоретичні розрахунки, було доведено, що в певних атомних групах, що входять до різних молекул, атомні коливання відрізняються незначно, тобто мало що залежить від того, до яких сполук належить ця група атомів. Такі смуги поглинання називають характерними. Це дає можливість провести якісний та кількісний аналіз коливального спектру (пропускання, відбиття, поглинання).

Якісний аналіз речовин, їх ідентифікація може бути проведений як для асоціацій, спектри яких вже відомі, використовуючи так звані методи "відбитків пальців", коли спектр записується порівняно з наявними в банках даних (інформаційно-пошукові системи), і для невідомих спектрів з використанням структурних

групових методів аналізу, які ґрунтуються на визначенні присутності різних структурних груп у молекулі за характерними спектральними променями (експертні системи *ems*).[20]

За допомогою ІЧ-спектроскопії, є можливість провести не тільки якісний, але і кількісний аналіз. Для оптичних спектрів є загальні закони поглинання, випромінювання, що дають залежність між кількістю поглинання і кількістю поглинаючої речовини. Залежність коефіцієнта поглинання від числа хвиль може бути використана для оцінки концентрації зв'язків різних речовин, оскільки площа смуги поглинання пропорційна концентрації зв'язків. Маючи еталонний спектр, можна отримати кількісне значення концентрації зв'язків тестового зразка. З типу спектрів можна зробити висновки про пористість оксидів. Тому, якщо ми будемо знати, що оксиди будуть частково пухкими, то в їх спектрах будуть спостерігатися досить широкі смуги поглинання. Метод ІЧ-спектроскопії дуже універсальний, за допомогою нього, є можливість вивчити дослідну речовину у всіх станах агрегації. Важливими перевагами спектрального методу є такі фактори, як висока чутливість (здатність записувати спектри навіть окремих молекул), при цьому без руйнування аналізуючої речовини. Наприклад, для основної смуги характерна напівширина  $90 - 100 \text{ см}^{-1}$  у цих умовах. У досить щільному та відносно досконалому термічно вирощеному оксиді пропускна здатність становить  $\Delta\nu = 73 \text{ см}^{-1}$

В даній роботі були отримані спектри пропускання плівок нітриду кремнію різних з різною товщиною. Тому, на рисунках 3.8 та 3.9 показані ІЧ-спектри пропускання плівок товщиною 0,54 і 0,73 мкм відповідно.[21]

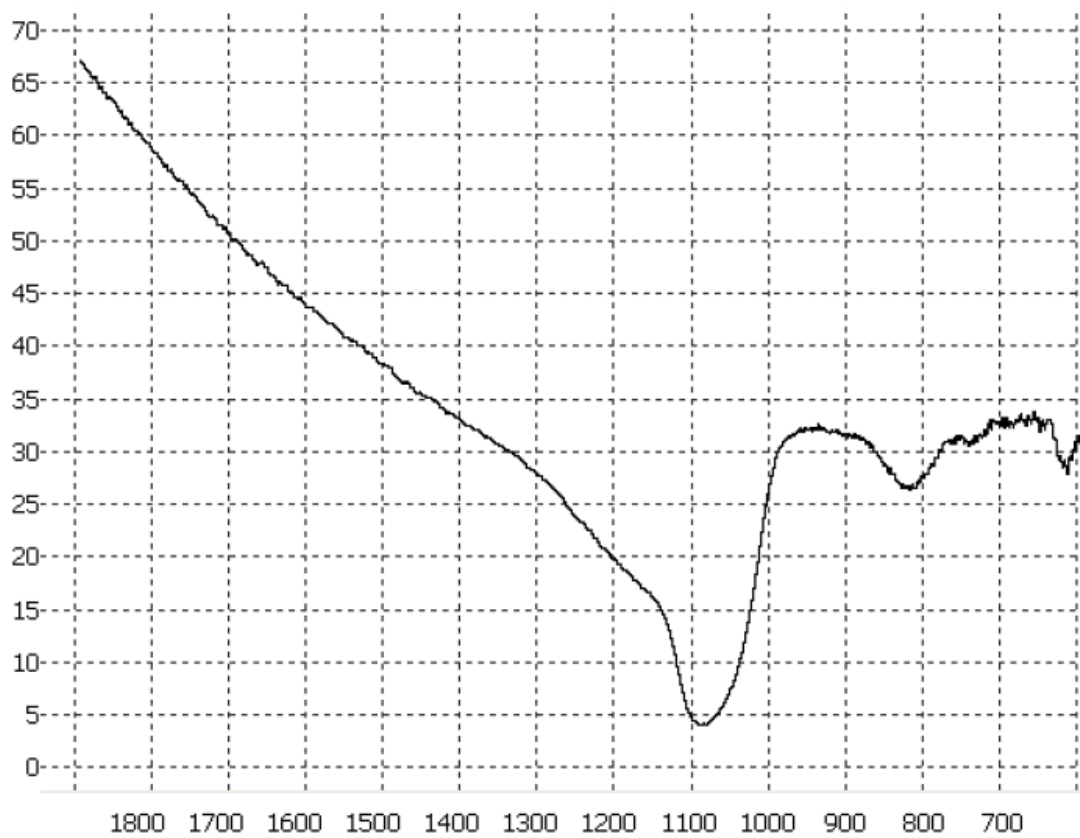


Рисунок 3.8 ІЧ- спектр плівки з товщиною  $d=0,54$  мкм



Рисунок 3.9 ІЧ- спектр плівки з товщиною  $d=0,73$  мкм

Якісний аналіз спектрів за допомогою використання таблиць, які містять інформацію про стан основних смуг поглинання плівок Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, які були розглянуті в розділі 1, показав, що наш спектр міститиме характерні смуги різної ширини та інтенсивності зв'язків Si-N, N-H, це буде свідчити про те, що зразки мають аморфну структуру. Також був проведений якісний аналіз плівок і розраховані концентрації зв'язків Si-N в зразках.

Також, за допомогою закону Бугера – Ламберта був проведений кількісний аналіз, який може зв'язати інтенсивність монохроматичного потоку світла, який буде падати на зразок  $I_0$ , та потім, пройшовши через нього через  $I$ , з молярним коефіцієнтом погашення та коефіцієнтом екстинції.[22]

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (7)$$

де:  $I$  - інтенсивність світла на глибині  $x$  матеріалу;

$I_0$  - інтенсивність світла на поверхні;

$\alpha$  - коефіцієнт поглинання.

За положенням нашої основи смуги ІЧ спектру пропускання та відповідної типу групи для наших зразків, були визначені за спектрами пропускання, та в якості використання літератури, яка була зазначена вище, були визначені та отриманні значення концентрації зв'язку Si-N. Вони наведені в таблиці 5

Таблиця 5. - Смуги ІЧ - спектрів пропускання зразків,  
отримані на Фур'є –спектрометрі

Номер зразка	Частота см <sup>-1</sup>	Тип групи	Тип коливання	Концентрація зв'язків
2	1073,06(9,32)	Si - N	$\nu$ асиметричне	1,97*10 <sup>20</sup>
	811,949(12,3)		$\nu$ симетричне	
3	1068,49(9,36)	Si - N	$\nu$ асиметричне	1,6*10 <sup>20</sup>
	815,859(12,16)		$\nu$ симетричне	

Саме за допомогою ІЧ-спектрометрії, ми змогли зробити розрахунки, які показали, що наші дослідні плівки мають пористість в деяких місцях. Тому, за допомогою методу спектроскопії, надалі ми зможемо виправити наш технологічний маршрут формування та нанесення плівок нітриду кремнію на пластини InSb.

### 3.4 Знаходження оптимального режиму та морфологія плівки

Отже, використавши метод ІЧ-спектроскопії, було визначено те, що плівки мали пористість, тому були змінені параметри витрат газів та зробивши розрахунки методом Бугера – Ламберта був знайдений та скорегований маршрут технологічного виготовлення та нанесення діелектричних плівок за допомогою методу плазми хімічного осадження. Було знайдено оптимально параметри витрат газів та більш детально проаналізовано за допомогою еліпсометра. Скореговані результати наведені в таблиці 6

Таблиця 6. Ефективні параметри оптимальних витрат робочих газів

Зразок №	Витрата газів, л/год			Тиск, Па	Потужність ВЧ-генератора, Вт
	SiH4	NH3	N2		
1	7,2	15	100	Від 60 до 120	1000

При знаходженні оптимальних параметрів осадження був проведений повторний процес, і було визначено, що саме при цих параметрах, ми отримаємо досить рівномірне покриття та рівень залишкових напружень в шарі буде перебувати в межах 90 – 100 МПа, а це є нормою. Тому, повторно був проведений дослід на еліпсометрі в трьох точках, які описані в розділі вище, та були отримані дані, наведені в таблиці 7.

Таблиця 7. Вимір товщини після проведення осадження

Час процесу, хв.	Товщина слою, мкм			Показник заломлення
	d1	d3	d2	
15	0,73	0,72	0,73	1,85

Щоб підтвердити рівномірність осадження, було досліджено зразок за допомогою мікроскопа. Проведення було необхідне, для того щоб підтвердити рівномірність осадження плівки. Після проведення, були отримані наступні результати:

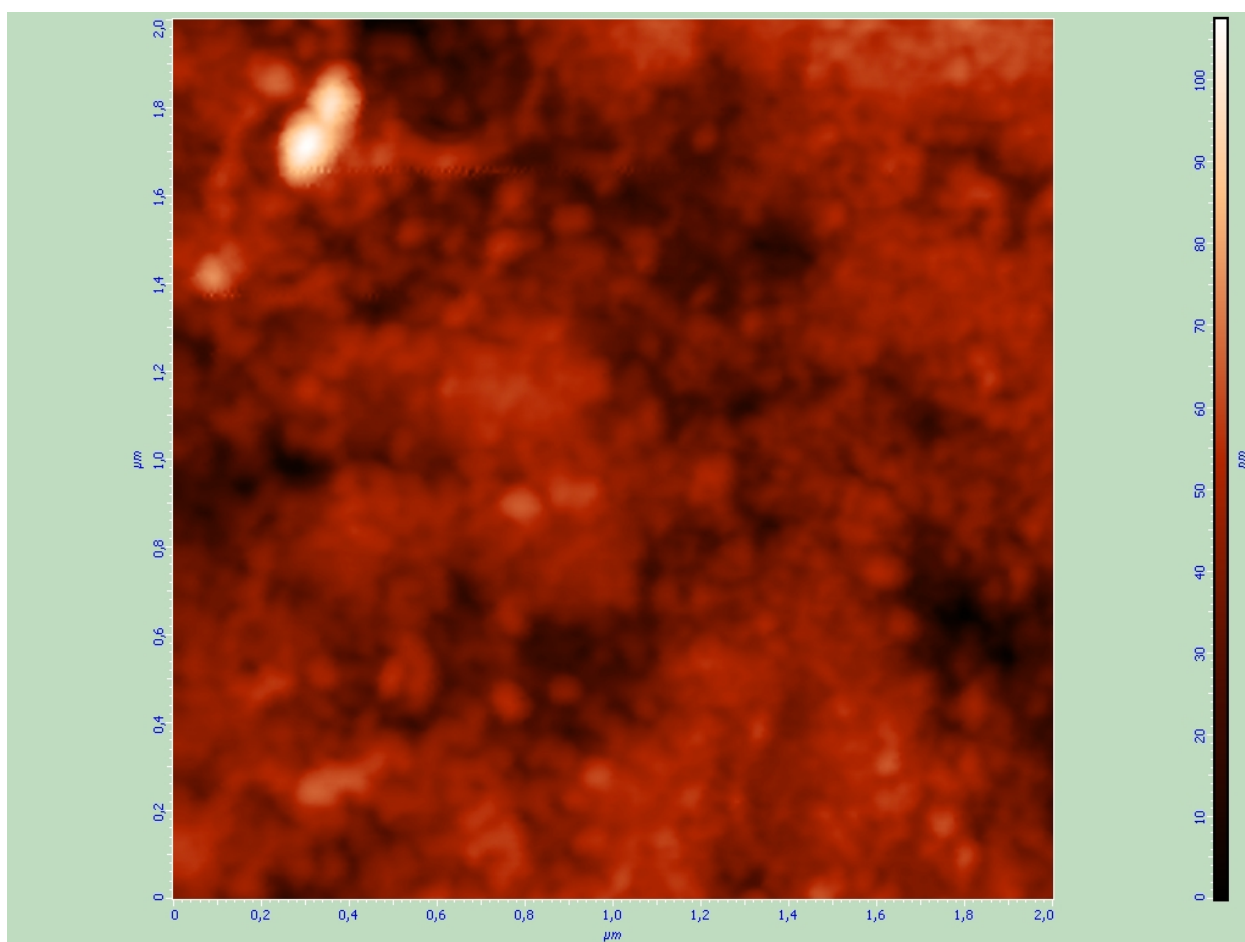


Рисунок 3.10 Морфологія зразка, 2мкм

Також вигляд в 3D режимі:

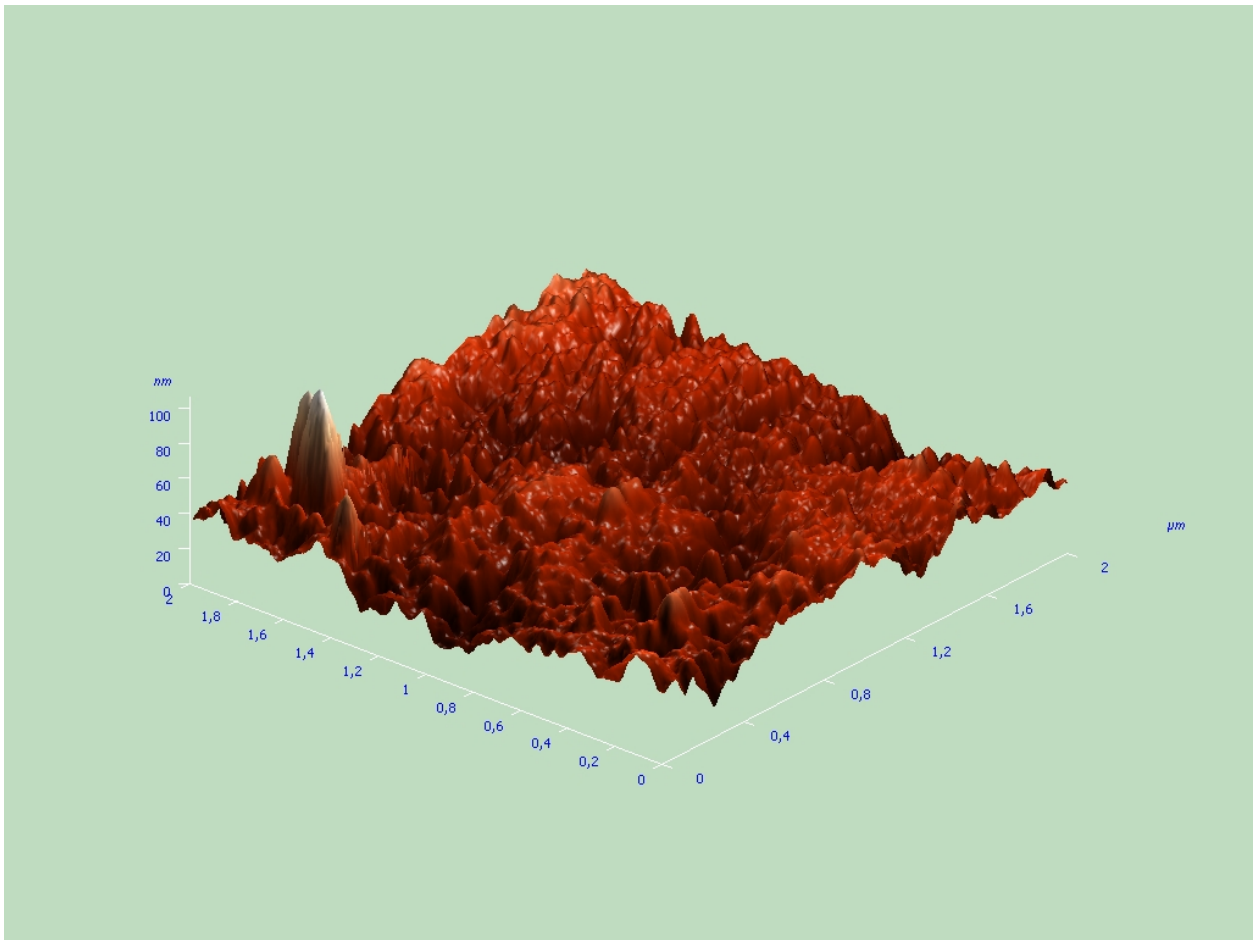


Рисунок 3.11 Морфологія зразка в 3D , 2мкм

Як бачимо, з рисунків, шар покриття має досить не поганий вигляд, тобто на зразок досить рівномірно була нанесена плівка та пористість є в межах норми. Надалі, програмно було визначено шорсткість досліджуваного зразка, яка становила 8 нм, а це є нормою, тому результат влаштовує в повному обсязі, враховуючи ще той фактор, що поставленою задачею було отримання стабільного зразка, за максимально рівномірним покриттям і що саме головне – в спектральному діапазоні 2 – 5 мкм, чого ми і змогли досягти.

### Висновки до Розділу 3

В результаті проведеної роботи було вивчено технологію плазмохімічного осадження нітриду кремнію на пластину. Проведено дослідження впливу технологічних параметрів на показник заломлення, проведений аналіз зразка за допомогою ІЧ-спектроскопію, на состав, та на властивості плівки SixNy. Визначено, що чим щільніше буде плівка, тим краще будуть її електрофізичні властивості. Освоєний метод еліпсометрії для вимірювання показника заломлення та товщини плівки та підсумовуючи всі методи, знайдений оптимальний режим нанесення, витрат газів та параметрів осадження.

## 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

### 4.1 Опис ідеї проекту

Розробимо стартап-проект для реалізації в виробництві в різних сферах.

В подальшому наведені таблиці, яке надають уявлення про зміст , конкретну спроможність та інші.

Таблиця 8 Опис ідеї проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Використання ІЧ-фотодетекторів	1. Військова галузь	Підвищення чутливості приладів наведення та виявлення, спрощене користування
	2. Медицина	Підвищення чутливості, та зменшення габаритів приладів обстеження пацієнтів
	3. Енергетика	Підвищення якості приладів для виявлення теплових втрат
	4. Служби порятунку	Пошук постраждалих
	5. Транспорт	Орієнтування в умовах поганої видимості

Діелектричні плівки, які досліджували в рамках цієї роботи відрізняються від конкурентів, так як вони більш стійкі, та мають кращі параметри в умовах спектрального діапазону 2-5 мкм.

Порівняємо з конкурентами:

Конкурент №1: Компанія InfraRed Associates

Конкурент №2: Компанія Hamamatsu

Конкурент №3: Компанія VISHAY

Таблиця 9 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/ п	Техніко- економічні характери- стики ідеї	<i>(потенційні) товари/концепції конкурентів</i>				W(слабка сторона)	N(нейтральна сторона)	S(сильна сторона)
		<i>Мій проект</i>	<i>Конкурен- т1</i>	<i>Конкурен- т2</i>	<i>Конкурент3</i>			
1.	Економіч- ні	800\$	400\$	150\$	2000\$	+		
2.	Надійніст- ь	Довговічність більше 10 років	Довговічність близько 10 років	Довговічність близько 10 років	Довговічність близько 10 років			+
3.	Технологі- чний	Необхідне охолодження	Необхідне охолодження	Необхідне охолодження	Працює без охолодження	+		
4.	Призначення	Близький діапазон	Близький	Середній	Близький		+	
5.	Безпеки	Безпечний	Безпечний	Безпечний	Безпечний		+	
6.	Екологічність	Екологічний	Екологічний	Екологічний	Екологічний		+	

#### 4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
1.	Виготовлення діелектричної плівки для ІЧ детектора	Хімічне осадження з газової фази	Наявна	Доступно
		Термічне окислення	Наявна	Доступно
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Обрана технологія виготовлення саме за допомогою хімічного осадження з газової фази, так як тільки при цьому методу можна досягти поставлених цілей, щоб бути ще більш конкурентно спроможними на ринку.				

#### 4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 10 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	7000 ум.од.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Розгортання великого виробництва
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	180%

Ринок привабливий для зростання виробництва, за умов наявного фінансування .

Таблиця 11 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Підвищенна чутливість датчиків	Компанії-виробники ІЧ-обладнання	-	Товар повинен мати гарні характеристики стійкості, та працювати в близькому діапазоні

Таблиця 12 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Наявність кваліфікованих кадрів	Продукт є науковим, тому необхідні кваліфіковані спеціалісти	Знаходження персоналу з досвідом роботи в цьому напрямленні

2.	Потреба в наявності ресурсів	Для налагодження виробництва необхідна наявність приміщень для безпосередньо виробництва та тестування працездатності продукту	Укладання договорів з науково-дослідними інститутами та поставниками ресурсів, оренда приміщень виготовлення та тестування продукту
----	------------------------------	--	---

Таблиця 13 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкурентність	Якість виробництва, кількість виробів	Покращення параметрів роботи
2.	Попит	Головне, це гарна якість, та дійсність характеристик поставлених вимог	Збільшення вартості за рахунок більшого попиту, та збільшення якості

Враховуючи головні фактори, стає зрозуміло, що саме головне – це якісне виготовлення, з дійсними характеристиками, які розглянуті вище, та стабільність роботи.

Таблиця 14 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції: - чиста	Досить велика кількість компаній	Кваліфікований персонал, та гарна якість продукції
2. За рівнем конкурентної боротьби:	Рівень як локальний, так і міжнародний	Головне- створення сайту, рекламна кампанія
3. За галузевою ознакою: - внутрішньогалузева	Боротьба між декількома компаніями, у яких досить схожі параметри, які необхідні споживачу, але різні технологічні процеси виготовлення	Пошук інформації конкурентів, вдосконалення технології
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Краща якість , зменшення ціни
5. За характером конкурентних переваг: - цінова	В основному продаж товарів за нижчими цінами ніж у конкурентів	Розробити технологію, за рахунок якої можливо здешевлення продукції
6. За інтенсивністю: - немарочна	Торгівельна марка не вирішальна	Реклама

Таблиця 15 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	InfraRed Associates Hamamatsu VISHAY	Збільшити виробництво	Продаж товару саме компанією та її реалізаторами	Вимоги якості та надійності	Відсутні
Висновки:	Висока інтенсивність через давню присутність конкурентів на ринку	Потенційні конкуренти можливі, але не передбачають - ся	Не диктують умови виготовлення	Максимальна доступність та якість товару	Обмеження немає

Для того, щоб здобути ще більш конкурентну спроможність, необхідно знайти якісний та кваліфікований персонал, саме за допомогою висококваліфікованих спеціалістів у цій галузі, та інженерів, можливе вдосконалення оптимального режиму виготовлення, як в подальшому, вихідних характеристик, якості товару та зменшення ціни за рахунок знаходження нових шляхів виготовлення.

Таблиця 16 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)

1.	Стійкість та чутливість товару	Конкуренти, не зможуть зрівнятися за стійкістю та чутливістю виготовлених продуктів
2.	Якість товару та його характеристики	Виготовлений продукт, має мати високу якість та спроможність працювати в різних умовах експлуатації
3.	Наукові ресурси	Кваліфікований персонал
4.	Ціна товару	Ціна продукту повинна бути на рівні конкурентів або навіть нижчою для приваблення потенційних покупців

Таблиця 17 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з "ЗМ"						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Стійкість та чутливість товару	19		+					
2.	Якість товару та його характеристики	18			+				
3.	Наукові ресурси	13					+		
4.	Ціна товару	15				+			

Таблиця 18 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Чутливість, стійкість та в цілому характеристики товару.	Слабкі сторони: Не достатня кількість кваліфікованих спеціалістів
--	---

<p>Можливості: При зменшенні ціни на товар, можливе збільшення попиту та фінансування деякого відсотку коштів для подальшого дослідження та знаходження нових можливостей виходу на ринок з кращими характеристиками продукту</p>	<p>Загрози: Відсутність персоналу, подальших досліджень в цій сфері, що може призвести до зменшення попиту, та в подальшому закриття підприємства</p>
---	---

Таблиця 19 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Знаходження нових інвесторів, компаній для продажу виготовлених товарів, знаходження персоналу, початок реалізації товару	75%	2 роки
2.	Знаходження компаній для збуту товару, знаходження наукового персоналу та ресурсів, зацікваленність інвесторів , налагодження процесу та виготовлення	60%	4 роки

	продукції		
--	-----------	--	--

#### 4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 20 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів в сприйнятти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Державні підприємства та установи	Висока	Високий	Висока	Середня
2.	Приватні Підприємства та установи	Середня	Середня	Середня	Висока
Які цільові групи обрано: Краще обрати цільову аудиторію за номером 1					

Таблиця 21 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні і позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Військова галузь	Військова галузь більш всього підходить для старту реалізації продукції за рахунок великої зацікавленості	Необхідні характеристики з великою стійкістю та за меншою ціною	Стратегія спеціалізації

За рахунок стратегії охоплення ринку вибрана 1 спеціалізація: військова галузь, тому це відноситься до стратегії спеціалізації.

Таблиця 22 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні	Так	Ні	Захоплення покупців конкурентів

Таблиця 23 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/ п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспро- можливі позиції власного стартап- проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Маленькі розміри, висока чутливість, менші ціни	Стратегія спеціаліза- ції	Максимальна удар на якість продукції для зниження браку	Гарна ціна та якість продукції, також довготривалий режим роботи та експлуатації виробів

#### 4.5 Розроблення маркетингової програми стартап- проекту

Таблиця 24 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Розмір виробу та максимально незалежність від охолодження	Висока якість, стабільність та чутливість та ціна	Конкуренти мають менш чутливі вироби, які кошують дорожче та не такі довготривалі

Таблиця 25 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Використання фотодетекторів у спеціальному призначенні, в спектральному діапазоні 2-5 мкм		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристик и	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	Стабільність Висока чутливість. Довготривалість		
	Якість: висока		
	Пакування: пластини		
	Марка: 'PddF'		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: наявність гарантії		
	Після продажу: після продажне обслуговування		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: щоб підтвердити, необхідний патент			

Таблиця 26 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари- замінники	Рівень цін на товари- аналоги	Рівень доходів цільової групи Споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	-	25-50 \$	5000 \$	22 - 47 \$

Таблиця 27 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Можливість замовлення через сайт, або на самому підприємстві	Контакт з покупцями, реклама.	Нульовий рівень каналу	Продаж від виробника до покупця через постачальн ика

Таблиця 28 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	В основному застосовується в військових цілях	Інформація передається від представника компанії до потенційного покупця	Стійкість, робота в відповідному спектральному діапазоні, чутливість	Поширення інформації про характеристики продукту.	В основному акцент зроблений на характеристиках та тонкощах роботи.

#### 4.6 Висновки

Так як ринок не дуже популярний, головною ціллю є знаходження кваліфікованого персоналу. Головний акцент необхідно зробити на ціні та режимах роботи товару. Щоб вийти на ринок першими будуть використані товари для військових цілей.

## ВИСНОВКИ

В ході роботи були виконані всі поставлені задачі та цілі.

Робота була присвячена дослідженню методу покриття діелектричних плівок за допомогою методу хімічного газофазного осадження. Основна вимога була виготовлення зразків для ІЧ фотодетекторів. Саме тому необхідно було налагодити процес формування, для досягання певних вихідних характеристик.

Для того щоб виконати всі цілі, було узагальнено літературні дані використання методу хімічного осадження. Розглянуто декілька видів та методів хімічного осадження. Розглянуто принципи їх роботи, особливості, переваги та недоліки.

Детально розглянуті методи дослідження характеристик діелектричних плівок після проведення процесу. Був проведений весь технологічний процес осадження плівок від підготовки пластин для проведення хімічного осадження, конструкція яка використовується для проведення осадження плівок, сам процес проведення та обробка зразків після його проведення.

Для досягнення мети, було проведено декілька дослідів, потім їх аналіз за допомогою методів ІЧ-спектроскопії, аналізу товщини плівок та інших метожеїв.

За допомогою ІЧ-спектроскопії був скорегований технологічний маршрут проведення осадження, та був знайдений оптимальний режим нанесення, витрат робочих газів. Слід відмити, що за допомогою цих параметрів, необхідно було отримати вихідний зразок, який працював би у спектральному діапазоні 2-5 мкм, що і було досягнуто.

Після проведення процесу з оптимальними параметрами, зразок був досліджений знову, та виміряна товщина плівки, показник заломлення. І головне, було проведено аналіз за допомогою тунельного мікроскопу для того щоб побачити морфологію зразка, а саме рівномірність плівки, адгезію та шорсткість зразка. В цілому, завдання, яке було поставлено в рамках цієї роботи, було виконано в повній мірі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ

1. Ковалгин А.Ю. Исследование процессов плазмохимического осаждения пленок нитрида кремния. // Автореф. дисс. на соиск. уч. степени к.т.н. С-Пб.,1995. – 9 стр.
2. Обижаев Д.Ю. Структура и свойства функциональных слоев нитрида кремния на различных стадиях их формирования в технологии устройств нано- и микросистем- ной техники. // Автореф. дисс. на соиск. уч. степени к.т.н. – М., 2007. – 22 с.
3. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.
4. Ковалгин А.Ю. Исследование процессов плазмохимического осаждения пленок нитрида кремния. // Автореф. дисс. на соиск. уч. степени к.т.н. С-Пб.,1995. – 9 стр.
5. Обижаев Д.Ю. Структура и свойства функциональных слоев нитрида кремния на различных стадиях их формирования в технологии устройств нано- и микросистем- ной техники. // Автореф. дисс. на соиск. уч. степени к.т.н. – М., 2007. – 22 с
6. Курносков А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М : Высшая школа, 1996. – С. 112.
7. Adams A.C., Alexander F. B., Capio C.D., Chracterization of Plasma- Deposited Silicon Dioxide // Electrochem. Soc. 1981. – №4. – P. 128.
8. Rosher R. S. Low pressure CVD production processes for poly, nitride and oxide // Solid state technol. – 1977. – №20. – P. 63.
9. Метфессель Э. Тонкие пленки, их получение и измерение. – М : Госэнергоиздат, 1963. – С.124–127.
10. Колесник Л.Л., Деев В.А., Селезнев А.В. Анализ возможности использования метода пароструйного осаждения для металлизации подложек // Вакуумная наука и техника: Материалы XX научно-

- технической конференции с участием зарубежных специалистов, 2013. С. 165-167.
11. Повышение адгезии токопроводящих покрытий на подложках оксида алюминия / Колесник Л.Л. [и др.] // Вакуумная наука и техника. Тезисы докладов XXIV научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов, Крым, 16-23 сентября 2017 г. С. 176-179.
  12. Красов В.Г., Петраускас Г.Б., Чернозубов Ю.С. Толсто пленочная технология в СВЧ микроэлектронике // М. : Радио и связь. 1985 г. 120с.
  13. Панфилов Ю.В. Расчёт режимов процесса нанесения тонких плёнок в вакууме и параметров оборудования. М. : Издательство МВТУ им Н.Э. Баумана. 1988. 16 с
  14. Технология тонких пленок (справочник) / Под. ред. Л. Майссела, Р. Гленга. Нью-Йорк. 1970. Пер. с англ. Под. ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко. М. : Советское радио. 1977. Т. 2. 768 с.
  15. Лебедева В. В. Техника оптической спектроскопии. – М : Моск. Уни-  
та, 1977. –376 с.
  16. High-Thermal Conductivity AlN Packages for High-Temperature Electronics., E.Savrun, QUEST Integrated, Inc., USA, 1995. 102 p.
  17. Кирсанов С.В., Гончаренко И.М., Бабаев А.С. Влияние «сухого» полирования твердосплавных образцов на характеристики износостойкого покрытия // Справочник. Инженерный журнал, 2013. № 4. С. 12–15.
  18. Zhang Q. X., Yu A. B., Yang R. Integration of RF MEMS and CMOS IC on a printed circuit board for a compact RF system application based on wafer transfer // IEEE Transactions on Electron Devices.– 2008.– Vol. 55, № 9.– P. 2484–2491.
  19. Крылова Т.Н., Бохонская И.Ф., Карапетян Г.А. Измерение прозрачных пленок на поверхности стекла эллипсометрическим и спектрофотометрическим методами// Опт. и спектр. – 1980, т.49,вып.4.,стр.802-808.

20. G. Kolodnyi, Yu. Golyaev, V. Azarova, M. Rasyov, N. Tikhmenev, Ion beam optical coatings for visible and near IR lasers. Proc. SPIE, v.4350, 120÷125, 2000.
21. А.Смит. Прикладная ИК спектроскопия. М.: Мир, 1982. - 328 с.
22. Дж. Джоунопулос, Дж. Люковски. Физика гидрогенизированного аморфного кремния/ Выпуск 2: Электронные и колебательные свойства / М.: Мир, 1988. - 448 с.