

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

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Інженерія захисних оптичних покриттів для офтальмологічного
використання
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи МНПм-18-1

Мосієць Д.О.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 «Мікро- та наносистемна
техніка»

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Мікро- та нанoeлектронні
прилади і пристрої»

Керівник проф. Бондаренко І.М.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри

Бондаренко І.М.

(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри

І.М.Бондаренко

« » 2020 р.

ЗАВДАННЯ НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Мосієць Данило Олегович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Інженерія захисних оптичних покриттів для офтальмологічного використання

затверджена наказом по університету від 16.04.2020 р. № 506 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10.06.2020 р.

3. Вихідні дані до роботи: виконати розрахунок та моделювання оптичних відрізувачих світлофільтрів:

- необхідна довжина хвилі для зрізу: 445 нм;

- шаровість плівки: тришарова;

- матеріали для фільтру: монооксид кремнію, фторид магнію;

- метод розрахунку: метод чвертьхвильової довжини шару

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Огляд літератури;

4.2 Вибір методу напилення;

4.3 Вибір методу розрахунку;

4.4 Вибір матеріалів для плівки;

4.5 Аналіз отриманих результатів.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) слайди презентації 14 штук

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на атестаційну роботу	16.04.2020	
2	Огляд інформаційних джерел за темою роботи	17.04 – 01.05	
3	Вибір та обґрунтування методу дослідження	01.05 – 14.05	
4	Складання і опрацювання математичної моделі досліджуваних процесів	14.05 – 28.05	
5	Опрацювання результатів дослідження та оформлення пояснювальної записки	28.05 – 5.06	
6	Подання роботи на кафедру	8.06.2020	

Дата видачі завдання 16.04.2020 р.

Студент _____ Мосієць Д.О.
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Бондаренко І.М.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 70 с., 36 рис., 11 формул, 20 джерел, 2 додатки

РОЗПИЛЮВАННЯ, ПЛІВКА, РОЗПИЛЮВАЧ, МОНООКСИД КРЕМНІЮ, КОЕФІЦІЄНТ ПРОПУСКАННЯ, КОЕФІЦІЄНТ ЗАЛОМЛЕННЯ, МАТЕРІАЛИ

Об'єктом роботи є плівка, яка напилюється на підкладку зі скла.

Мета роботи – дослідження методів напилювання тонких плівок, огляд експериментальних установок для напилювання та розрахунок плівки для збереження очей від впливу діапазону хвиль, які дорівнюють 445 нм і менше.

Метод дослідження – аналітично-розрахунковий аналіз оптичних характеристик плівок.

У роботі оглянуто різні методи розпилення плівок, представлено до огляду декілька експериментальних установок для напилювання, а також, розраховано оптичні властивості плівок з основним шаром з SiO.

Унаслідок виконання роботи визначено напрямок подальшої роботи по удосконаленні даної плівки.

ABSTRACT

The explanatory note contains: 70 p., 36 figures, 11 formulas, 20 sources, 2 supplements.

SPRAYING, FILM, SPRAYER, SILICON MONOXIDE,
TRANSMISSION COEFFICIENT, REFRACTION COEFFICIENT,
MATERIALS

The object of work is a film that is sprayed on a glass substrate.

The purpose of the work is to study the methods of spraying thin films, review of experimental installations for spraying and calculation of the film to protect the eyes from the effects of the wavelength range of 445 nm and less.

Research method - analytical and computational analysis of optical characteristics of films.

The article considers various methods of spraying films, presents several experimental devices for spraying, and calculates the optical properties of films with a base layer of SiO.

As a result of the work, the direction of further work to improve this film was determined.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 МЕТОДИ ВИГОТОВЛЕННЯ ОПТИЧНИХ ПОКРИТТІВ	10
1.1 Основні методи розпилювання та схеми роботи напилювачів	10
1.2 Експериментальне обладнання для виготовлення оптичних плівок методами термічного напилення	20
1.3 Властивості напилення плівок монооксиду кремнію	35
2 МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ОПТИЧНИХ ПОКРИТТІВ	42
2.1 Вступ	42
2.2 Метод перетворення Фур'є	43
2.3 Неоднорідні методи обчислення	48
2.4 Голковий метод	49
2.5 Глобальна оптимізація	50
3 РОЗРАХУНОК СТРУКТУРИ СВІТЛОФІЛЬТРІВ	52
3.1 Опис програмного забезпечення, використаного для розрахунку параметрів світлофільтра.	52
3.2 Завдання на роботу	54
3.3 Опис роботи у COMSOL Multiphysics	56
3.3.1 Опис фізичного процесів для моделювання	56
3.3.2 Інженерія покриття у програмному середовищі	59
ВИСНОВКИ	68
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	69
ДОДАТОК А	71
ДОДАТОК Б	73

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

УФ – ультрафіолетове

УРМЗ – Ухтинський ремонтно-механічний завод

ВУ – вакуумна установка

АВР – агрегат вакуумний ротаційний

ФРН – Федеративна Республіка Німеччина

ВЧ – високочастотні

ВСТУП

Нині в якості джерел штучного освітлення застосовують лампи розжарювання, галогенні лампи, люмінесцентні лампи і джерела світла на основі світлодіодів. Шкідлива, часто деструктивна дія випромінювання на елементи зорової системи і особливо сітківки пов'язана з короткохвильовою частиною спектру менше 450 нм. Очі мають два рівні захисту: звуження зіниці і лютеїновий шар на сітківці, що поглинає короткохвильове випромінювання. Основний рівень захисту – звуження зіниці еволюційно налаштований на максимум спектру випромінювання сонця (близько 480 нм). Оскільки в сонячному спектрі інтенсивність випромінювання на довжинах хвиль коротше 450 нм завжди менше інтенсивності на 480 нм, око адекватно захищається від надлишку випромінювання, прикриваючи зіницю. У штучних джерелах світла таке співвідношення інтенсивностей за рідкісним винятком не дотримується. Більше того, в них інтенсивність на 480 нм істотно менша, ніж в короткохвильовій частині спектру.

По мірі біологічної безпеки штучні джерела світла розділені на 4 групи: від нульової до третьої: 0 група (галогенні лампи), 1 група (лампи розжарювання), 2 і 3 групи ламп підвищеної небезпеки (люмінесцентні і світлодіодні лампи відповідно). Міра небезпеки залежить від потужності випромінювання і тривалості дії. Класичний сучасний білий світлодіод - це випромінюючий синій колір кристал, покритий люмінофором, що перевипромінює частину енергії синього світла в жовтій області. У двогорбій спектральній характеристиці білого світлодіода короткохвильова ($\lambda_{\text{макс}}$ поблизу 445 нм) і довгохвильова частині розділені провалом на $\lambda=480$ нм. Інтенсивність піку 455 нм може перевершувати інтенсивність на 480 нм від 7 до 10 разів для білих світлодіодів з високою колірною температурою: від 5500К до 6500К. При такому освітленні зіниця повністю відкрита і сітківка піддається дії деструктивного короткохвильового випромінювання.

Європейський стандарт по біологічній безпеці освітлення регламентує виробництво і застосування світлодіодних освітлювачів, в яких інтенсивність випромінювання на 480 нм по відношенню до випромінювання на 460 нм складає 40.

Аналогічна ситуація пов'язана з використанням енергозберіжливих компактних люмінесцентних ламп (КЛЛ), де джерелом випромінювання, що збуджує світіння люмінофора служить дуговий розряд в парах ртуті. На ринку масово представлені низько технологічні зразки КЛЛ з неконтрольованою товщиною люмінофора крізь який проходить лінійчатий спектр випромінювання ртутного розряду з інтенсивною короткохвильовою частиною.

Найпростіший спосіб захисту очей – окуляри. Проте затемнені окуляри з нейтральним спектром прозорості зменшують природну яскравість світла, що призводить до розширення зіниць, і, у свою чергу, до проникнення в око більшої кількості небезпечного випромінювання синьої частини спектру. Тільки окуляри із спеціальними фільтрами, що відрізають короткохвильове випромінювання, повноцінно захищають очі від ультрафіолетової і синьої частини спектру. Прикладом таких оптичних засобів, присутніх на ринку, є окуляри типу "Blueblocker", що відрізає синю частину спектру. В якості одного з варіантів таких покриттів можна запропонувати плівки SiO (монооксиди кремнію), що мають підвищене поглинання в синій частині.

1 МЕТОДИ ВИГОТОВЛЕННЯ ОПТИЧНИХ ПОКРИТТІВ

1.1 Основні методи розпилювання та схеми роботи напилювачів

Технологія виготовлення покриттів об'єднує різноманітні процеси, пов'язані з підготовкою оптичних деталей до нанесення покриттів, формуванням (нанесенням) покриттів, контролем їх характеристик. Для реалізації цих процесів використовуються різні методи і обладнання, вибір яких визначається вимогами до оптичних і експлуатаційними характеристиками покриттів.

Процеси нанесення плівкових покриттів на оптичні деталі умовно можна розділити на хімічні, електрохімічні, фізичні методи. До хімічних можна віднести ті процеси, при яких вихідна плівкообразуюча речовина зазнає змін свого вихідного складу при взаємодії з іншими компонентами або нагрітою підкладкою. Електрохімічні процеси мають такий же характер, але плівка утворюється в результаті проходження електричного струму через електроліт, компоненти якого осаджуються на підкладку. До фізичних можна віднести метод термічного випаровування у вакуумі і катодного розпилювання в розряді низького тиску [1].

Одним з найбільш ранніх методів створення просвітлюючих поверхневих плівок з низьким показником заломлення є обробка силікатного скла 50% нормальним розчином оцтової кислоти. Під дією кислоти відбувається вилугування розчинних гідроокисів і солей, в результаті чого на поверхні скла залишається рівномірний шар прозорого продукту з більш низьким, ніж вихідне скло показником заломлення. Технологія виготовлення плівки полягає в ретельному очищенню просвітлюваних деталей, після чого вони занурюються в розчин на час, необхідний для створення плівки. Контроль утворення плівки потрібної оптичної товщини проводиться візуально, за забарвленням поверхні. По видаленню з розчину вироб з

плівкою промивається у воді, а потім сушиться в струмені гарячого сухого повітря. Новоутворена плівка механічно і хімічно дуже стійка. Вона відноситься до нульової або 1-ої групи твердості. Найбільший ефект дає просвітлення скляних підкладок з великим показником заломлення. Як видно з самого методу, він може бути реалізований тільки на силікатних склах, які прозорі до 2-3 мкм, тобто у видимій і ближній інфрачервоній області спектра. В даний час технологія використовується тільки для просвітлення малих деталей складної конфігурації з високим показником заломлення. В інших випадках метод витіснений іншими способами.

Одним з ефективних методів виготовлення просвітлюючих, світлоподільних і інших покриттів є метод нанесення на поверхню деталі тонкої плівки чужорідної речовини, одержуваного з розчинів з'єднань, що легко гідролізуються, таких як: TiCl_4 , SiCl_4 , $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$, $\text{Ti}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$, $\text{TiCl}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2$, $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$, ZrOCl_2 , HfOCl_2 . В результаті гідролізу утворюються плівки відповідних оксидів: SiO_2 , TiO_2 , ThO_2 , ZrO_2 , HfO_2 . Ці оксиди прозорі від ультрафіолетової області спектра до 12 мкм [1].

Технологія отримання покриттів досить проста. Невелика кількість плівкоутворювального матеріалу наноситься на поверхню деталі методом центрифугування. Для цього деталь закріплюється на шпинделі мотора спеціального верстата і обертається з великою швидкістю, а на поверхню деталі подається розрахункова кількість плівкоутворювальної речовини. Розчин розтікається по поверхні, утворюючи рівномірну плівку, товщина якої визначається концентрацією розчину, швидкістю обертання і наступною термообробкою. Температура термообробки становить від 120 до 500 градусів за Цельсієм. У результаті термообробки плівка стабілізується і набуває відповідні характеристики: показник заломлення і товщину.

Описаним методом наносяться різні просвітлюючі, світлоподільні і інші покриття на деталі розміром більше 300 мм. Хороші рівномірні покриття виходять як на плоских, так і на сферичних деталях. Отримані покриття відносяться до 0-ої або 1-ої групи міцності і зберігають свої

властивості протягом десятків років. Особливості описаного методу не дозволяють здійснювати контроль покриття в процесі нанесення плівок. Однак ретельне дотримання технології виготовлення дозволяє забезпечити достатньо хорошу відтворюваність. Таким способом, наприклад, виготовлялися інтерференційні фільтри для ультрафіолетової області спектра. Дослідження оптичних характеристик в процесі виготовлення покриття проводиться на проміжних стадіях після термообробки чергового шару. При нанесенні наступних шарів можна вводити корективи в товщини наступних шарів. Одним з достоїнств методу є можливість нанесення плівок з сумішей вихідних матеріалів. Тим самим виходить коефіцієнт заломлення плівки, що лежить між мінімальним і максимальним значенням показників заломлення вихідних шарів. Це особливо важливо при виготовленні ахроматичних просвітлюючих покриттів. Хімічний спосіб нанесення покриття дозволяє не тільки отримувати плівки з заданим коефіцієнтом заломлення, а й дає можливість створювати комбіновані системи з заданим поглинанням. Так, шляхом добавок до розчинів ефірів можна вводити в матриці оксидів SiO_2 , TiO_2 колоїдні метали срібла, золота, свинцю та інших речовин, які дають необхідну селективне поглинання [1].

Інші хімічні методи – піроліз і аерозольний метод мають вузьку сферу застосування. Вони використовуються для отримання твердих струмопровідних плівок SnO_2 . Суть методу полягає в тому, що на поверхні нагрітої деталі утворюється плівка SnO_2 при розкладанні двохлористого олова в присутності вологого повітря або шляхом розпилювання плівкоутворювального розчину, в який входить хлорне олово, фтористоводнева і соляна кислота, а також етиловий спирт. Практичного застосування для виготовлення інтерференційних покриттів ці методи не знайшли.

Вакуумні методи нанесення покриттів набули масового поширення в даний час. До вакуумних відносяться фізичні конденсаційні методи, які використовують термічне випаровування у високому вакуумі (10^{-3} Па і

менше) і катодного розпилювання плівкоутворюючих матеріалів при низькому вакуумі від 10^{-1} до 10^1 Па при розпилюванні катода.

Промислове виробництво оптичних інтерференційних покриттів вакуумними методами почало розвиватися тільки після 1930 р., коли з'явилися хороші вакуумні насоси і матеріали, що дозволяли наносити плівки випаровуванням у вакуумі. Першими промисловими оптичними покриттями були одношарові покриття, що просвітлюють. На початку 60-х років почалися інтенсивні розробки іншого типу просвітлюють покриттів, а саме – тришарових покриттів. Незважаючи на те, що теорія таких покриттів була відома в 40-х роках, в той час не була ще розроблена техніка отримання плівок з потрібним показником заломлення. Переваги тришарових покриттів були безсумнівні, але їх виробництво розвивалося повільно в силу декількох причин. Перш за все, виготовлення таких покриттів є набагато складнішим завданням, ніж виготовлення одношарових. Оптичні товщини і показники заломлення всіх трьох шарів необхідно контролювати з дуже високою точністю [2].

Основними перевагами вакуумних методів нанесення покриттів є: можливість контролю основних технологічних параметрів в процесі напилення, хороша відтворюваність результатів і висока продуктивність. Широке поширення для виготовлення інтерференційних покриттів отримав метод термічного випаровування у високому вакуумі. Катодні або іонно-плазмові методи отримання покриттів засновані на розпиленні мішені при бомбардуванні іонами інертних або реактивних газів. Джерелом іонів є самостійний розряд в розрідженому газі (тліючий на постійному струмі або високочастотний) або несамостійний (дуговий або з осциляцією електронів) розряд. Принципова схема установки наведена на рисунку 1.1 (1 – камера, 2 – катод, 3 – заземлений екран, 4 – заслінка, 5 – підкладка, 6 – заземлений анод, 7 – резистивний нагрівач підкладки).

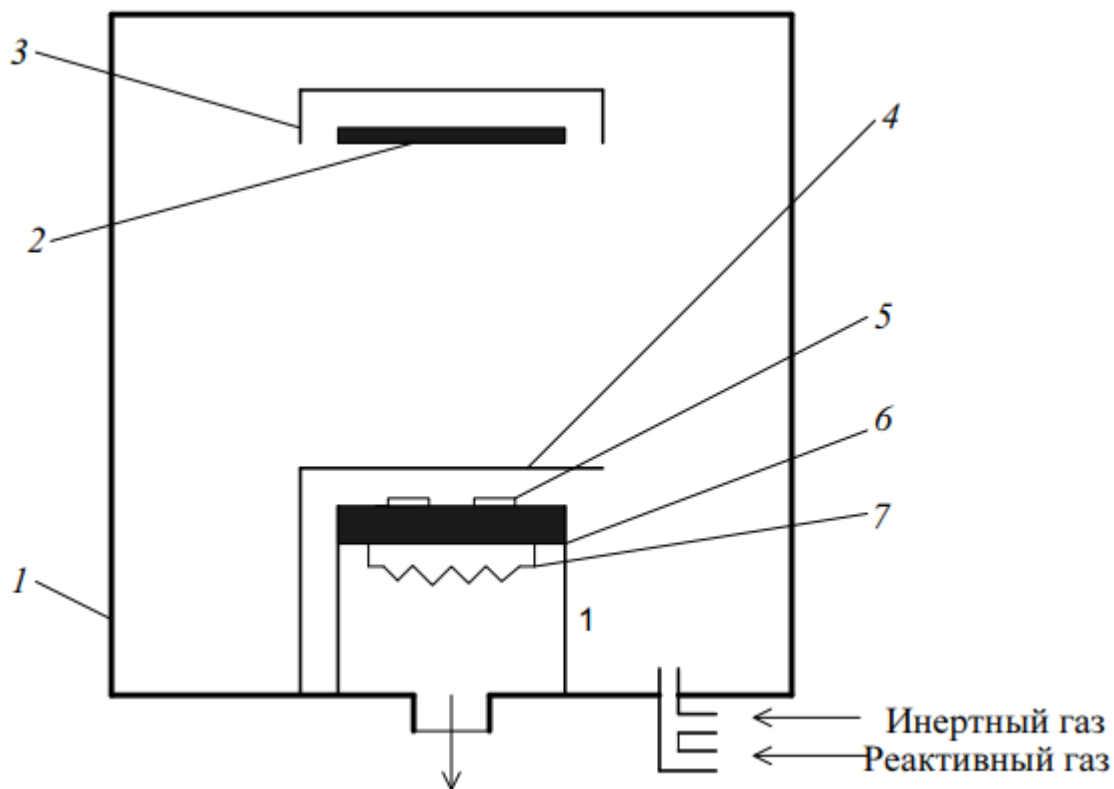


Рисунок 1.1 – Схема установки для нанесення покриттів катодним розпилюванням

Метод здійснюється наступним чином. Вакуумний простір, що містить анод і катод, відкачують до тиску 10^{-4} Па, після чого виробляють напуск інертного газу (зазвичай це аргон при тиску від 1 Па до 10 Па). Для запалювання тліючого розряду між катодом і анодом подається висока напруга від 1 до 10 кВ. Позитивні іони інертного газу, джерелом якого є плазма тліючого розряду, прискорюються в електричному полі і бомбардують катод, викликаючи його розпорошення. Розпорошені атоми потрапляють на підкладку і осаджуються у вигляді тонкої плівки [3].

Механізм катодного розпилювання досить складний і неоднозначний. В основному процес розпилювання полягає в тому, що іони присутнього газу при зіткненні з катодом (мішенню) передають атомам свою енергію, і ті покидають катод. Вилітають атоми катода можуть реагувати із залишками

активного газу (якщо в якості останнього використовуються не інертні гази, такі як кисень або азот). При попаданні на анод вони впроваджуються в нього і залишаються на ньому.

Вакуумні установки, що використовують катодні методи, можна розділити на діодні і тріодні. Діодна розпилювальна система складається з катода і анода. Катод є джерелом електронів, що виникають за рахунок автоелектронної емісії, і грає роль мішені, яка розпилюється під ударами позитивних іонів. Анод, що підтримує безперервне горіння розряду, одночасно є власником підкладок, на які осаджується тонкий шар матеріалу катода. У діодних системах, що працюють на постійному струмі, може бути використаний додатковий електрод (у вигляді кільця або рідкісної сітки), розташований на невеликій відстані від підкладки. При подачі на нього позитивного щодо анода потенціалу (кілька десятків вольт) виникає допоміжний розряд і здійснюється бомбардування осаджуємого шару. При цьому швидкість осадження знижується на 10-50 %, а чистота шару підвищується за рахунок десорбції газів. У вітчизняних діодних системах (вакуумні установки ЕВ-88 і СМ-97) технологічні швидкості отримання шарів складають 0,03-0,05 нм/с. Дія магнетронного джерела заснована на розпиленні матеріалу мішені-катода при його бомбардуванні іонами робочого газу. Іони утворюються в плазмі аномального тліючого розряду, що збуджується в схрещених електричному і магнітному полях. Магнетрона розпилювальна система (МРС) є одним з різновидів схем діодного розпилювання [1].

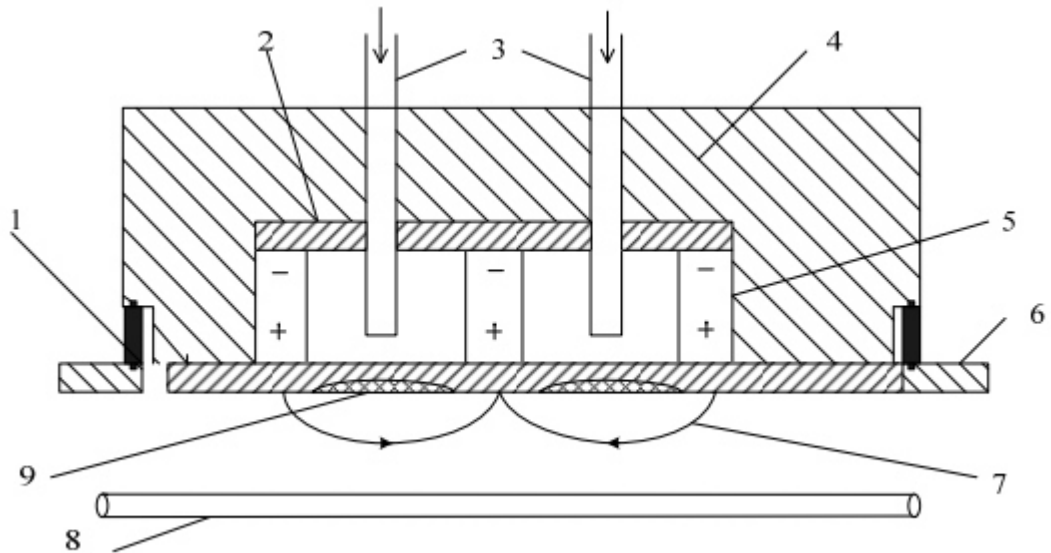
До основних принципів роботи даного продукту МРС відносяться напруга і сила струму розряду, питома потужність на катоді, тиск робочого газу і магнітна індукція. Як робочий газ в МРС зазвичай використовують аргон. Тиск робочого газу підтримується в діапазоні від 10^{-2} Па до 1,0 Па, напруга розряду від 300 В до 800 В. Магнітна індукція поблизу поверхні катода має значення від 0,03 Тл до 0,1 Тл. При таких умовах щільність

струму на мішень знаходиться на рівні декількох тисяч ампер на м², а поверхнева щільність енергії – 10⁶ Вт/м².

Магнетронні розпилювальні системи на постійному струмі можуть працювати тільки з мішенями з провідних матеріалів. Якщо використовуються високочастотні джерела живлення, то можливо розпилювання також і мішеней з непровідних матеріалів (ВЧ – магнетрони).

В діодних системах, що працюють при високочастотному напрузі, можливе використання мішеней з діелектриків або високоомних напівпровідників. Для забезпечення стабільної швидкості розпилювання, високою рівномірності шару по товщині і складу необхідний хороший тепловий контакт між мішенню і високочастотним електродом. Інтенсивне охолодження високочастотного електрода запобігає локальним перегрівам, плавленню і швидкому випаровуванню окремих ділянок мішені. У системах високочастотного розпилювання на підкладку може бути подано негативна напруга зсуву, що викликає спрямований потік позитивних іонів інертного газу до підкладки. Іони, бомбардуючи поверхню підкладки, видаляють адсорбовані шаром газу, домішки, забруднення і т.д. З напругою зміщення пов'язані властивості шарів. Вона може впливати на структуру, напруженість і адгезію шару. При малому струмі зсува не буде ефективного видалення забруднень, при великому – можливе захоплення поверхнею шару інертних і активних газів, рекристалізація шару, поява дефектів і т.д.

Схема магнетронної розпилювальної системи приведена на рисунку 1.2. При високочастотному розпиленні швидкість росту шару досягає від 0,17 нм/с до 3,4 нм/с і залежить від природи матеріалу мішені, частоти (частота від 10 МГц до 20 МГц забезпечує найвищу швидкість розпилювання), напруги, струму і напруженості зовнішнього магнітного поля. Технологічні швидкості росту шару знижуються за рахунок нагріву підкладок, що викликається потоком електронів (при потужності 3 кВт температура підкладки може бути підвищена до 600°C).



1 – ізолятор; 2 – магнітопровід; 3 – система водоохолодження; 4 – корпус катодного вузла; 5 – постійний магніт; 6 – стінка вакуумної камери; 7 – силові лінії магнітного поля; 8 – кільцевий водоохолоджуваний анод; 9 – зона ерозії катода

Рисунок 1.2 – Схема магнетронної системи іонного розпилювання з плоским катодом

У високочастотній установці типу А-550VZK (фірми «Лейбольд-Хереус», ФРН) технологічна швидкість становить від 0,03 нм/с до 0,1 нм/с. У тріодних розпилювальних установках «Спутрон» (фірми «Бальцерс», Ліхтенштейн) і УРМЗ-279-013 (СРСР) забезпечується більша гнучкість управління процесом розпилювання за рахунок поділу функцій катода і мішені. Катод є джерелом електронів, які підтримують розряд інертного газу, а мішень розташовується паралельно плазмовому шнуру (вісь мішені ділить відстань анод-катод у відношенні 1:2). При великому негативному потенціалі на мішені з плазми витягаються позитивні іони, які, бомбардуючи мішень, викликають її розпилювання. Розпилювальні атоми осаджуються на підкладці, яка розташована паралельно мішені. В умовах знижених тисків від 1,33 Па до 10^{-2} Па необхідна щільність струму забезпечується за рахунок

термоелектронної емісії і спрямованого уздовж осі розряду магнітного поля, напруженістю від 8000 А/м до 24000 А/м. У тріодних системах, реалізованих на постійній або високочастотній напрузі, швидкість осадження шару регулюється варіюванням температури катода, тиску інертного газу і потенціалу мішені; технологічні швидкості отримання шарів діелектриків досягають від 0,09 нм/с до 0,7 нм/с, а металів – від 2 нм/с до 12 нм/с [3].

Іонно-плазмові методи розпилювання дозволяють отримувати сполуки різної природи. При подачі в камеру активних газів (азоту, кисню, окису вуглецю, метану, сірчистого ангідриду та ін.) можна в залежності від парціального тиску отримувати або тверді розчини металу з відповідним елементом, або хімічні сполуки (нітриди, оксиди, карбонати, сульфіді і ін.). Такий метод розпилювання отримав назву реактивного катодного розпилювання. В даний час процеси високочастотного розпилювання використовуються не тільки для отримання покриттів, але і для селективного іонного травлення, отримання заданого рельєфу поверхні.

Методом реактивного катодного розпилювання наносять плівки TiO_2 , Ta_2O_5 , HfO_2 , ZrO_2 , Nb_2O_5 , TiN та багато інших. Показники заломлення мають високі значення, близькі до монокристалів даної речовини, але в сильному ступені визначаються режимами напилення. Особливо сильно позначається режим на нанесення плівок TiO_2 , Ta_2O_5 , HfO_2 , і значно менше проявляється ця залежність у плівок ZrO_2 , Nb_2O_5 і SiO_2 . Для кожного металу вибирається свій оптимальний режим, який визначається напругою і щільністю струму, швидкістю росту плівок, складом залишкових газів, температурою підкладки і т.д. Найбільш високі показники заломлення мають плівки, отримані при високих (до $750^\circ C$ для кварцу) температурах підкладок. Зниження температури до $200^\circ C$ призводить до зниження показника заломлення [3].

Для отримання плівок рівної товщини на плоских деталях необхідні катоди, які на 20-30% перевищують розміри підкладок. На жаль, отримання рівнотовщинних плівок на деталі складної форми або великого розміру цим методом важко вдається. Для отримання рівномірних по товщині покриттів

рекомендується підбирати поверхню катода і деталі однакової форми і розташовувати їх паралельно. У процесі розпилювання можна обертати і переміщати катоди і підкладку, а також використовувати різні маски. Природно все це ускладнює виготовлення покриттів з однаковою товщиною по всій поверхні.

Методом реактивного катодного розпилювання можна наносити шари з сумішей двох і більше окислів. Для цього використовують мозаїчні катоди, складені з різних матеріалів або із сплавів. Переважне випаровування одного металу досягається вибором режиму. Кращі результати дає використання двох катодів, розташованих окремо на відстані один від іншого. Мішень в цьому випадку переміщається від одного катода до другого. Для напилення таких плівок як Si, SiO, SiO₂ досить одного катода з кремнію і зміни складу залишкового газу (Ar: Ar + O₂) і режимів напилення. Контроль товщини напилюваних шарів проводиться або за часом розпилювання, або спектрофотометричними методами. Однак їх використання ускладнене внаслідок того, що катод непрозорий і розташований недалеко від анода. Реально можливий контроль щодо відображення при досить великих кутах падіння [3].

Катодним розпилюванням отримують просвітлюючі, дзеркальні і світлоподільні покриття, переважно в ультрафіолетовій і видимій областях спектра. Однією з причин, що обмежують виготовлення покриттів для інфрачервоної області, де потрібні порівняно більш товсті шари, є мала швидкість осадження плівок і, відповідно, великі витрати часу. Так, наприклад, для іоноплазмового осадження шару діелектрика товщиною від 1 мкм до 2 мкм потрібно кілька годин.

Перевага методу катодного випаровування полягає в можливості отримання плівок з тугоплавких оксидів металів з високою механічною і хімічною стійкістю покриттів, хороша адгезія плівок. Зокрема, плівки нітриду титану використовуються як зміцнюючі покриття на ріжучих

інструментах і протезах. До недоліків слід віднести труднощі виготовлення катодів великого розміру та важкість контролю осадження.

1.2 Експериментальне обладнання для виготовлення оптичних плівок методами термічного напилення

Методи термічного (резистивного і електронно-променевого) випаровування широко використовуються для отримання оптичних покриттів. Основна перевага методів – їх універсальність. На однотипному вакуумному устаткуванні є можливість отримувати однорідні шари металів, сплавів, напівпровідників і діелектриків різної товщини. При термічному випаровуванні плівкообразуюча речовина нагрівається у вакуумній камері до температури, при якій відбувається його інтенсивне випаровування в умовах високого вакууму. Це відповідає тиску насичених парів порядку 1 Па. Зазвичай температуру, при якій тиск насичених парів становить 1,33 Па, називають умовною температурою T_p . Випаровувана речовина осаджується на підкладках і створює оптичну плівку. Для створення якісної плівки молекули випаровуваної речовини повинні поширюватися прямолінійно, тобто уникати зіткнень з молекулами залишкових газів у вакуумі і не розсіюватися. Середня довжина вільного пробігу молекули із залишковим газом L_{cp} визначається з кінетичної теорії газів. При тиску 10^{-2} Па вона дорівнює 900 мм. Величина L_{cp} повинна бути багато більше відстані від випарника до підкладок. Реально тиск 10^{-2} Па можна використовувати в камерах з розмірами порядку від 150 до 200) мм. Для великих камер з лінійними розмірами від 500 мм до 700 мм цей тиск не повинен перевищувати $0,6 \cdot 10^{-3}$ Па. Але навіть при цьому тиску, значна частина молекул, що випаровуються розсіюється і осаджується на стінках та дні камери. При тривалій роботі на стінках і дні камери напилюється шар плівкоутворюючих речовин, який створює підвищене газовиділення, що приводить до збільшення часу відкачки камери до необхідного тиску. Стінки

і дно камери необхідно періодично чистити. Для спрощення процесу очищення хороший результат дають екрани і фальш-панелі з нержавіючої сталі. Ці екрани встановлюються поблизу дна і стінок вакуумної камери. Вони періодично очищаються травленням в азотній кислоті. У свою чергу, ці екрани можна рекомендувати обертати тонкої фольгою з алюмінію завтовшки від 10 до 30 мкм і видаляти її після кількох напилювань. При відсутності екранів, їх можна також замінити більш товстою фольгою з алюмінію. Реально все це істотно знижує необхідність періодичного чищення камери, однак збільшення площі поверхні всередині камери призводить до збільшення газовиділення, що збільшує час досягнення необхідного вакууму.

Залишкові гази зіткаються з підкладкою під час напилення плівки і залишаються в ній. При тиску 10^{-2} Па частота зіткнень залишкових газів з підкладкою відповідає осадженню плівкоутворювального речовини зі швидкістю 0,001 нм/с. Цей процес збільшує пористість плівки і знижує її механічні характеристики. Так, при тиску 1 Па плівки настільки пористі, що стираються ватним тампоном [3].

Вакуумні установки для отримання покриттів термічним випаровуванням, можна розділити на стандартні, покращені та надвисоковакуумні. Установки стандартного типу мають непрогрівасий (або прогривається водою до 90°C) металевий або скляний ковпак. Заданий вакуум отримують за допомогою паромасляного дифузійного насоса, забезпеченого масловідбивачем і водяними і (або) азотними пастками. Розбірні з'єднання в установках виконуються з використанням вакуумної гуми. До такого типу установок, наприклад, відносяться наступні: А-700Р (фірми «Лейбольд-Хераус», ФРН); ВА-550К, ВА-710 (фірми «Бальцерс», Ліхтенштейн); ВУ-1А, ВУ-2М, УРМЗ-279-011 (СРСР, Росія) та ін.

Вітчизняні високопродуктивні установки типу УРМЗ-279, ВУ-1А і ВУ-2М забезпечують отримання багатошарових покриттів різного призначення на деталях діаметром понад 500 мм методами резистивного і електронно-променевого випаровування. Вони складаються з ряду конструктивних

елементів. Інші, використовувані для резистивного напилення установки, принципово мало відрізняються від них.

Вакуумна установка термічного випаровування подібного типу (рисунок 1.3) складається з камери, закритою від навколишньої атмосфери – 12, робочої плити – 18, вакуумної системи, підковпачним пристроєм для кріплення напиляємих деталей і їх обертання, випарників – 5 і пульта управління роботою вузлів і агрегатів установки. Для спостереження за ходом процесу напилення в двері камери є ілюмінатор – 7. Найчастіше він використовується при електронно-променевому випаровуванні, коли необхідно стежити за режимом роботи електронно-променевого випарника. При завантаженні і вивантаженні напиляємих деталей передні двері в ковпаку відкривається. У ранніх установках і більш сучасних іншого типу весь ковпак піднімався гідравлічним циліндром. У верхній частині ковпака встановлені кварцові лампи – 9 з рефлекторами – 8, що забезпечують нагрів підкладок до температури від 50 до 320 градусів за Цельсієм перед напиленням плівок, і освітлювач – 10 фотометричного пристрою. Підігрів підкладок покращує адгезію та механічну міцність плівки. Місце стику ковпака з робочою плитою герметизується гумовим ущільненням – 17.

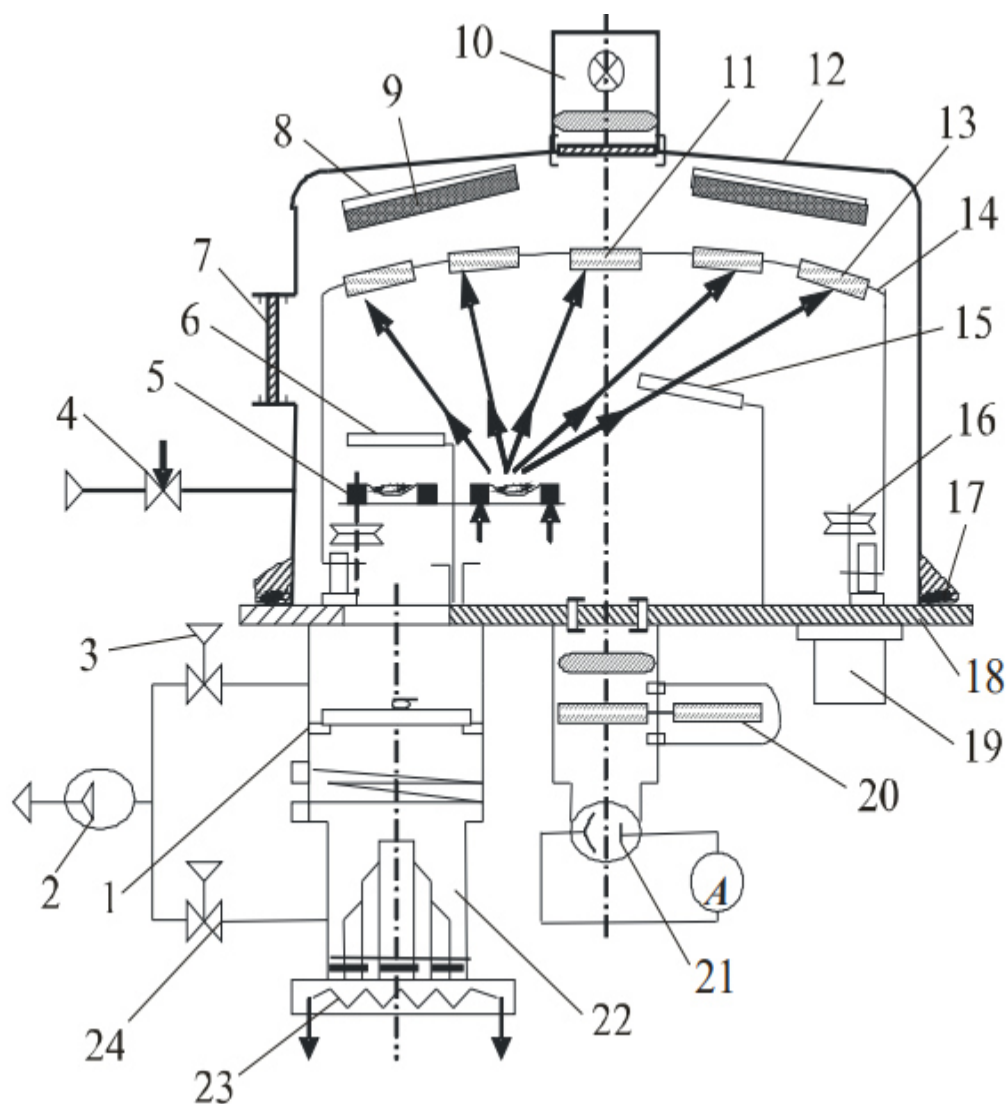


Рисунок 1.3 – Вакуумна установка термічного випаровування.

Система відкачування повітря складається з форвакуумного насоса – 2, попередньої відкачки дифузійного високовакуумного насоса – 22, системи клапанів, пасток і трубопроводів. Для розгерметизації ковпака після закінчення процесу служить кран-натікач – 4. На установках ВУ-1А і ВУ-2М (рисунок 1.4) попередній вакуум створюється вакуумним агрегатом АВР-50 або АВР-60, до складу якого входять форвакуумний механічний насос і ротаційний насос руте.

Напиляемі підкладки – 13 і зразок-свідок – 11 для контролю товщини плівки в процесі напилення встановлюють в отвори пристосування – 14. В

установці знаходиться оправа для свідків, що дозволяє встановлювати до десяти змінних свідка. Для поліпшення рівномірності товщини плівки пристосування обертається з частотою до 100 об/хв на роликівих опорах. Привід обертання пристосування здійснюється через конічний ролик – 16 і безконтактну електромагнітну муфту – 19, розташовану на робочій плиті установки.



Рисунок 1.4 – Установка ВУ-2М

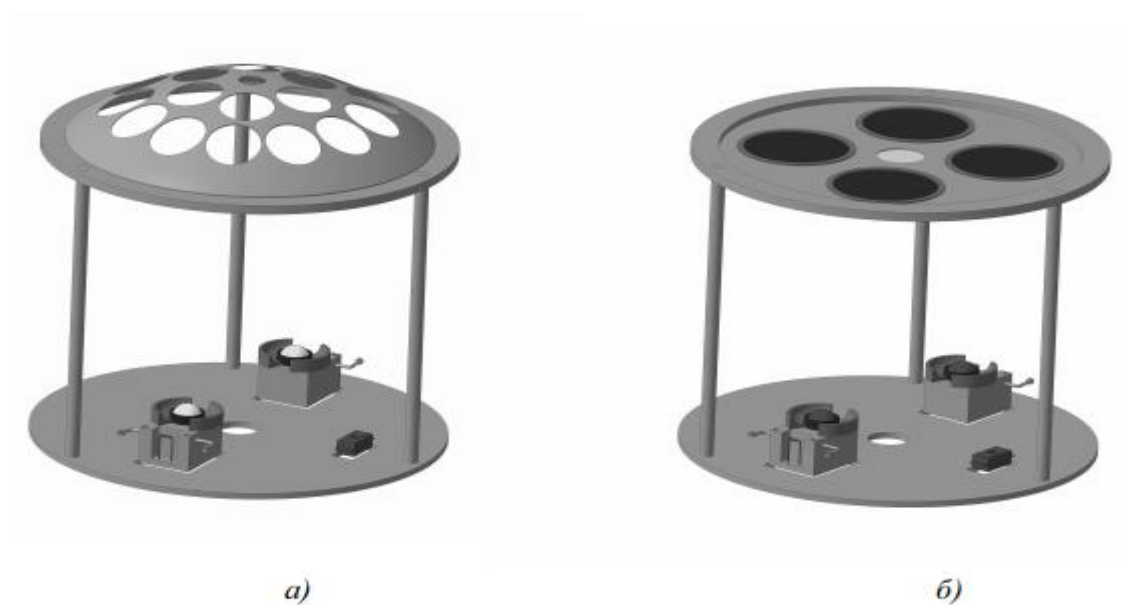


Рисунок 1.5 – Різні конструкції тримачів підкладок

Підковпачний змінний пристрій призначений для розміщення і обертання оптичних деталей в процесі нанесення покриття. Він містить тримач підкладок, зазвичай виконаний в двох варіантах, куполоподібний (рисунок 1.5а) і плоский (рисунок 1.5б), а також контрольний зразок, який може здійснювати одинарне обертання або бути нерухомим. Контрольний зразок необхідний в тому випадку, коли контроль товщини шару під час осадження здійснюється фотометричним методом.

Покращені установки відрізняються від стандартних наявністю допоміжних засобів відкачування, наприклад, гетероіонних насосів. Розбірні з'єднання найчастіше виконуються з еластомерів, що забезпечують можливість прогріву. Надвисоковакуумні установки виготовляють суцільнометалевими, а розбірні з'єднання виконують із застосуванням мідних або алюмінієвих прокладок, що забезпечує можливість їх прогріву до 450°C з метою знегажування. Для отримання безмасляного вакууму використовують гетероіонні, криогенні, сорбційні та інші насоси, а також їх комбінації. Наприклад, в свержвисоковакуумних установці Р11-450 фірми «Лейбольд-Хереус» (ФРН) відкачка робочого об'єму проводиться сорбційними, магніто-розрядний і титановим насосами до тиску від 1,33 Па до 10^{-2} Па [4].

Технологічний процес нанесення оптичних плівок вимагає виконання ряду операцій в заданій послідовності. Зазвичай першою операцією при виготовленні покриттів є очищення підкладки. Ступінь чистоти поверхні підкладки є вирішальним фактором для вирощування та адгезії плівок. Тільки на добре очищеної підкладці можливе отримання якісних покриттів з відтвореними властивостями.

За своєю природою забруднення носять різний характер. Найбільш частими забрудненнями є залишки після виготовлення і упаковки волокна, відбитки пальців, масло і частки, обложені з повітря. Характер забруднень визначає спосіб очищення поверхні підкладки. Широке поширення отримала хімічна очистка деталей. При хімічному очищенні розчинниками

обриваються зв'язки, як між молекулами самої домішки, так і між молекулами цієї домішки і підкладкою.

В якості реагентів використовують водні розчини кислот і лугів, а також такі органічні розчинники, як спирти, кетони і хлористі вуглеводні. Для підвищення швидкості та ефективності видалення забруднень застосовується нагрів розчинника або ультразвукове збудження розчинника. За для ультразвукової чистки деталь поміщають в спеціальну ванну з реагентом, в якому за допомогою випромінювача збуджуються коливання ультразвукової частоти. У цьому випадку в якості розчинника зазвичай застосовують суміш петролейного ефіру і ацетону в пропорції 1:1, також непогані результати показала суміш складу 3 гр. сінтанолу ДС-10, 6 гр. КОН на 1 літр дистильованої води. Методи хімічного очищення підкладок наведені в таблиці 1.1. [4]

Крім хімічної очистки летючі забруднення можуть бути видалені прогрівом підкладок перед напиленням. Для якісної очистки в цьому випадку потрібні відносно високі температури прогріву. Так, наприклад, в разі кремнієвих пластин для отримання атомарно-чистої поверхні підкладку необхідно нагріти до 1280° С.

Таблиця 1.1 – Хімічні методи очистки підкладок

Метод очистки: хімічна обробка	Реагент	Дія реагенту	Примітки
1	2	3	4

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4
Розчинниками	Петролейний ефір (фракція кипіння при 40-70°C)	Розчиняє мінеральні, тваринні і рослинні жири, віск, смолу	
	Етиловий гідролізний спирт вищого очищення	Видаляє сліди «чистих» пальців	Погано розчиняє мінеральні масла, тваринні жири; через повільне випаровування води при очищенні можливе виникнення мазків і розводів
Лужні розчини	Етиловий висушений спирт (2 % вода)	Видаляє мазки та розводи	
	KOH або NaOH 10-15%	Обмилюють жири, знижують поверхневий натяг	

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4
Розчини кислот	Хромова, плавикова, азотна кислоти, суміш хромової та сіркової кислоти	Взаємодіє з забрудненнями, перетворює їх в розчинні з'єднання	Використання має обмеження через недостатню хімічну стійкість матеріалу підкладки

Безпосередньо перед осадженням шару використовується очищення тліючим розрядом. Тліючий розряд забезпечує нагрів і десорбцію домішок, розщеплює органічні молекули з утворенням летючих сполук, покращує міцність зчеплення напилюваних шарів і скорочує час відкачування робочого об'єму вакуумної установки.

На додаток до наведених методів очищення підкладок можна відзначити деякі спеціальні методи. До таких, наприклад, відноситься спосіб сколювання монокристалів в вакуумі. Цей метод можна застосовувати тільки для монокристалічних матеріалів, і використовується при вивченні процесів зародкоутворення і зростання, коли точна інформація про стан поверхні надає визначальне значення.

Для виготовлення оптичних плівок термічним випаровуванням у вакуумі необхідна наявність випарника, який би містив випаровувану речовину і підтримував її при температурі, достатній для випаровування з необхідною швидкістю, а також забезпечував підведення необхідної енергії для нагріву. Залежно від способу підведення енергії розрізняють резистивні і електронно-променеві випарники.

Сучасні резистивні випарники можна класифікувати за різними властивостями, наприклад, по діаграмі спрямованості і максимальної

інтенсивності потоку молекул випаровуваної речовини. Також резистивні випарники бувають прямого або непрямого нагріву.

При резистивному випаровуванні нагрів речовини відбувається джоулевим теплом. Електричний струм пропускається або безпосередньо через випарник, або тигель нагрівається зовнішнім накальним нагрівачем, виконаним з тугоплавкої фольги або дроту.

Найбільше практичне поширення отримали поверхневі, човнові і тигельні, випарники прямого нагріву. У тиглях такого типу речовина поміщають у човник, яка нагрівається проходять струмом. Такі випарники відрізняються дешевизною, простотою виготовлення і зручністю експлуатації. Зупинимося на найбільш поширених поверхневих випаровувачах.

Поверхневі випаровувачи виготовляються у вигляді стрічок, човників (рисунок 1.6 а,г), а також проволочок з металів з високою температурою плавлення і низьким тиском парів (рисунок 1.6 ж-і). Човники застосовуються для випаровування широкого класу матеріалів: сульфідів і фторидів металів, елементарних металів і інших речовин. Для випаровування матеріалів, що характеризуються викидом речовини, застосовуються човники, які закриті екранами з отворами, розташованими в шаховому порядку (рисунок 1.6 в). Для випаровування діелектриків і металів у великих кількостях рекомендується човник, зображена на рисунку 1.6 м. Зі зміною конструкції човників (рисунок 1.6 д,е) забезпечується вузька спрямованість потоку пара.

Вибір конструкції випарника залежить від того, в якому стані знаходиться випаровуваний матеріал (гранули, злитки, порошок, дріт), а також від таких особливостей випаровуваної речовини, як випаровування з рідкої фази або сублімація, змачуванність випарника, хімічна активність до матеріалу випарника і т. д.

При випаровуванні речовин складного складу і сплавів нерідко один з компонентів є більш летючим, що призводить до порушення стехіометрії осадового шару. Для запобігання цьому застосовують метод вибухового

випаровування. Порошкоподібною речовиною з вібробункера (рисунок 1.6 б) малими дозами надходить на розігрітий випарник і моментально випаровується з подальшою конденсацією на приймальній поверхні. Режим випаровування, розмір фракції, швидкість подачі речовини і температура випарника для отримання плівок стехіометричного складу визначають емпірично.

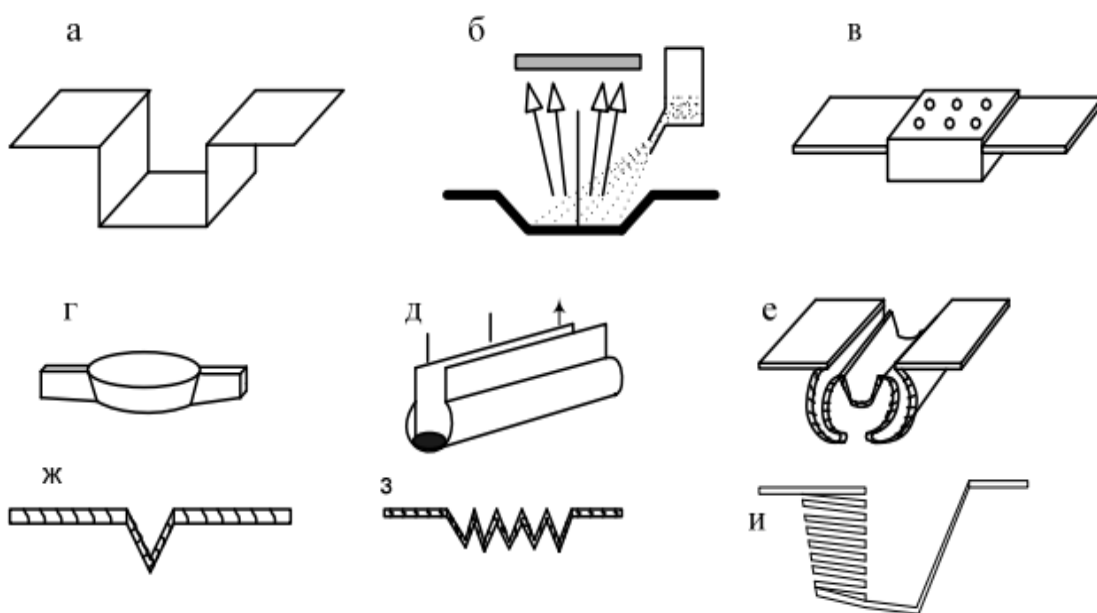


Рисунок 1.6 – Типи поверхневих випаровувачів прямого нагріву

Емісійна характеристика випарника залежить від його конструкції і стану матеріалу, який випаровується. Зазвичай індикатрис випарника знаходять експериментально для кожного типу випарника. Для цього проводять напилення на тестовий зразок, форма якого ідентична формі робочих підкладок. Далі тим чи іншим методом досліджують розподіл товщини шару по поверхні тестового зразка. Найбільш зручно в цьому випадку визначати товщину шару в різних точках підкладки по спектрофотометричним вимірам. Для цього роблять тест-напилення вузькосмугового інтерференційного фільтра типу інтерферометра Фабрі-

Перо з резонансним шаром з матеріалу, індикатрис випаровування якого хочуть визначити. Відповідно до положення максимуму пропускання фільтра визначають розподіл товщини резонансного шару по поверхні підкладки. Далі за відомим набору геометричних параметрів взаємного розташування підкладки і випарника, а також по застосовуваній схемою обертання підкладок проводять розрахунок емісійної характеристики випарника.

Одним з недоліків випарників у вигляді відкритих човників є нагрів матеріалу, який випаровується, знизу, наслідком чого нерідко буває розбризкування речовини з човника. Ще одна незручність поверхневих випарників полягає в тому, що в міру випаровування матеріалу змінюється індикатрис спрямованості. Це призводить до спотворення спектрів деталей на різних ділянках. У меншій мірі цей недолік позначається при випаровуванні з розплаву.

Для запобігання розбризкування речовини і стабілізації індикатриса випаровування деякі дослідники пропонували закривати поверхню тигля частково прозорою сіткою. Так, наприклад, був запропонований варіант човнового випарника, вільний від більшості перерахованих вище недоліків. Ідея полягала в тому, що розігрів речовини відбувається не знизу, з дна випарника, а зверху. На поверхню тигля накладається додаткова сітка, виконана з фольги, товщина якої більше товщини фольги, з якої виконаний випарник. Це призводить до перегріву верхньої частини тигля. Величина перегріву контролюється товщиною фольги для додаткової сітки. Реально використовувався перегрів від 100°C до 300°C. В цьому випадку випаровування речовини йде із замкнутої камери між речовиною і верхньої сіткою, що забезпечує сталість індикатрису випромінювання і відсутності бризок з тигля. Нарешті, товщина шару залишається постійною при сталості струму, що протікає через тигель.

Матеріалами для дротяних і стрічкових випарників є тугоплавкі метали з високими температурами плавлення і низьким тиском парів. Найбільш

широко застосовуються вольфрам, молібден і тантал. Температури плавлення для цих металів 3380°C, 2610°C і 3000°C відповідно.

Тигельні випаровувачі (тиглі) застосовуються в тому випадку, коли для нанесення шарів потрібні великі кількості матеріалу. Матеріал тигля вибирається такий, щоб власне тиск парів тигля під час роботи був дуже малий в порівнянні з тиском, випаровуваної речовини. Часто це досягається шляхом додаткового охолодження тигля, який виконується з матеріалу з високою теплопровідністю: міді, вольфраму, графіту і т.д.

Тиглі для випаровування можуть бути виготовлені з металів, графіту, скловуглецю (склографіта), нітриду бору, з тугоплавких оксидів. Тиглі з молібдену, наприклад, використовуються для випаровування Cu, Ag, Au. Для випаровування речовин, які активно вступають в реакцію з тугоплавкими металами, застосовують тиглі, виготовлені по керамічній технології з оксидів. Зазвичай це тугоплавкі окисли ThO_2 , BeO , ZrO_2 , Al_2O_3 , MgO , TiO_2 . З керамічних тиглів випаровують Sb, As, Bi, Ti, Mn, Te і інші елементи. Нагрівання тиглів здійснюється за рахунок теплового випромінювання розпеченої нитки, виконаної з тугоплавкого металу.

За конструкцією випарники тигельного типу поділяються на відкриті (зазвичай як на рисунку 1.7) і замкнуті, дискретної дії, конструкція яких суто індивідуальна. Істотним недоліком випарників тигельного і поверхневого типу є втрати випаровувача, пар з випарника виходить, коли заслонка замкнута, і осадження шару не проводиться. Від цього недоліку вільні замкнуті випарники дискретної дії. Пара з цих випарників виходить тільки тоді, коли піднятий затвор, і в цей період проводиться осадження матеріалу на підкладку. Інерційність подібних випарників від 20 разів до 30 разів менше, ніж у резистивних випарників з екраном.

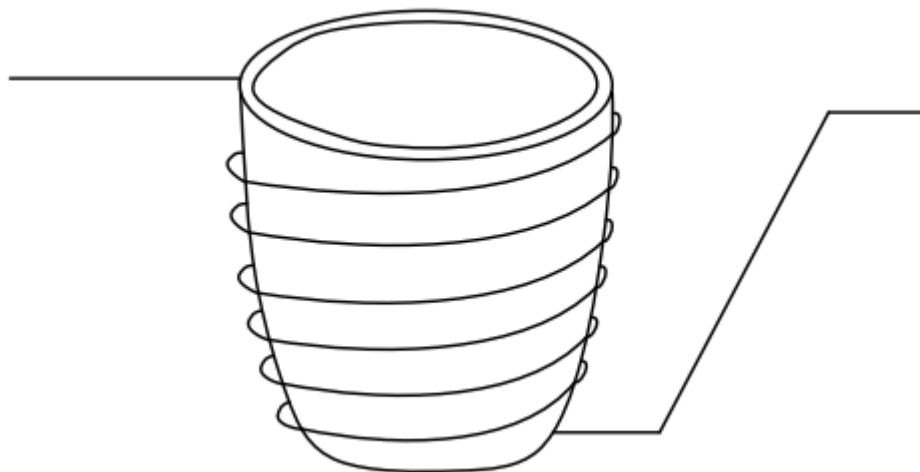


Рисунок 1.7 – Випаровувач з непрямим нагрівом

Широке практичне поширення набули графітові тиглі. Для виготовлення випарників застосовується піролітичний графіт, більш твердий у порівнянні з іншими марками графіту. З графітових тиглів випаровують метали, германій, кремній та інші напівпровідники і напівпровідникові сполуки.

Крім зазначених матеріалів, з яких виготовляються тиглі, можна також відзначити скловуглець, нітрид бору і двоборид титану. Скловуглець (склографіт) має блискучу поверхню і відносно низьку щільність ($\approx 30\%$), добре піддається механічній обробці і досить довговічний. У нашій країні випускається скловуглець марок СВ-2000 і СВ-2500 (номер в позначенні марки вказує на граничну робочу температуру). Зі склографітових тиглів рекомендується випаровувати з'єднання фторидів, сульфідів, телуридів, а також сполуки $A^{III}B^V$.

Нітрид бору – діелектричний матеріал білого кольору, легко обробляється механічно. Застосовується в якості матеріалу випарників для отримання плівок речовин з невисокою температурою випаровування. Максимальна робоча температура тиглів з BN – 1800°C .

Подібно графіту і нітриду бору, двоборид титану TiB_2 зручний для обробки механічним інструментом. У порівнянні з нітридом бору, TiB_2 є

більш твердим і плавиться при температурі 2940°C. Тиглі з двоборида титану застосовуються для випаровування алюмінію.

Для випаровування тугоплавких металів, оксидів, діелектриків та інших речовин широко застосовуються електронно-променевої випарники. Для нагріву матеріалу, який випаровується в електронно-променевому випарнику використовується енергія сфокусованого пучка прискорених електронів (рисунок 1.8). Типовий електронно-променевої випарник складається з трьох основних вузлів: джерела електронів, системи відхилення, повороту і фокусування (електромагнітної й електростатичної) електронного пучка; водоохолоджуваного тигля, в якому поміщається випаровується матеріал. Джерело електронів – електронна гармата, яка являє собою діодну систему, що містить катод, закріплений в тримачі з клемми, пролітний анод, який знаходиться під потенціалом землі, і фокусує електрод. Катод виготовлений у вигляді спіралі з п'яти витків вольфрамового дроту діаметром 0,6 мм. Негативна висока напруга 6 кВ або 12 кВ подається на накальний катод.

Система повороту, відхилення і електромагнітного фокусування електронного пучка складається з двох електромагнітних призм. Призма здійснює поворот електронного пучка, сформованого електронною гарматою, на кут до 180°, направляючи його в тигель з випаровується матеріалом, призма б дозволяє переміщати пучок в перпендикулярному напрямку в межах 15 мм. Таке взаємне положення тигля і джерела електронів забезпечує збереження задовільних вакуумних умов в електронній гарматі при інтенсивному випаровуванні. Через патрубки безперервно циркулює вода для охолодження тигля. Розмір сфокусованого пучка може варіюватися за рахунок зміни положення катода від 5 мм² до 300 мм². Мінімальний розмір плями використовується для випаровування таких тугоплавких речовин, як оксиди (SiO₂, TiO₂, ZrO₂, Y₂O₃ та ін.) при температурах вище 1500 градусів за Цельсієм, максимальний - для випаровування матеріалів при температурах від 400 °C до 700 °C градусів (Ti, PbTe, PbF₂ та ін.).

Метод електронно-променевого випаровування широко застосовується для отримання оптичних плівок в вакуумі, як в лабораторних дослідженнях, так і при промисловому виготовленні інтерференційних покриттів. Основними перевагами методу є: незначне взаємодія випаровувача з матеріалом водоохолоджувального тигля, можливість випаровування великої кількості матеріалу з великою швидкістю, випаровування тугоплавких матеріалів.

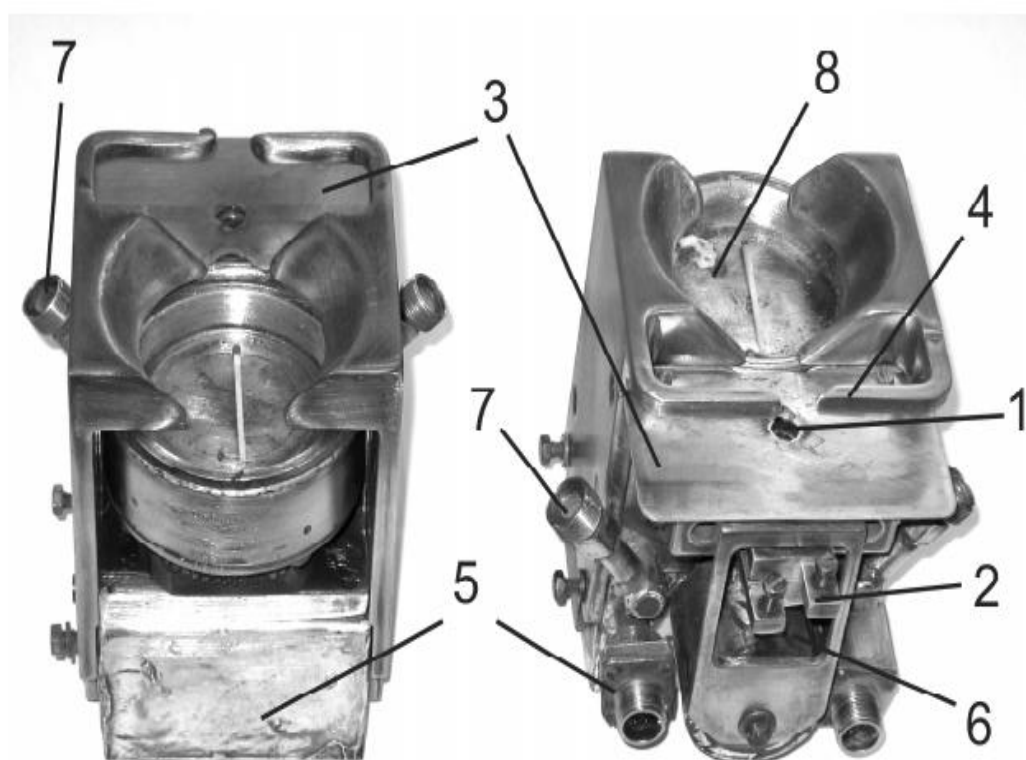


Рисунок 1.8 – Електронно-променевий випаровувач УЕПВ-1

1.3 Властивості наплення плівок монооксиду кремнію

Безліч діелектричних матеріалів використовується в оптичній промисловості для покриття лінз і в електроніці для отримання ізолюючих плівок. Але тільки монооксид кремнію відносно добре вивчений з точки зору впливу залишкових газів на властивості плівок.

Склад матеріалу, що випаровується з випарника, в який завантажений SiO, залежить від температури випарника. При збільшенні температури випарника щільність плівок оксиду кремнію зростає внаслідок збільшення вмісту кремнію. Залишкові механічні напруги в плівках оксиду кремнію, отриманих при низькому тиску (приблизно $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст.), залежать тільки від температури випарника внаслідок температурної залежності складу випаровується матеріалу.

Залишкові газы також впливають на склад плівок оксиду кремнію, отриманих з SiO. Раніше було встановлено, що можна отримати сильно окислені плівки кремнію, якщо випаровувати SiO з низькою швидкістю (менше 3 А/сек) в поганому вакуумі (10^{-4} мм рт. ст.). Подальші дослідження показали вплив деяких залишкових газів на залишкові напруги в плівках монооксиду кремнію. Виявилось, що залишкові газы не надають відчутного впливу на властивості плівок, напилених при температурах випарника вище 1300°C . Тим часом при більш низьких температурах випарника пари води вносять істотні зміни в величину залишкових напруг (це ілюструється на рисунку 1.1 для плівок, напилених при температурі випарника 1183°C). Крім того, коефіцієнт заломлення (виміряний при $\lambda = 5460 \text{ \AA}$) зменшується від 2,0 (в плівках, напилених при тиску 10^{-7} мм рт.ст.) до 1,6 (в плівках, напилених при парціальних тисках парів H_2O 2×10^{-6} мм рт.ст.). Це свідчить про утворення більш високого оксиду в результаті реакції $\text{SiO} + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_{n+1} + n\text{H}_2$. Неповністю окислені плівки досить нестабільні і розтріскуються при витримці в атмосферних умовах [3].

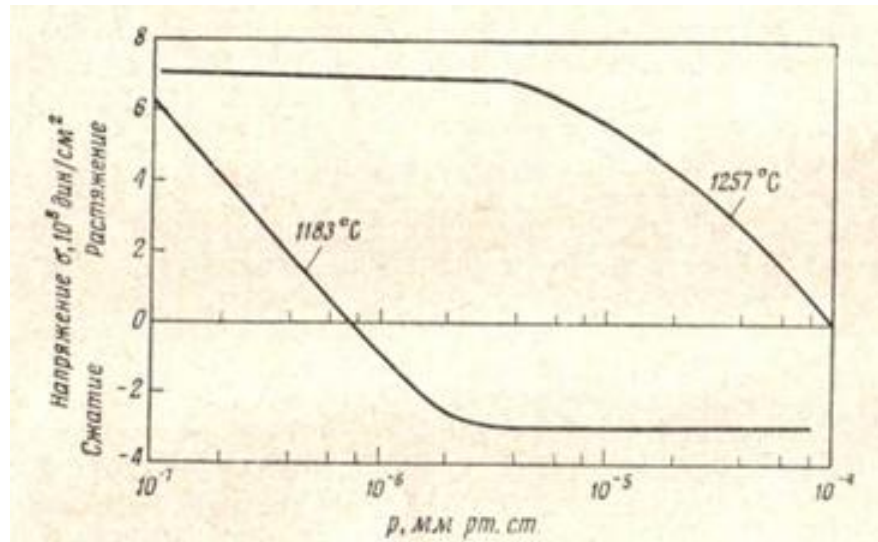


Рисунок 1.9 – Залежність залишкових напруг в плівках оксиду кремнію від парціального тиску парів води для різних температур випарника

При збільшенні температури випарника до 1257°C залишкові напруги в плівках змінюються. Однак розтягуючі напруги зменшуються, поки парціальний тиск парів води не досягне досить великої величини. Для того щоб виключити ефекти, зумовлені лише збільшенням швидкості сублімації при підвищенні температури випарника, на рисунку 1.10 побудована залежність напружень від $K_{\text{H}_2\text{O}}$ для обох температур випарника. Той факт, що крива, що відповідає більш низькій температурі випарника (1183°C), лежить значно нижче кривої для $T = 1257^{\circ}\text{C}$, свідчить на користь гіпотези, згідно з якою менш напружені і менш щільні плівки, отримані при низьких температурах випарника, більш сприйнятливі до окислення. Дійсно, ймовірність реакції між молекулами води і плівкою окису кремнію вище в разі менш щільної речовини [3].

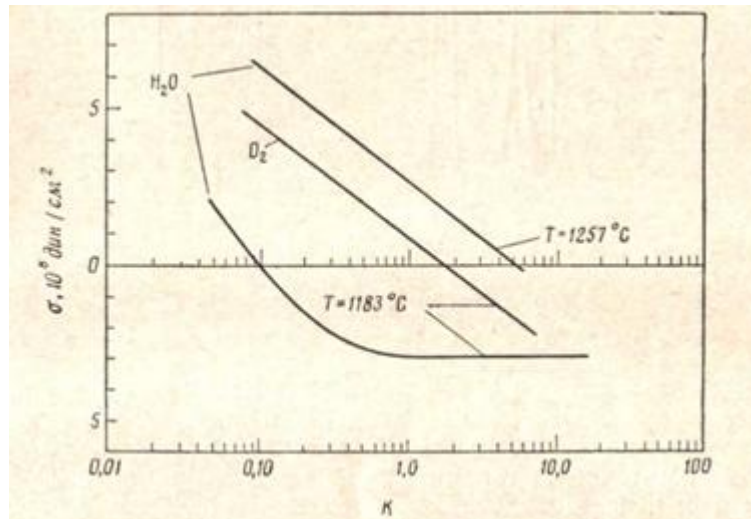


Рисунок 1.10 – Залежність залишкових напруг σ в плівках монооксиді кремнію від величини K . T – температура випарника; K – відношення кількості молекул O_2 або H_2O до кількості молекул SiO_2 , падаючих на підкладку.

Вплив кисню подібний парам води, але при цьому виходять більш високі оксиди в результаті реакції $SiO + (n/2)O_2 \rightarrow SiO_{n+1}$. Однак при одній і тій же температурі випарника пари води виявляються значно ефективніше, ніж кисень, зменшуючи напруги приблизно на порядок. Ця обставина дуже важлива, якщо врахувати, що пари води є основним залишковим газом в непрогріваних вакуумних системах і, як правило, їх кількість на порядок вище вмісту кисню [4].

Плівка монооксиду кремнію є найбільш часто використовуваним діелектриком для тонкоплівкових конденсаторів і буферних шарів для поділу пересічних провідників в двовимірних ланцюгах. Цей матеріал може бути отриманий у вигляді порошку або таблеток, його структура та фізичні властивості добре відомі. Монооксид кремнію має високий тиск парів при помірній температурі джерела нагріву (рисунок 1.11). Зазвичай він випаровується з нагрівача трубчастого типу з перегородками для запобігання потрапляння окремих шматочків матеріалу на плівку.

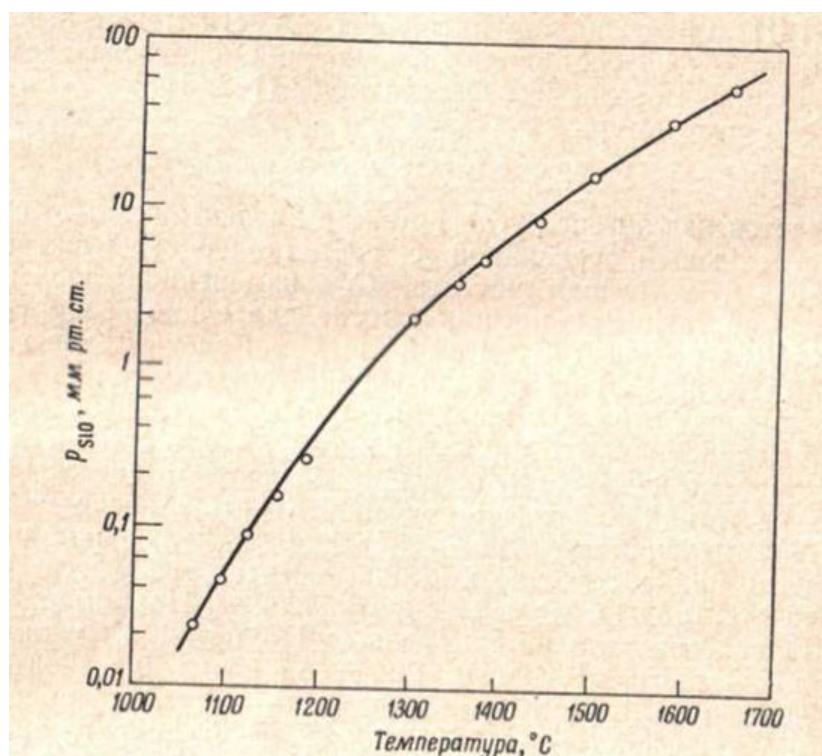


Рисунок 1.11 – Залежність тиску парів монооксиду кремнію від температури

Проведено детальні дослідження параметрів осадження, щільність, поглинання світла в ультрафіолетовій та інфрачервоній частинах спектра і показник заломлення. На рисунку 1.12 показана залежність швидкості осадження і щільності плівки від температури джерела (щільності масивних зразків Si, SiO і SiO₂ дорівнюють відповідно 2,4, 2,2 і 2,15 г/см³). При малій швидкості осадження (від 1 до 5 А/сек) або при високому тиску в камері виходить пористий конденсат з низькою щільністю, який швидко окислюється на повітрі в безбарвні плівки з пропусенням в ультрафіолеті. При середніх швидкостях осадження (від 6 до 12 А/сек) плівки мають щільність, близьку до об'ємної для монооксиду кремнію, і бурштиновий колір. Ці плівки показують розмиті електронно-дифракційні зображення, які корелюють з рентгенографічними даними для об'ємного матеріалу.

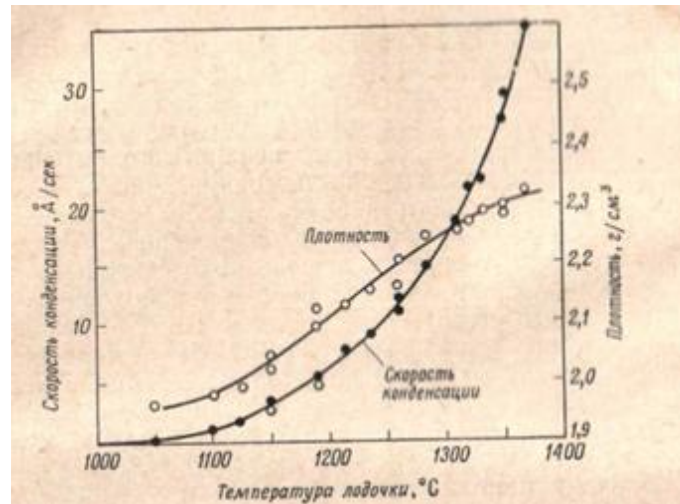


Рисунок 1.12 – Щільність і швидкість конденсації плівок монооксиду кремнію в залежності від температури човника (форма випарника)

При високих швидкостях осадження (від 25 до 30 Å/сек) щільність плівки перевершує щільність об'ємного монооксиду кремнію, а дифракція електронів показує наявність твердого розчину кремнію і двоокису кремнію.

У дослідженнях при експонуванні плівок SiO у вологій атмосфері часто спостерігалось їх відшаровування. Це відшаровування викликано надмірними напруженнями стиску. Воно може бути припинено підігріванням підкладки під час осадження.

Докладні дослідження плівок SiO виявили деяку кореляцію між механічними напруженнями і умовами осадження плівки [4]. На рис. 1.5 показана залежність розтягуючих і стискаючих напруг у плівці SiO, напленої в вакуумі нижче $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст., від температури джерела. Величину напруги визначали по вигину нікелевої підкладки. З того, що напруга невідчутна до швидкості осадження, можна зробити висновок, що склад випаровувань і реакції в газовій фазі є важливими факторами для виникнення напруги.

Високі розтягуючі напруги при температурі джерела нижче 1250°C (область I на рисунку 1.13) стабільні у вакуумі, але повільно переходять в стискаючі при експонуванні плівки у вологій атмосфері або в кисні. Ця зміна

характеру напружень може бути пов'язана з окисленням. Відповідне збільшення об'єму створює стискаючі напруги, які викликають відшаровування плівки від підкладки. При цих же температурах підкладки введення кисню або парів води в камеру під час осадження викликає аналогічний перехід від напруг, що розтягують до стискаючих. Зміни коефіцієнта відбиття і зникнення колірною забарвлення свідчать про поступовий перехід в двоокис кремнію.

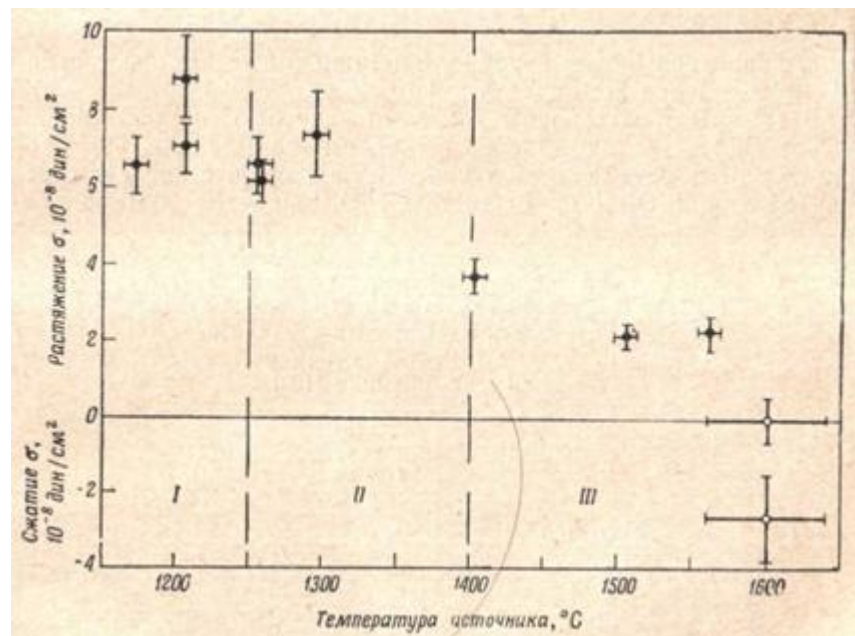


Рисунок 1.13 - Механічні напруги в плівках монооксиду кремнію, напилених на нікелевих підкладках при різних температурах джерела.

Стабільні плівки монооксиду кремнію можуть бути отримані в високому вакуумі при температурі джерела від 1250°C до 1400°C або в гіршому вакуумі, що містить пари води, при менших температурах джерела. Однак в останньому випадку плівки зазвичай все ж до певної міри гігроскопічні.

2 МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ОПТИЧНИХ ПОКРИТТІВ

2.1 Вступ

Оптичні тонкі плівки набувають все більшого значення майже у всіх технологічних сферах, що займаються світлом, від приладобудування до комунікацій, обробки даних, енергетики, медицини, товарів народного споживання, боротьби з підробкою тощо. Розробка – важлива частина роботи, що підтримується значними успіхами у процесі осадження матеріалів.

Методи синтезу можуть бути напіваналітичними або чисто числовими. Прикладами напіваналітичних підходів є такі, що базуються на еквівалентних шарах, буферних шарах, поліномному синтезі, ефективних інтерфейсах, діаграмах пропуску тощо, описаних [6]. Отримані таким чином конструкції часто складаються з груп чвертьхвильових шарів (їх оптична товщина дорівнює чверті довжини хвилі). Таким чином можна створити досить складні фільтри. Такі фільтри часто простіше виготовити, ніж високооптимізовані чисто числові конструкції.

Підходи до раннього числового синтезу включають складний пошук Добровольського, поступову еволюцію та мінусову фільтрацію, техніку відхилення Сауелла та статистичний пошук Танга [7], [8], [9], [10], [11]. Комплексний пошук систематично досліджує простір параметрів невеликого набору товщин шару та матеріалів. Поступова еволюція – це поступове формування груп шарів, створених таким чином. У техніці тригерної конструкції, набір, що складається з двох діелектричних матеріалів, поділений на багато тонких шарів. Показник заломлення кожного шару інвертується послідовно, і найкраща конфігурація зберігається. Добровольський скоротив підхід до трьох матеріалів, включаючи можливість додавання металів [12]. Підхід Танга - це ранній підхід до глобальної

оптимізації, де структури генеруються за допомогою статистичної вибірки просторових параметрів шару. Вибірка обмежується областями, де значення, що характеризують залишкові спектральні похибки, залишаються нижче певного рівня, який поступово знижується до, в принципі, найнижчого мінімуму.

2.2 Метод перетворення Фур'є

Метод перетворення Фур'є – це, мабуть, перший по-справжньому успішний підхід, здатний створити практичні конструкції діелектричних плівок для довільних спектральних характеристик. Застосування цього методу для інжинірингу тонких плівок почалося в 1960-х роках [13]. Як випливає з назви, підхід заснований на наближеному співвідношенні Фур'є між логарифмом показника заломлення $n(x)$ та складною функцією $\bar{Q}(\sigma)$, де σ – коефіцієнт пропускання чи відбиття.

$$\ln\left(\frac{n(x)}{n_0}\right) = \frac{j}{\pi} \int \frac{\bar{Q}(\sigma)}{\sigma} e^{-j2\pi\sigma} d\sigma \quad (2.1)$$

$$x = 2 \int_0^z n(z) dz \quad (2.2)$$

Змінна x – це координата оптичної товщини, виміряна від центру системи (інакше фаза повинна бути зміщена), z – звичайна товщина, $\sigma = \frac{1}{\lambda}$ – число коливань (зворотна довжині хвилі) і n_0 – константа, що використовується для центру показника заломлення у відповідному діапазоні. Для простоти будемо вважати, що світло знаходиться в нормальному падінні.

З рівнянь Максвелла можна показати, що комплексний коефіцієнт пропускання оптичного фільтра з однаковою підкладкою та навколишнім

середовищем може бути виражений у вигляді нескінченного ряду вкладених інтегралів [14]:

$$\frac{1}{t(\sigma)} = e^{-j2\pi\sigma x} \left\{ 1 + \int_0^x d\bar{Q}(x_1, \sigma) \int_0^{x_1} d\bar{Q}^*(x_2, \sigma) + \int \int \int + \dots \int + \dots \right\} \quad (2.3)$$

де $d\bar{Q}$ це інтеграл:

$$\bar{Q}(\sigma) = \int \frac{1}{2n} \frac{dn}{dx} e^{-j2\pi\sigma x} dx \quad (2.4)$$

Рівняння вище встановлюють залежність між $\bar{Q}(\sigma)$ та спектральними властивостями плівки. У методі перетворення Фур'є передбачається, що $\bar{Q}(\sigma)$ має мале значення, а умови, що перевищують другий порядок, нехтують. Фізично інтеграли представляють внутрішні віддзеркалення за рахунок зміни показника заломлення на різних шарах у плівці ($\frac{1}{2n} \frac{dn}{dx}$ – коефіцієнт відбиття Френеля). Кілька внутрішніх відбиттів ігноруються (два зберігаються при обчисленні пропущеного світла, один – для відбитого світла).

Було запропоновано багато аналітичних форм Q-функції, таких як [13], [14]:

$$Q = \sqrt{1-T} = R \quad (2.5)$$

$$Q = \sqrt{\frac{1}{T-1}} \quad (2.6)$$

$$Q = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{T}\right)} \quad (2.7)$$

$$\bar{Q} = \frac{r}{t} \quad (2.8)$$

де $R = rr^*$ – коефіцієнт відбиття, а T – коефіцієнт пропускання покриття Q – модуль складної Q-функції, виражений як:

$$\bar{Q}(\sigma) = Q(\sigma)e^{j\varphi(\sigma)} \quad (2.9)$$

Легко перевірити, що різні форми Q узгоджуються, коли R невеликий, але в іншому випадку розходяться, іноді набагато. Остання форма, яку іноді називають Q -функцією Делано, говорить про те, що фаза φ повинна приблизно дорівнювати $\arg \frac{r}{t}$. Однак фази вказуються рідко, особливо для цієї форми. Це ступінь свободи, яку можна використовувати. Фільтри напрочуд високого відбиття можуть бути спроектовані правильним вибором Q -функції та її фази [15].

У принципі рівняння (перше) забезпечує дуже простий спосіб розрахунку діелектричного фільтра заданого коефіцієнта пропускання чи відбиття. Однак є труднощі. Перше – приблизний характер Q -функцій. По-друге, повинна бути відома достатня частина спектральної області, де коефіцієнт відбиття не нульовий. Наприклад, неможливо розробити просвітлююче покриття, просто знаючи, що коефіцієнт відбиття повинен бути нульовим у деякій області довжини хвилі. Коефіцієнт відбиття більшості покриттів, не є нульовим за межами основної області, що цікавить. По-третє, похибки допускаються, коли накладаються обмеження на показники заломлення та загальну товщину. Q -фаза φ допомагає вирішити цю проблему. Напрочуд гарні відбивачі можуть бути спроектовані лише фазовою оптимізацією [15].

Для компенсації цих обмежень було запропоновано кілька варіантів ітераційної процедури [14]. Підхід, реалізований у Національній раді досліджень Канади (NRC), застосовує послідовні корективи до складної Q -функції:

$$\Delta Q = [Q(T_D - Q(T))]e^{j\psi} \quad (2.10)$$

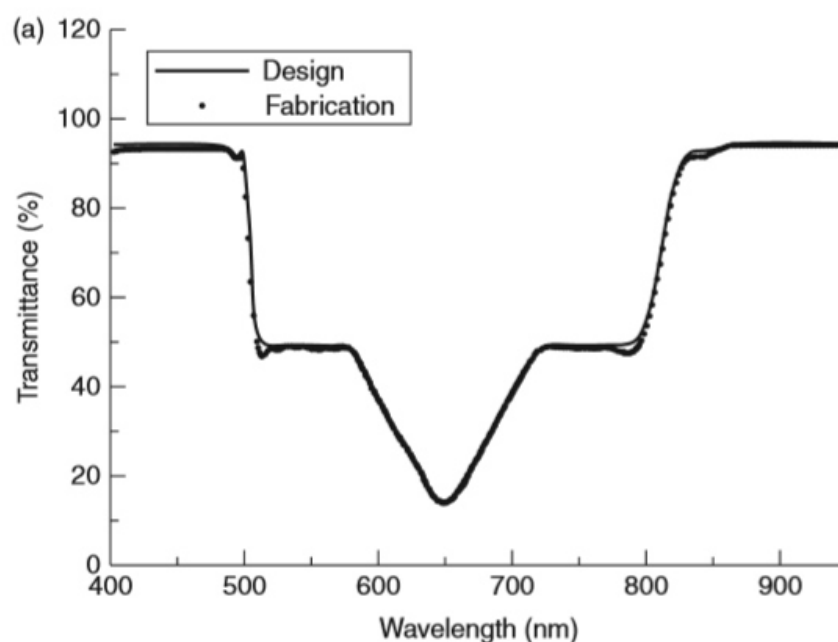
$$\psi = \arg\left(\frac{r}{t}\right) \quad (2.11)$$

де T_D - заданий коефіцієнт пропускання, а T , t і r – обчисленні значення, отримані з $n(x)$. Розрахунки виконуються за стандартним матричним

підходом після розділу $n(x)$ на тонкі шари. Матеріальна дисперсія та втрати, які ігноруються при перетвореннях Фур'є, можуть бути побічно внесені в матричні розрахунки [14]. Процедура масштабування також може застосовуватися до цільового пропускання [16].

Рівняння вище збільшує Q-фазу $\phi(\sigma)$ у напрямку, що відповідає Q-функції Делано $\frac{r}{t}$. Числові експерименти показують, що використання аргументу $\frac{r}{t}$ як початкової фази послідовно дає хороші результати. Однак, як було сказано, ця фаза спочатку зазвичай невідома. Можна обрахувати кілька плівок, які мають по суті одне відбиття у цікавій області, але різні фази, з яких можна вибрати найбільш підходящий варіант для виготовлення. Крім того, можна ігнорувати фазу і починати з абсолютно довільної стартової конструкції, наприклад, постійного показника заломлення. Уточнення ΔQ або Q також можливе для підвищення точності [14].

Незважаючи на свої обмеження, метод перетворення Фур'є генерує корисні конструкції багат шарових плівок. На малюнку (номер) наведено приклад фільтру, який нещодавно був розроблений та виготовлений [17]. Розрахунки проходять швидко. Зазвичай методи розрахунків та обчислювальні потужності поступово розвиваються та збільшуються.



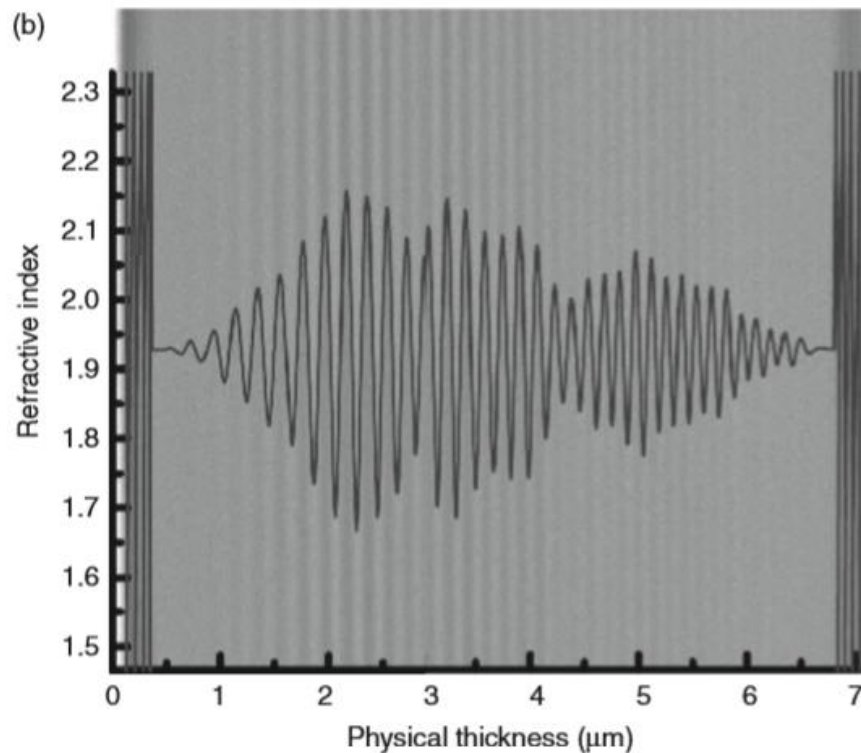


Рисунок 2.1 – Порівняння обчисленого та виміряного пропускання фільтра, розробленого методом перетворення Фур'є. Фільтр занурений між двома кварцовими пластинами. Дискретні шари на обох кінцях пригнічують пульсації через відбиття на зовнішніх інтерфейсах.

Зазвичай отриманні рішення поступово еволюціонують у квазі-багатошарові, коли модуляція показника заломлення (або допустимості) досягає своїх меж [15]. Це узгоджується з принципом максимального значення, який зазначає, що оптимальні рішення повинні бути двошаровими в таких типах задач [18]. Гібридні рішення можна легко перетворити на справжні багатошарові або використовувати як передові стартові конструкції для вдосконалення.

2.3 Неоднорідні методи обчислення

На жаль, метод перетворення Фур'є застосовується лише до світла, що надходить під одним кутом та є монополяризованим. Підхід, розглянутий у цьому розділі, знімає це обмеження.

Цей підхід здебільшого використовується для розрахунку діелектричних фільтрів. Дисперсію та втрати легко вводять, розглядаючи плівкові матеріали як регульовані суміші. В принципі, можливо оптимізувати коефіцієнт згасання (уявна частина показника заломлення, виражена в формі $n-ik$) незалежно від реальної частини n . Однак практична реалізація отриманих уявних матеріалів може бути проблемою. Цей варіант проектування існує в комерційному програмному забезпеченні. Через велику кількість задіяних параметрів слід особливо враховувати точність обчислень. Градієнти, використовувані в процедурах оптимізації, обчислюються за точними аналітичними формулами і уникають обчислень повторюваних матриць. На рисунку 2.2 наведено приклад ширококутового ширококутного, неполяризаційного антивідбивного покриття, синтезованого для кутів падіння 0° , 30° , 45° , 60° і 70° у повітрі [15]. Профіль показника заломлення, представлений пунктирною лінією, сильно неоднорідний. Це зрозуміло, оскільки максимальний контраст допуску р-поляризації $\frac{n}{\cos\theta}$ виходить із показниками заломлення при $\theta > 40^\circ$.

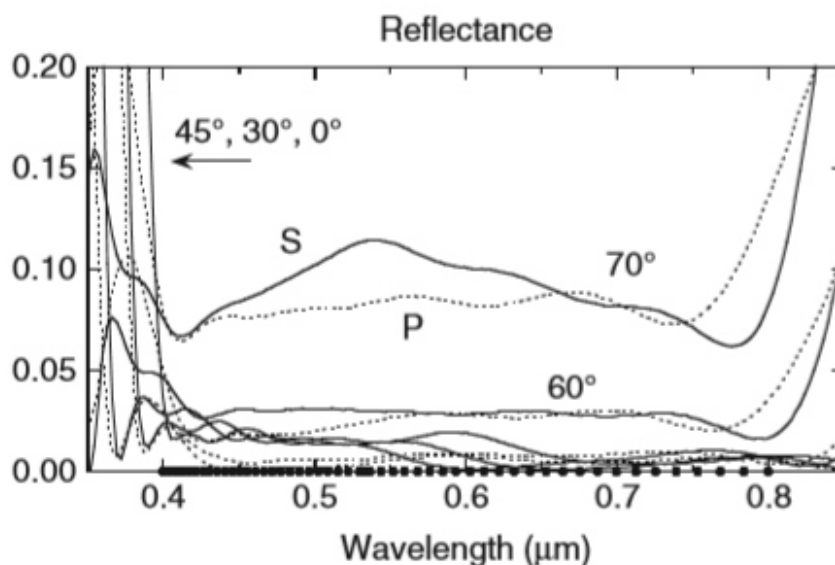


Рисунок 2.2 – Широкопasmове, просвітлююче покpиття, спpоектоване неоднорідним методом для кутів падіння 0, 30°, 45°, 60° та 70° у повітрі

2.4 Голковий метод

Голковий метод, мабуть, найвідоміший і найуспішніший метод обчислення тонкої плівки [18]. Він широко впроваджується в комерційне програмне забезпечення для розрахунків. Якщо коротко, він складається з вставки дуже тонких шарів (голок) у багат шарову систему для поліпшення її спектральних показників. Голки з найбільш підходящого доступного матеріалу вставляються в оптимальне положення. Модифіковану багат шарову структуру вдосконалюють і всю процедуру повторюють по мірі необхідності. У так званому режимі поступового вдосконалення (не плутати з підходом Добровольського) загальна товщина конструкції штучно збільшується час від часу шляхом додавання шару сумісного матеріалу, як правило, на стороні підкладки, коли прогрес не може бути досягнутий інакше.

Запропоновано варіант, коли показники заломлення голки також вдосконалюються. [15]. Оптимальні показники голки обчислюються за допомогою параболічної інтерполяції по трьом точкам, так що функція

збурень для визначення положень голки повинна обчислюватися лише двічі (для двох індексів голки, третій – індекс неруйнованого шару). Продемонстровано такі ж рішення, як і ті, що отримані неоднорідним методом. Два підходи поводяться по-різному і доповнюють один одного. Наприклад, неоднорідний метод швидко дає загальне уявлення про структуру конструкції, тоді як голки, як правило, більш ефективні для налаштування в кінцевому підсумку. Недоліком голкового підходу є часте поширення тонких шарів. Прості процедури їх вилучення були описані та реалізовані в комерційному програмному забезпеченні. Компроміси повинні здійснюватися між спектральними показниками та мінімально прийнятною товщиною шару. Було запропонували відповідний підхід, коли замість голок в потрібні положення вставляють невеликі шари [19]. Показники заломлення та товщини доводять до середніх. Виправданям є те, що може бути простіше виготовити товсті шари з проміжними показниками, ніж тонкі шари з двох матеріалів. Багатоматеріальні рішення можна перетворити на два матеріали за допомогою стандартного перетворення Герпіна [20].

2.5 Глобальна оптимізація

Глобальна оптимізація є важливим пунктом чисельного аналізу, де мета – знайти найнижчий мінімум або найвищий максимум функції у складному наборі параметрів. Такі обчислення поширені в областях, які потребують складного математичного моделювання чи аналізу даних, наприклад молекулярна динаміка, розпізнавання зображень та образів, штучний інтелект, контроль трафіку, управління навколишнім середовищем та ризиками, фінанси тощо. Можливо багато стратегій пошуку. Загальною рисою є те, що вони не опускаються одразу до доступного мінімуму. Існує можливість піти вгору, щоб збільшити шанси знайти найкращий можливий результат. Концептуально найпростіша стратегія – це переглянути всі можливості. Однак це швидко стає недоцільним, оскільки кількість

невідомих збільшується. Статистичний пошук є більш ефективним, але глобальний мінімум виявляється з обмеженою ймовірністю.

Глобальна оптимізація мала обмежену популярність у тонких плівках з моменту її впровадження десятиліть тому. Існує загальне уявлення про те, що розрахунки проходять повільно. Крім того, рішення є глобальними в просторі параметрів, який повинен бути належним чином налаштований і може потребувати прогресивних коригувань (наприклад, допуски або кількість шарів). Тим не менш, були отримані цікаві результати, а прогрес у обчислювальній потужності робить цей тип підходу більш привабливим.

3 РОЗРАХУНОК СТРУКТУРИ СВІТЛОФІЛЬТРІВ

3.1 Опис програмного забезпечення, використаного для розрахунку параметрів світлофільтра.

Для розрахунку параметрів світлофільтра було задіяно онлайн бібліотеку ресурсу www.filmetrics.com [5] (рисунок 3.1) та програмне забезпечення для моделювання фізичних процесів COMSOL Multiphysics (рисунок 3.2), яка була використана за студентською ліцензією.

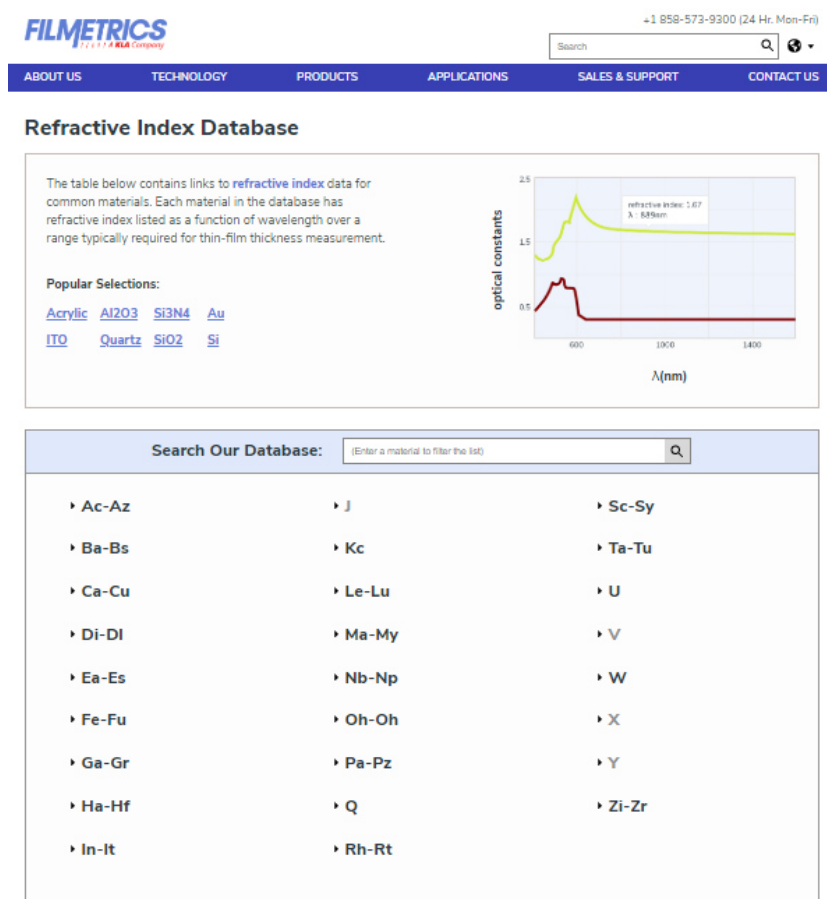


Рисунок 3.1 – Підрозділ Refractive Index Database сайту www.filmetrics.com

База матеріалів сайту містить дані про коефіцієнт заломлення матеріалів в залежності від довжини падаючої хвилі, які потрібні інженеру для проектування плівкових систем.

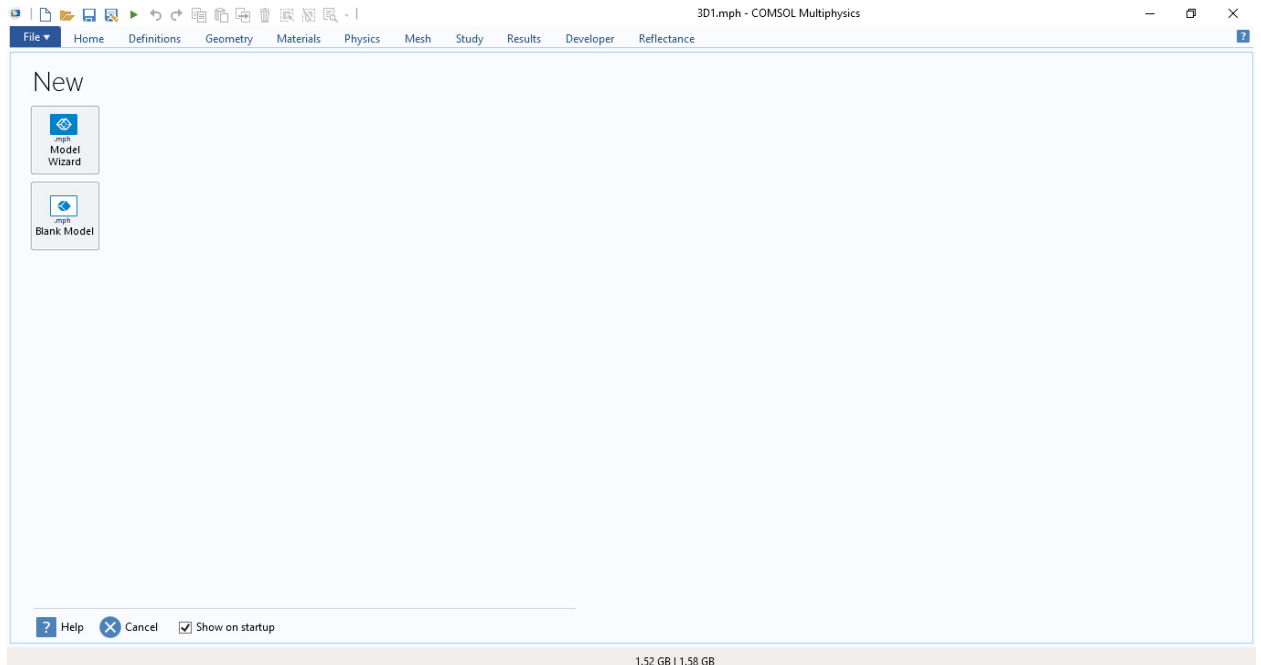


Рисунок 3.2 – Стартова сторінка програмного забезпечення COMSOL Multiphysics

За допомогою програмного пакету COMSOL Multiphysics інженери і вчені моделюють конструкції, пристрої та процеси у всіх областях інженерних, виробничих і наукових досліджень.

COMSOL Multiphysics – це інтегрована платформа для моделювання, що включає в себе всі його етапи: від створення геометрії, визначення механічних властивостей матеріалів і опису фізичних явищ, до налаштування рішення і процесу обробки поста, що дозволяє отримувати точні і надійні результати.

База матеріалів сайту містить дані про коефіцієнт заломлення матеріалів в залежності від довжини падаючої хвилі, які потрібні інженеру для проектування плівкових систем.

3.2 Завдання на роботу

Одже стоїть завдання інженерії плівкової системи на підкладці зі скла за для безпеки очей людини від впливання хвиль довжиною коротше 450 нм (світлового спектру світлодіода), адже вони потроху руйнують сітківку.

У попередній роботі, бакалаврського рівня, було промодельовано найпростіші варіанти оптичних схем (рисунок 1). Результати виявилися непоганими, але для отримання більш гарних показників треба використовувати складніші оптичні схеми.

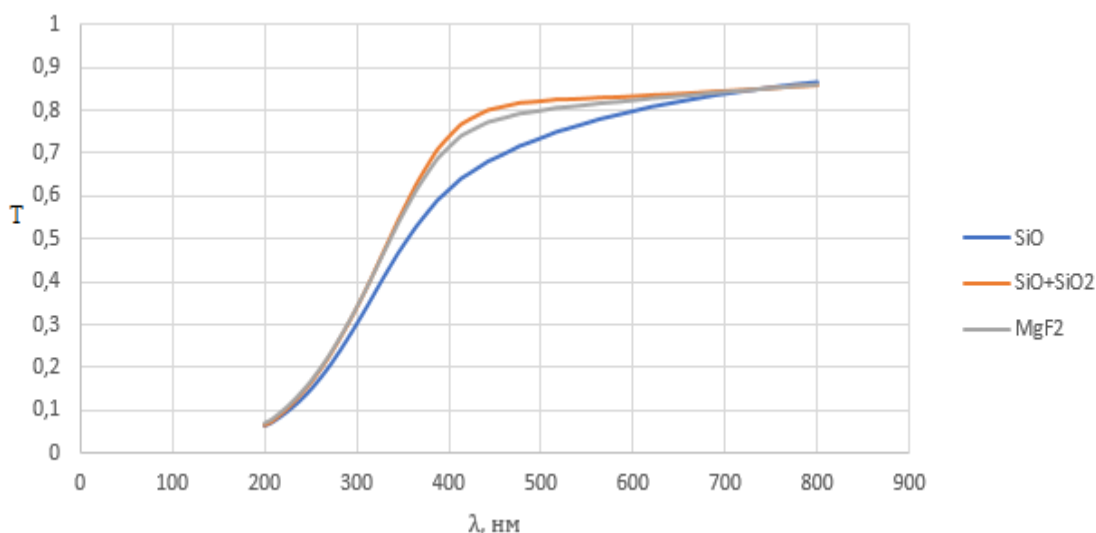


Рисунок 3.3 – Коефіцієнт пропускання плівкових систем, які складаються з шарів SiO, SiO та SiO₂, SiO та MgF₂ нанесеного на скло, в залежності від падаючої довжини хвилі

Значним недоліком цих показників є те, що в нас немає значного блокування спектру від 400 до 450 нм, та є незначне блокування корисного випромінювання.

Зазвичай, за для просвітлення у плівкових системах використовують матеріали, коефіцієнт заломлення яких, на опорній довжині хвилі наближується до коефіцієнту заломлення основного шару поділеного на $\sqrt{2}$

на цій же довжині хвилі. Саме тому, в даній ситуації буде доцільно використовувати MgF_2 , адже показники заломлення цього матеріалу максимально наближенні до значення 1.53, при довжині падаючої хвилі 480 нм (рисунок 3.4).

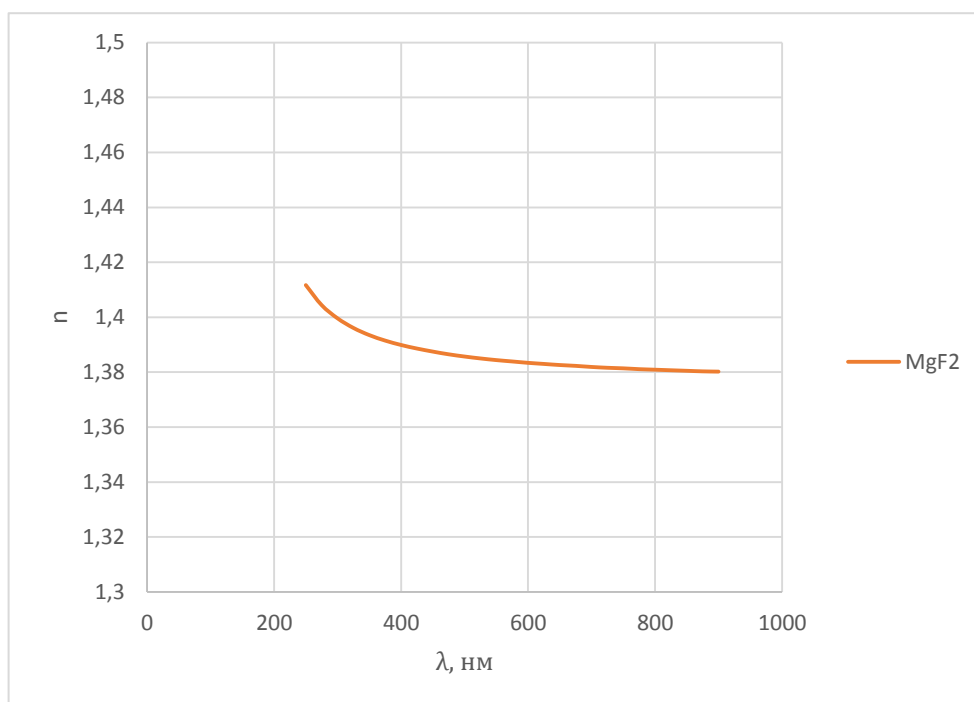


Рисунок 3.4 – Графік залежностей коефіцієнтів заломлення, MgF_2 від довжини падаючої хвилі

Ідеальним матеріалом для основного шару виглядає SiO_2 , адже максимум його коефіцієнту заломлення припадає на УФ-хвилі, та має досить непогану крутизну спаду при наближенні до синього спектру (рисунок 3.4)

Оптимальною товщиною покриття буде геометрична довжина чверті хвилі від опорної довжини хвилі. За опорну візьмемо 480 нм – початок спектру випромінювання, який найліпше сприймається очима. Тоді чвертьхвильова геометрична довжина хвилі становитиме 60 нм, адже коефіцієнт заломлення SiO_2 при довжині падаючої хвилі 480 нм дорівнює 2.

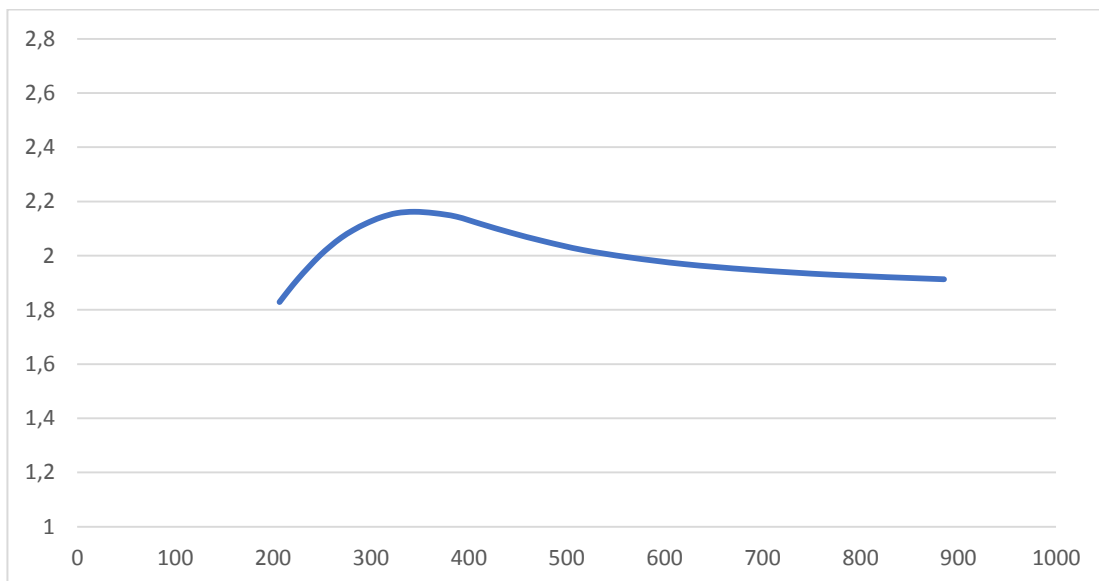


Рисунок 3.5 – Залежність коефіцієнту заломлення від довжини падаючої хвилі на прикладі монооксида кремнія

Пропонується, за допомогою програмного забезпечення COMSOL Multiphysics, промодельовати параметри оптичних схем наступного складу: SiO+MgF₂ та SiO+MgF₂ та MgF₂ на зворотній стороні підкладки. Плівка MgF₂ має просвітлюючі властивості, таким чином ми намагаємося уникнути блокування корисного спектру випромінювання.

3.3 Опис роботи у COMSOL Multiphysics

3.3.1 Опис фізичного процесів для моделювання. Для того, щоб почати моделювати у COMSOL, спочатку треба вибрати вимір, у якому буде працювати фізична модель. У нашому випадку достатньо 2D, але було обрано 3D, заради того, щоб була можливість імітації світла під більшою кількістю кутів та напрямків (рисунок 3.6).

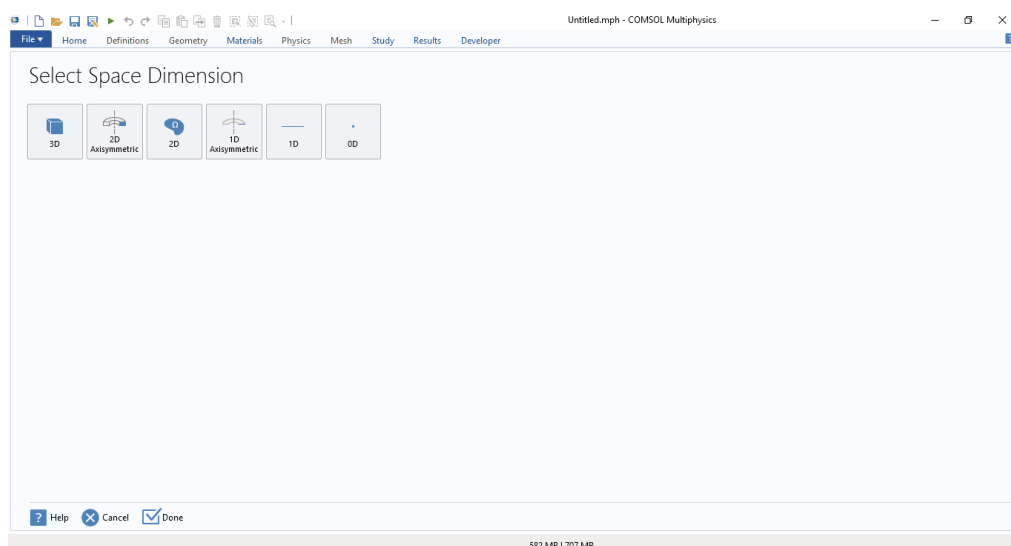


Рисунок 3.6 – Вікно вибору виміру у COMSOL Multiphysics

Далі треба обрати фізичні процеси, які передбачається моделювати. Ми обираємо такий ланцюжок: оптика → променева оптика → геометрична оптика (рисунок 3.7).

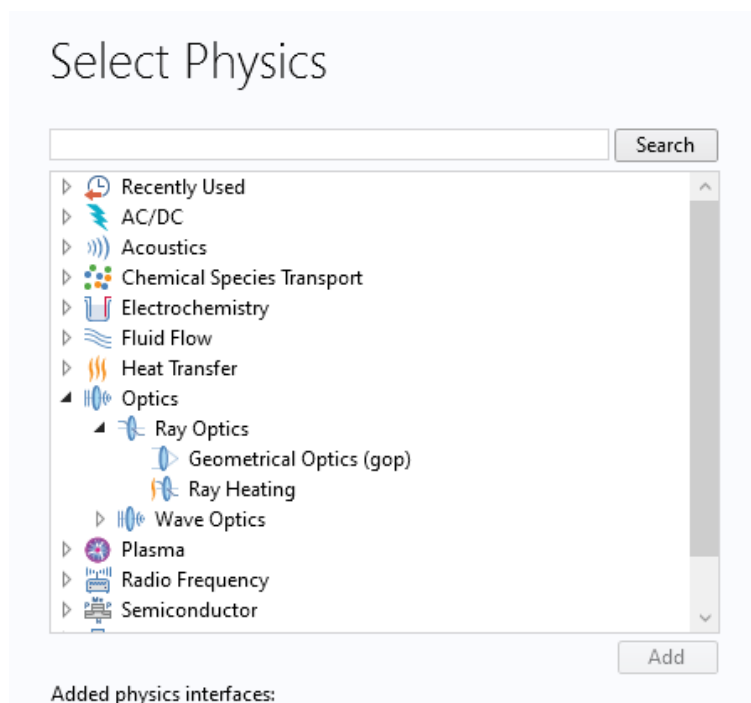


Рисунок 3.7 – Вікно вибору фізичних процесів

Наступний крок – це призначення змінних для системи відліку та векторів. В даному випадку векторами будуть промені світла (рисунок 3.8).

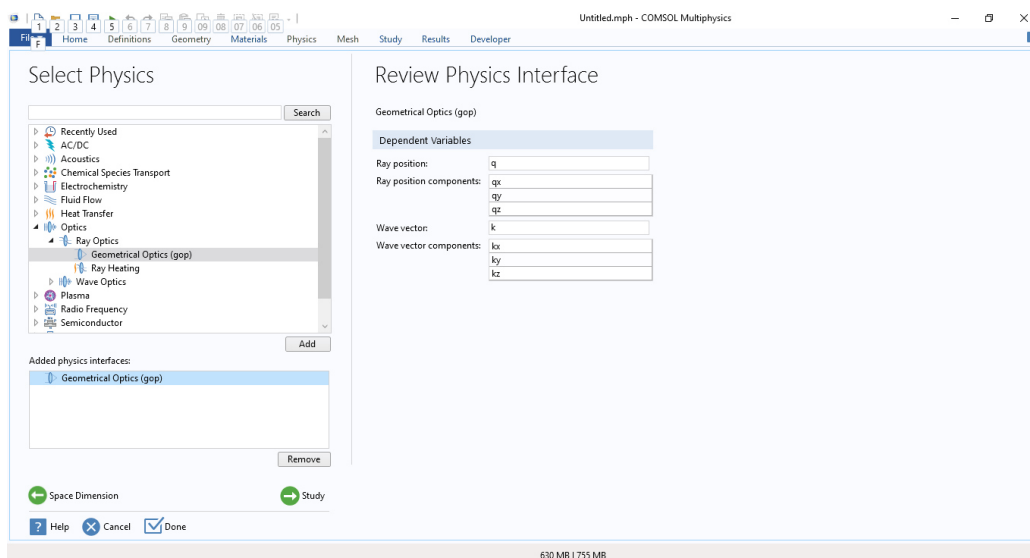


Рисунок 3.8 – Вікно призначення змінних

Останній крок – призначення предмету вивчення. В цій роботі, якщо казати загально, ми вивчаємо розповсюдження світлових променів через спеціальні світловізрізаючі фільтри (рисунок 3.9).

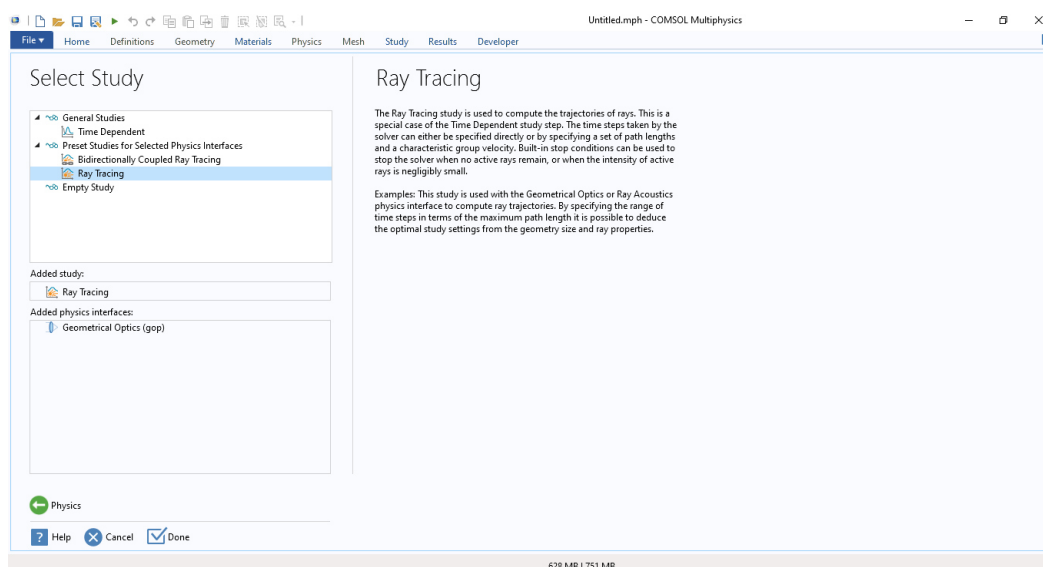


Рисунок 3.9 – Вікно вибору предмету вивчення

3.3.2 Інженерія покриття у програмному середовищі. Після завершення вибору фізичних процесів для моделювання, програма нас перемістить у робочий простір. Перше, що потрібно створити – це база необхідних констант. Для того, щоб зробити це, треба перейти до меню «Parameters» та додати дані в таблицю (рисунок 3.10). Були додані такі дані: показники заломлення скла, SiO_2 , MgF_2 , при довжині хвилі у 480 нм. Також було додано коефіцієнт заломлення повітря та, безпосередньо, значення опорної довжини хвилі. Нагадаємо, що дані були взяті з сайту www.filmetrics.com.

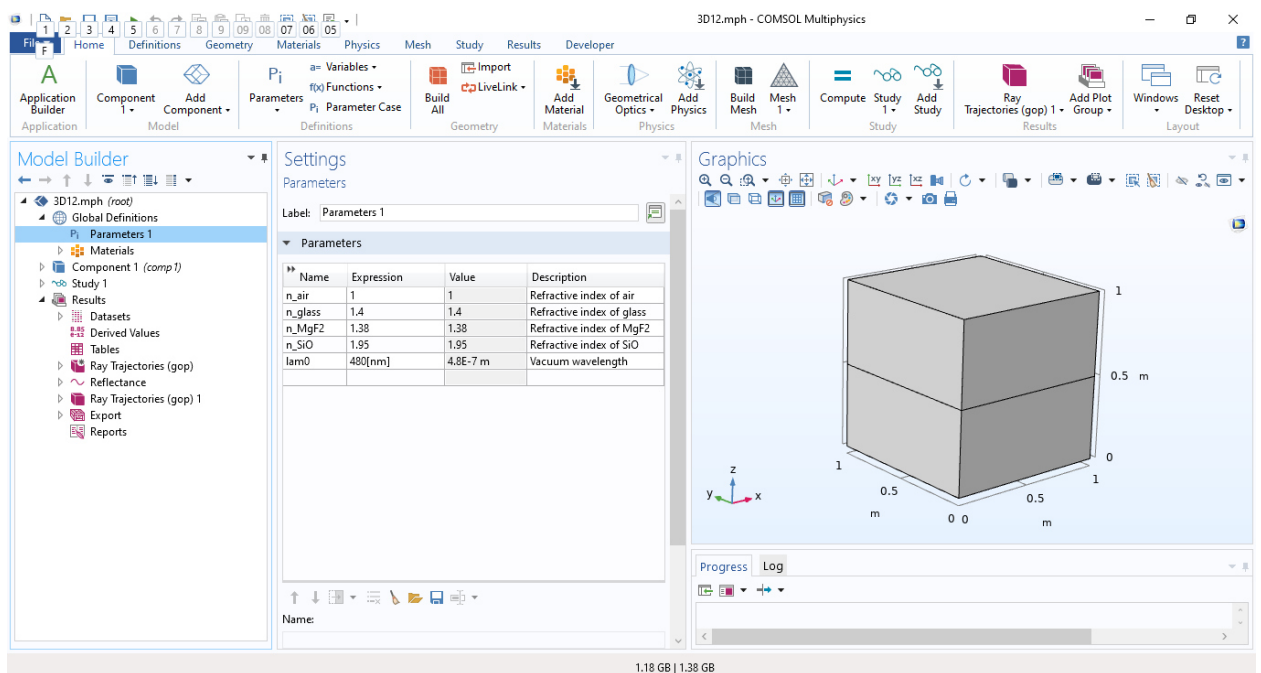


Рисунок 3.10 – Штучно створена база даних

Надалі треба створити середовища для моделювання. Для цього обираємо меню «Geometry», в якому обираємо фігуру типу куб (рисунок 3.11). У цьому меню ми можемо змінювати розміри куба, який буде імітувати середовище, з зазначеними параметрами. Також, ми можемо зазначити необхідну кількість шарів у середовищі, і присвоювати кожному шару свої параметри.

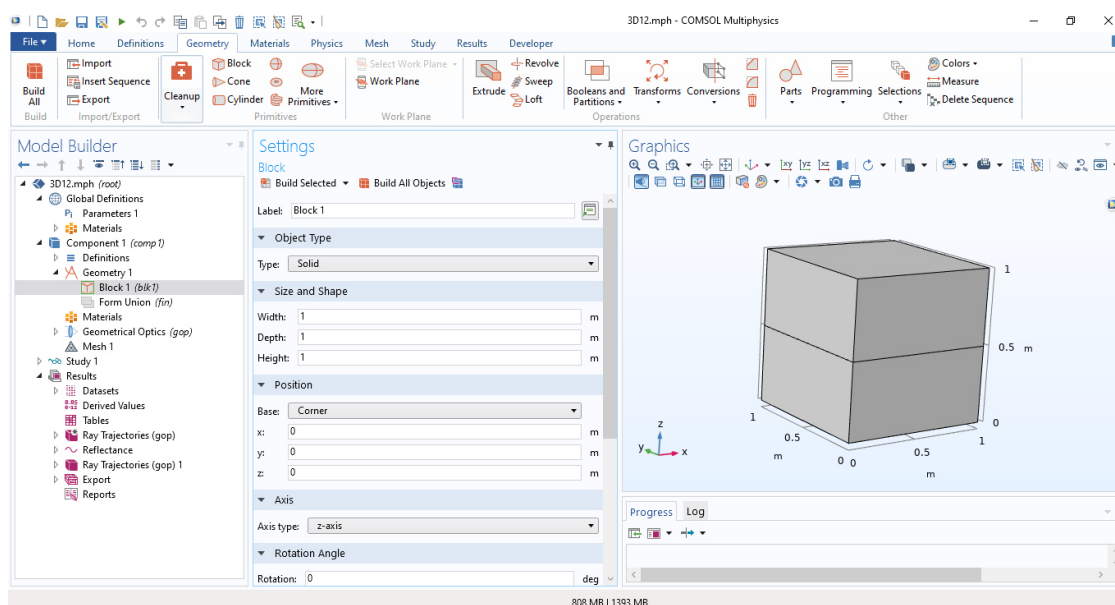


Рисунок 3.11 – Створення середовища

Створюємо середовище, складене з трьох шарів, середнє з яких – скло товщиною 2 мм, а два інших то повітря. Але для того, щоб призначити середовища треба додати їхні властивості до бази матеріалів. Робиться це у вкладці «Materials» (рисунок 3.12). Можливе додавання багатьох параметрів, але нас цікавлять показники заломлення світла.

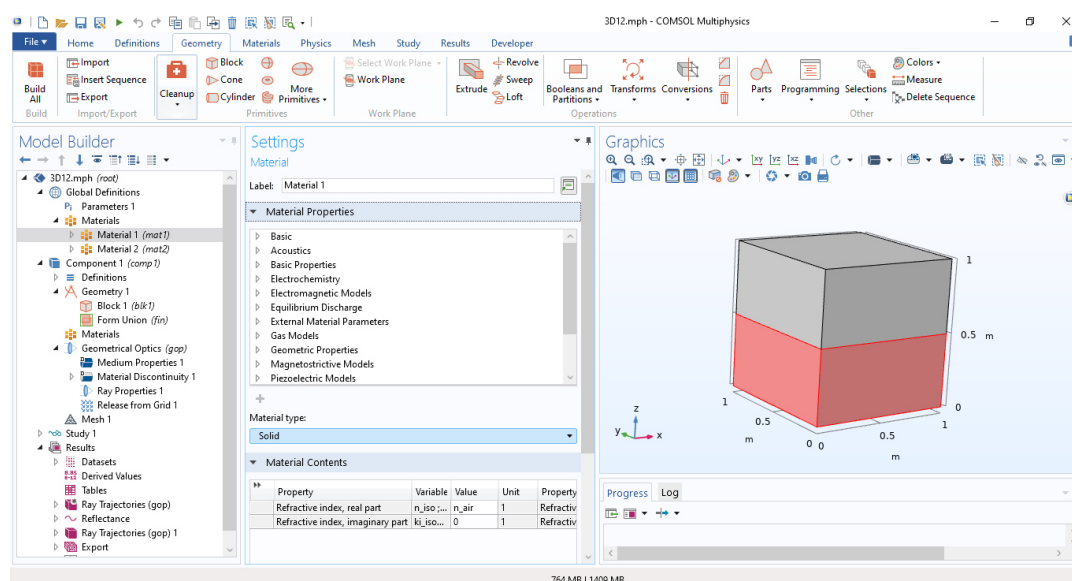


Рисунок 3.12 – Призначення середовищ до шарів та задання їх властивостей

Надалі ми будемо безпосередньо покриття. Це можна зробити, якщо перейти до підменю «Material Discontinuity», яке знаходиться у підменю «Geometrical Optics», меню «Component». В цьому вікні є можливість змінювати товщину плівки, вибрати її матеріал, обрати кількість шарів та розташування відносно підкладки (рисунок 3.13).

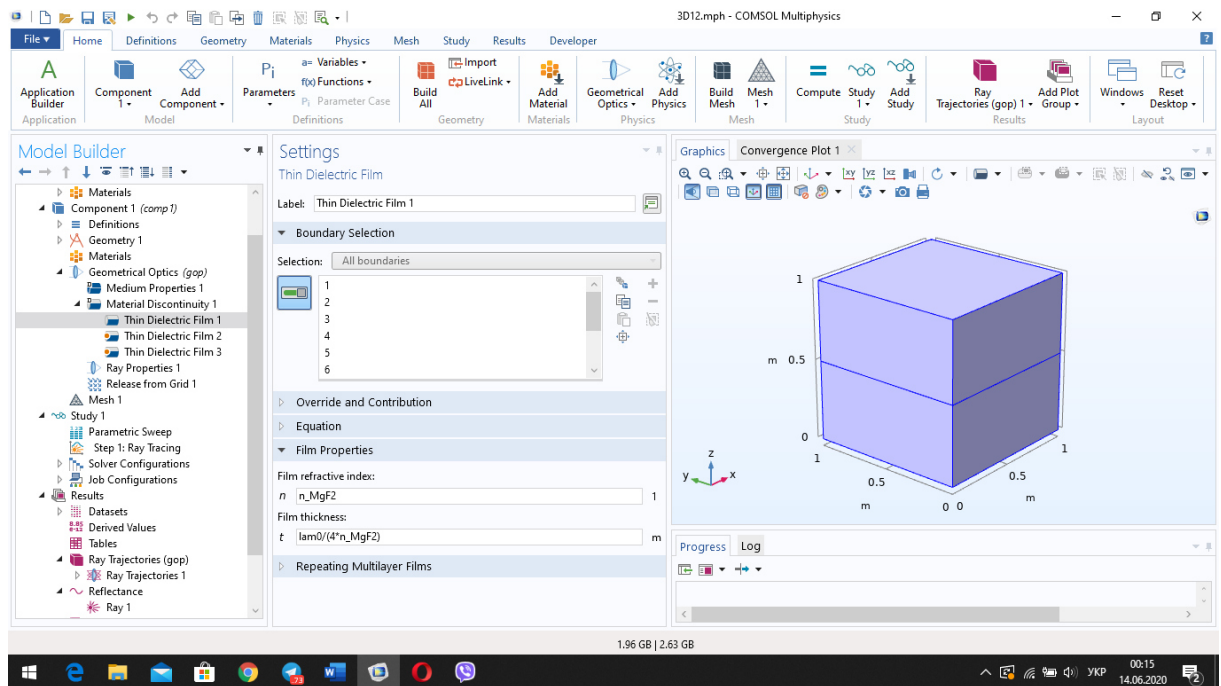


Рисунок 3.13 – Проектування шарів плівки

Також треба призначити вектор розповсюдження світла. Це робиться у вікні «Release from Grid». У цьому ж вікні обирається діапазон довжин хвиль випромінювання, для якого робиться розрахунок (рисунок 3.14).

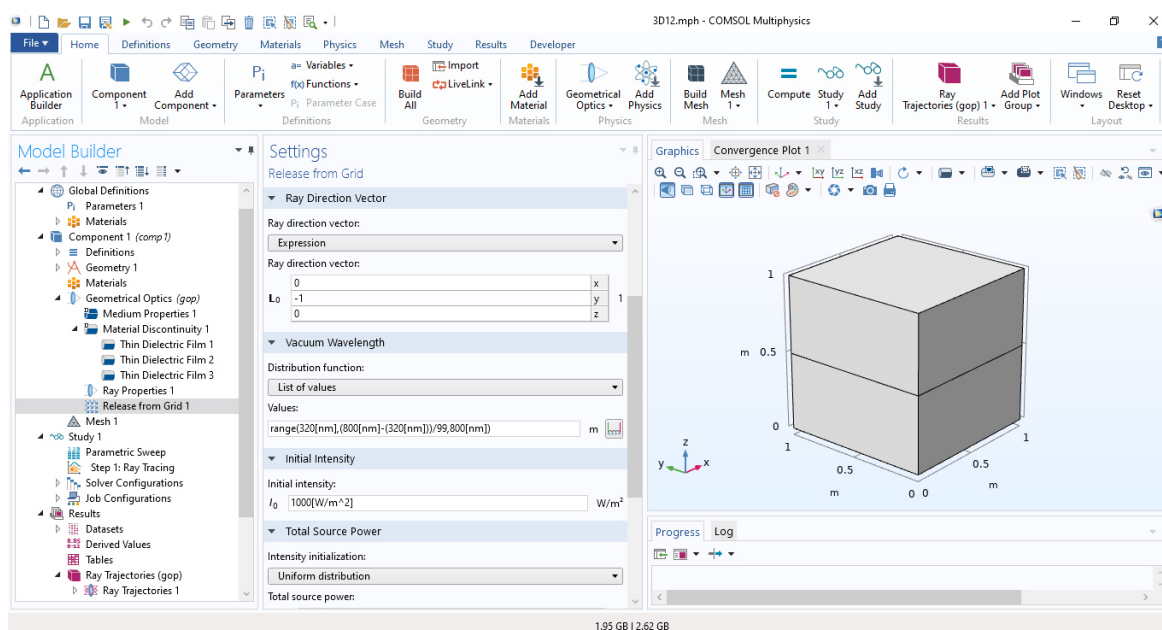


Рисунок 3.14 – Призначення вектору розповсюдження світла

Далі робиться безпосередньо розрахунок при натисканні кнопки «Compute». Якщо є помилка в призначенні параметрів, то програма оповістить користувача про це.

Коли розрахунок завершено, постає необхідність у виведенні результатів на графіки, таблиці тощо. Це можна зробити у меню «Results» бокового вікна. При натисканні на це меню, програма запропонує обрати вид графіку або таблиці, обрати їм назву і т.д. (рисунок 3.15)

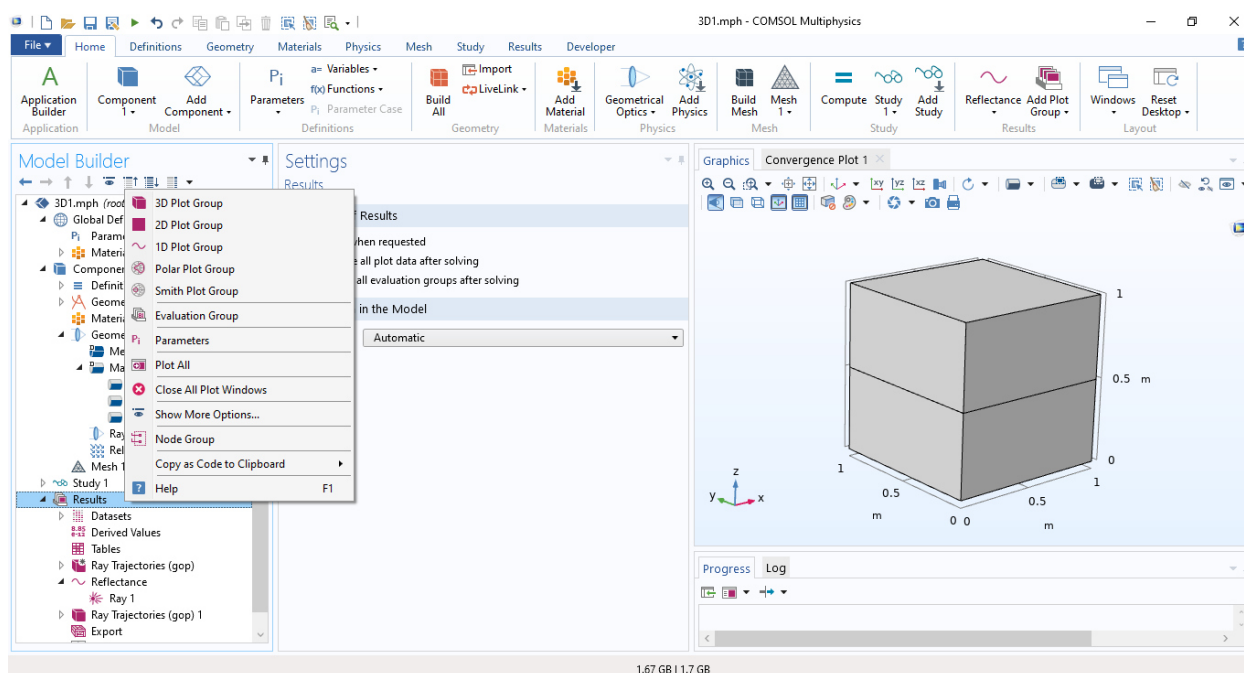


Рисунок 3.15 – Виведення результатів

Одже, перший крок моделювання – це розрахунок плівки $\text{SiO}+\text{MgF}_2$ на підкладці зі скла, товщиною в 2 мм. На графіку показано результат моделювання у вигляді графіку залежності відбиття плівки від довжини хвилі (рисунок 3.16).

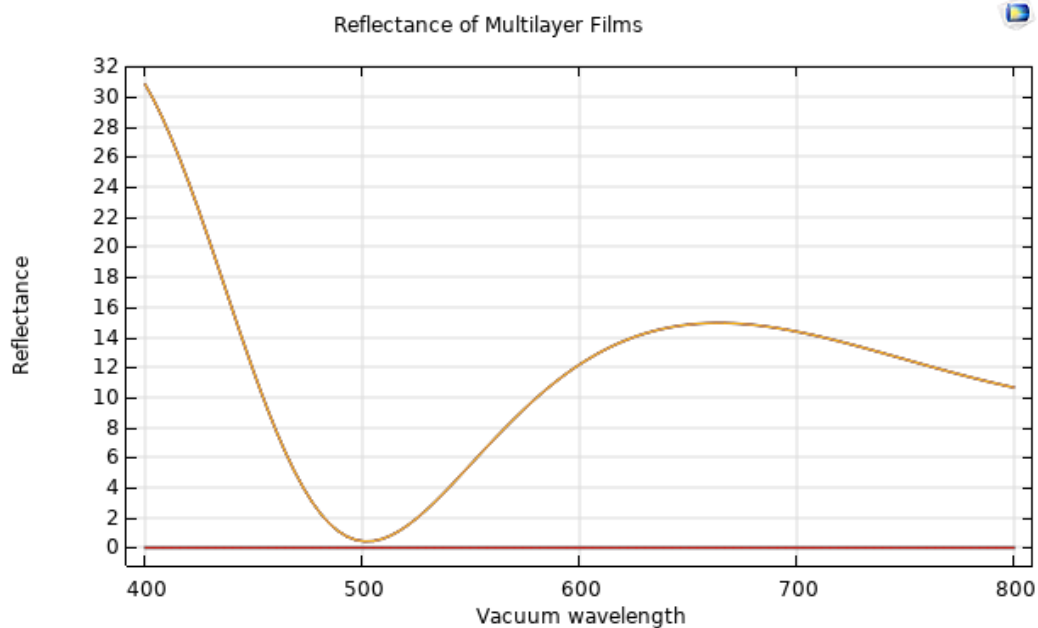


Рисунок 3.16 – Коефіцієнт відбиття плівки $\text{SiO}+\text{MgF}_2$ на підкладці зі скла

Бачимо, що в УФ-діапазоні коефіцієнт відбиття становить приблизно 30 процентів (до 415 нм), в синьому спектрі випромінювання – від 20 до 28 процентів (від 415 нм до 450 нм). В діапазоні від 480 нм до 500 нм око людини найбільш чутливе до світла. Коефіцієнт пропускання на цьому рубежі становить майже 100 процентів, що є майже ідеальним результатом. Так, коефіцієнт відбиття не дуже великий, але ми не жертвуємо якістю сприймаемого зображення. Але характеристики плівки, можна оптимізувати, додавши ще один просвітлюючий шар, адже ми маємо значне відбиття у спектрі червоного світла (після 600 нм). Для цього додаємо ще один просвітлюючий шар. Вийде конфігурація $\text{SiO}+\text{MgF}_2$ та MgF_2 на зворотній стороні підкладки (рисунок 3.17).

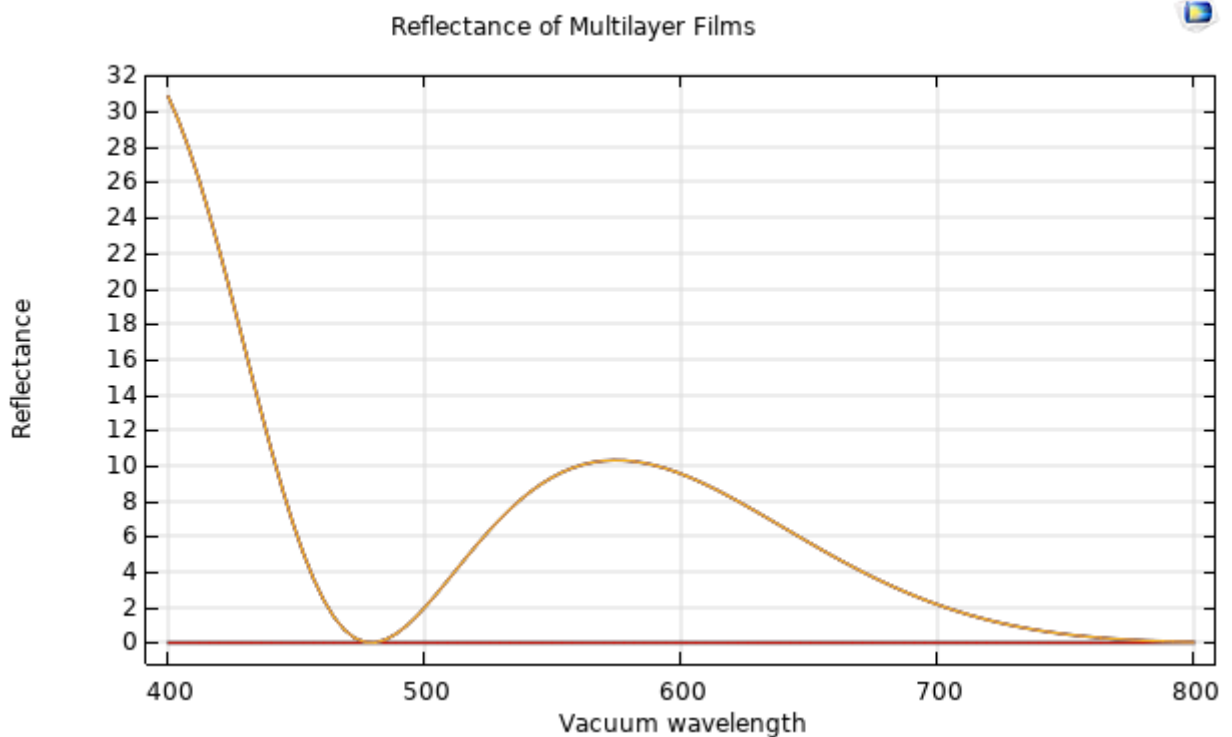


Рисунок 3.17 – Коефіцієнт відбиття плівки $\text{SiO}+\text{MgF}_2$ та MgF_2 на зворотній стороні підкладки. Матеріал підкладки – скло

В УФ-діапазоні коефіцієнт відбиття становить приблизно ті самі 30 процентів (до 415 нм), в синьому спектрі випромінювання – від 20 до 28

процентів (від 415 нм до 450 нм). В діапазоні від 480 нм до 500 нм – майже 100 процентів. Але в діапазоні від 580 нм до 700 нм ми бачимо покращення ситуації.

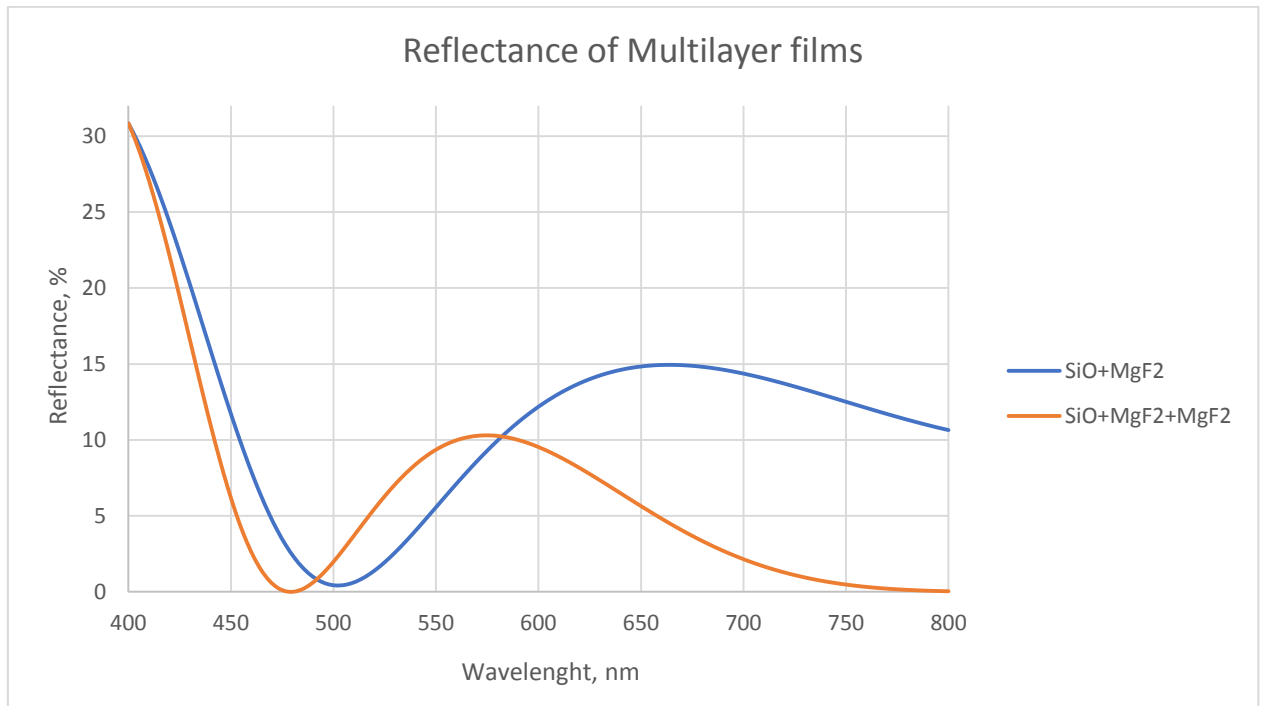


Рисунок 3.18 – Порівняння характеристик відбиття плівок SiO+MgF₂+MgF₂ та SiO+MgF₂

Є отриманні первинні результати, вони непогані, але і їх можна вдосконалити. Програмне забезпечення COMSOL Multiphysics дозволяє задавати змінні до параметризації, щоб отримати напрочуд гарні результати, не прибігаючи кожен раз до перерахування при зміні параметрів.

Нагадаю, що ми проектуємо плівки на основі чвертьхвильової довжини. Але дамо програмі змогу вираховувати плівки в діапазоні довжин від $\frac{\lambda}{3}$ до $\frac{\lambda}{5}$. Також перерахуємо всі можливі комбінації довжин у цьому діапазоні. Описується параметризація у меню «Parametric Sweep» (рисунок 3.19).

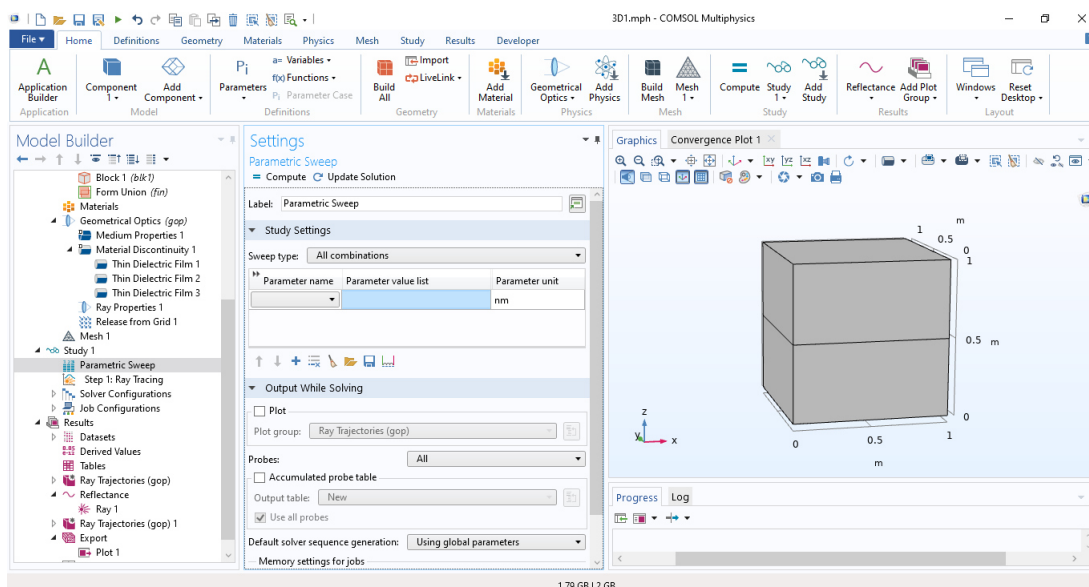
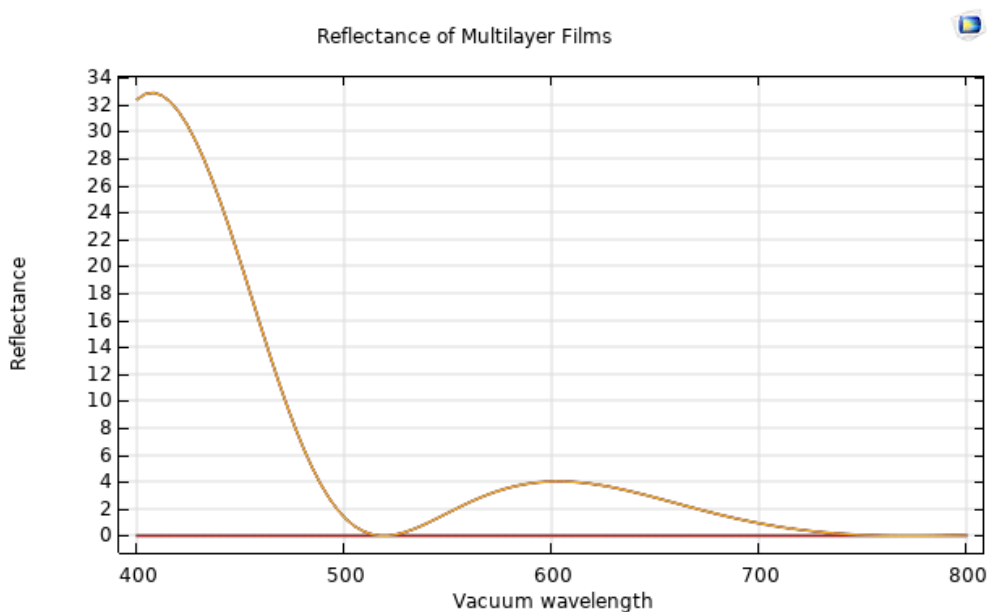


Рисунок 3.19 – Меню «Parametric Sweep»

Маємо наступні результати (рисунок 3.20). При довжині плівки $\frac{\lambda}{4.2}$ для просвітлюючого шару та $\frac{\lambda}{3.5}$ для SiO, майже немає непотрібного зрізу в діапазоні корисного випромінювання (від 470 до 700 нм). Також вдалося на 2 проценти підвищити корисний зріз у УФ-діапазоні (до 400 нм).

Рисунок 3.20 – Параметризовані результати для плівки SiO+MgF₂+MgF₂

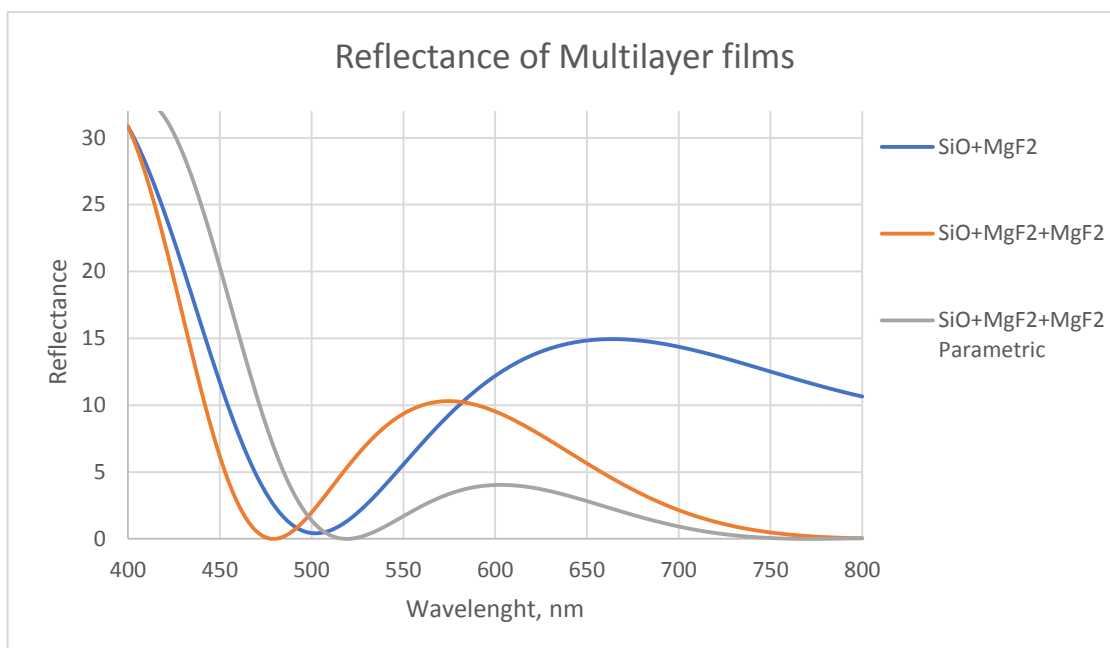


Рисунок 3.21 – Порівняння результатів розрахунків

Одже можна побачити, що покриття з додатковим просвітлюючим шаром та оптимізацією параметрів мають більший коефіцієнт пропускання у частині спектру, який може сприйняти людське око. Так, не вдалося повністю зрізати діапазон ультрафіолетового випромінювання, але перевагою спроектованої плівки є те, що майже цілком вдалося зберегти корисне світло. Для більш вдалих результатів треба проектувати більш багат шарові покриття, але це тягне за собою удорожчання в виробництві та більші витрати матеріалів для наплення.

ВИСНОВКИ

Відзначимо, що безперервно розширюється робочий спектральний діапазон оптичних приладів визначає вимоги до конструкційних складових, в першу чергу, до оптичних елементів і їх тонкошаровим покриттям. Поряд з вивченням властивостей оптичних тонкоплівкових систем, найбільші зусилля, безсумнівно, витрачаються на пошуки нових матеріалів для їх реалізації. Розробка технології отримання нових матеріалів в сукупності зі створенням методів і засобів отримання тонких плівок цих матеріалів дозволяє і надалі вдосконалювати як технологію виготовлення інтерференційних покриттів, так і їх експлуатаційні, спектральні і економічні характеристики.

Щодо спроектованого покриття, то, на мою думку, для тришарового покриття було досягнуто максимум результату. Ми маємо зменшення впливу небезпечного для очей УФ-випромінювання, на третину. В цей же час, ми не отримали блокування корисного спектру випромінювання.

Безумовно, можливо покращення відбивних властивостей покриттів з монооксиду кремнію, але це вже буде не тришарова структура. Задля цих цілей використовуються плівки з шарами, які повторюються – так звана структура «стеків». Але вона дорожча у виробництві та збільшує витрати матеріалів.

Надалі планується експериментально напилити плівку такої структури, яка була промодельована, для того щоб оптимізувати отримані результати до умов реального життя. Моделюючи, ми припускаємо, що в нас ідеальні умови розповсюдження світла, ідеально напилена плівка, тощо. Але реальні результати завжди ненабагато відрізняються від ідеальних.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф, пер. с англ. под ред. Г.П. Мотулевич. М.: Наука, 1970. – 856 с.
2. Мешков, Б. Б., Яковлев. П.П. Проектирование интерференционных покрытий / М.: Машиностроение, 1987. 185 с.
3. Путилин Э. С. Оптические покрытия / СПб: ГУ ИТМО, 2005.
4. Крылова. Т.Н. Интерференционные покрытия / Л.; Машиностроение, 1973. 224 с.
5. filmetrics.com / URL: <https://www.filmetrics.com/refractive-index-database> (дата звернення 20.05.2020).
6. Martin P. J., Macleod H. A., Netterfield R. P. Ion-beam-assisted deposition of thin films / Applied Optics, 1983.
7. Dobrowolski J. A. Completely automatic synthesis of optical thin film systems / Applied Optics, 1965.
8. Dobrowolski J. A. Versatile computer program for absorbing optical thin film systems / Applied Optics, 1981.
9. Dobrowolski, J. A. Numerical methods for optical thin films / Optic Photon News, 1997.
10. Tang, J. F. and Zheng, Q. Automatic design of optical thin-film systems – merit function and numerical optimization method / J Opt Soc Am, 1982.
11. Southwell, W. H. Coating design using very thin high- and low-index layers / Applied Optics, 1985.
12. Dobrowolski, J. A. and Kemp, R. A. Flip-flop thin-film design program with enhanced capabilities / Applied Optics, 1992.
13. Delano, E. Fourier synthesis of multilayer filters / J Opt Soc Am, 1967.
14. Sossi, L. A. Method for the synthesis of multilayer dielectric interference coatings / Eesti NSV Tead Akad Toim Fuus Mat, 1974.

15. Verly, P. G. Optimum phase for rugate filter synthesis by Fourier transforms / *Applied Optics*, 2011.
16. Bovard, B. G. Rugate filter theory: an overview / *Applied Optics*, 1993.
17. Cheng, X., Fan, B., Haruo, T. and Wang, Z. “Optical and structural properties of $\text{Nb}_x\text{Si}_y\text{O}$ composite films prepared by metallic co-sputtering process”, *Proc SPIE / The International Society for Optical Engineering*, 2008.
18. Furman, S. A. and Tikhonravov, A. V. *Optics of Multilayer Systems, Gif-sur-Yvette (France) / Editions frontier*, 1992
19. Larouche, S. and Martinu, L. A new step method for the synthesis of optical filters with arbitrary indices / *49th Annual Technical Conference Proceedings, Soc. Vacuum Coaters*, 2006.
20. Dobrowolski, J. A. and Piotrowski, S. H. C. Refractive index as a variable in the numerical design of optical thin film systems / *Applied Optics*, 1982.