

Лабораторна робота № I

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БАГАТОШАРОВИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ДЗЕРКАЛ

Мета роботи: 1) ознайомитися з конструкцією, принципом дії, оптичними параметрами дзеркал і способами їх вимірювання; 2) експериментально дослідити спектральну залежність коефіцієнта пропускання дзеркал.

1.1. Короткі теоретичні відомості

Одна із найважливіших галузей застосування багатошарових діелектричних дзеркал (БДД) - використання їх як високодобротних оптичних резонаторів лазерів, що обумовлено їх значним коефіцієнтом відбиття, який може досягати значень порядку 99,99%. Коефіцієнт відбиття металевих дзеркал, що представляють собою підкладку із скла з нанесеним на неї шаром Al, Ag, Au, або Cu знаходиться в межах 80 ... 97%. У лазерах з невеликим коефіцієнтом підсилення активного середовища БДД - єдиний тип дзеркал, при використанні яких можлива генерація.

БДД являє собою багатошарову структуру, що складається як правило, із 11-31 шарів, що чергуються з високим (H) і низьким (L) показниками заломлення однакової оптичної товщини $\lambda_0/4$. (де λ_0 -довжина хвилі максимуму відбиття). Найчастіше застосовуються покриття з непарним числом шарів, крайні шари яких, межують з підкладкою і навколишнім середовищем, мають високий показник заломлення. Таке покриття з непарним числом шарів на поверхні прозорої підкладки S_1 (наприклад, скла) позначають таким чином:

$S_1HLHL \dots HLH$

В якості високозаломлюючих речовин у видимій області спектра використовують ZnS, TiO₂, ZrO₂, HfO₂, Ta₂O₅, показник заломлення яких n_H , знаходиться в межах 2,30...1,85. Шари із низьким показником заломлення n_L виконують із Na₃AlF₆ (криоліт), MgF₂, SiO₂, показники заломлення яких відповідно дорівнюють 1,35; 1,39; 1,45. При однаковому числі шарів коефіцієнт відбиття БДД тим вище, чим більше різниця в показниках заломлення шарів. Дзеркала з шарів, виконаних з оксидів, мають істотно більш високу механічну і хімічну стійкість, їх останній шар, що межує з повітрям, виконують з SiO₂ товщиною $\lambda/2$.

Принцип роботи БДД пояснюється тим, що на кожній межі розділу прозорих середовищ з показниками заломлення n_1 і n_2 відбувається віддзеркалення світла. Якщо шари однорідні, непоглинаючі та ізотропні, амплітуда відбитого від такої межі розділу променя :

$$r_{12} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} .$$

Якщо оптична товщина кратна $\lambda/4$, інтерферуючі промені знаходяться у фазі, що викликає посилення інтенсивності відбитого світла. Спектральна крива коефіцієнта відбиття багатошарового покриття досить складна. Значення коефіцієнта відбиття визначається числом шарів, їх оптичною товщиною $n_i h_i$, показниками заломлення і співвідношенням з довжиною світлової хвилі λ_i . Зміна оптичної товщини шарів і їх числа значно впливає на спектральну криву коефіцієнта. Використовуючи ці показники, можна отримувати різноманітні інтерференційні відбивачі, що здійснюють спектральне розділення падаючого світла на відбитий і той, який проходить, в додаткових кольорах.

В залежності від умов експлуатації тонкі інтерференційні покриття на поверхні скла використовують в пучках, що падають під різними кутами до поверхні. Із збільшенням кута падіння світла оптична різниця ходу променів, відбитих від границь розділу шарів, зменшується, що призводить до зниження ефективної оптичної товщини плівок і до зміни спектральних характеристик відбитого світла і того, яке проходить. Пояснимо це на прикладі одиночної плівки.

Умови відбиття і заломлення світла на двох кордонах розділу трьох середовищ з різними показниками заломлення (скла n_3 , плівки n_2 , і повітря $n_1 = 1$) показані на рис. 1.1.

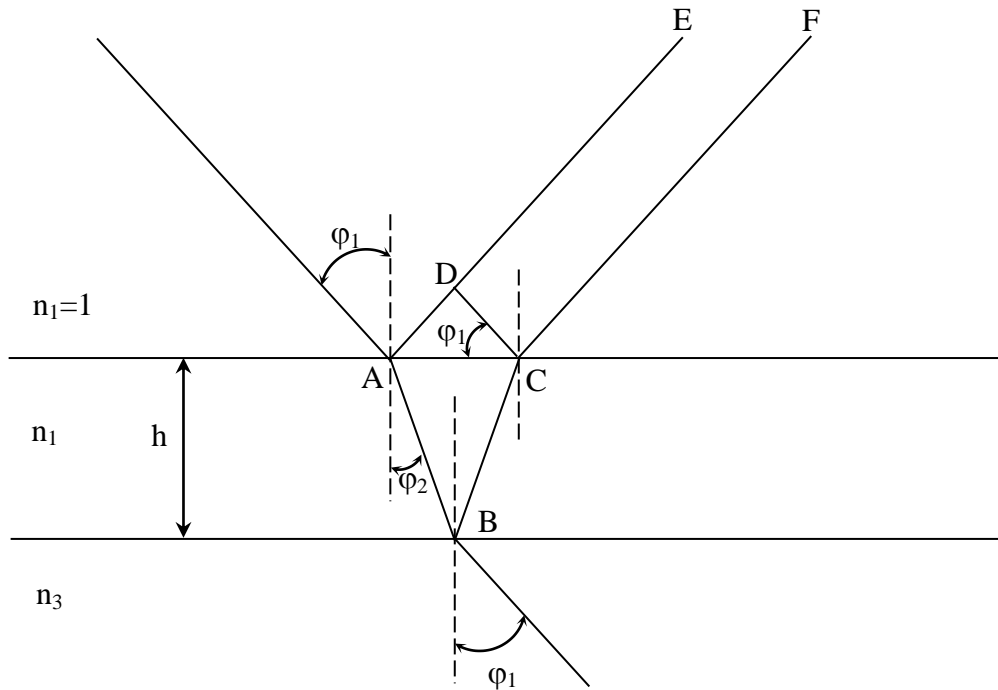


Рис. 1.1

Промінь світла, що падає на поверхню розділу в точці А під кутом φ_1 до нормалі, розділяється на промінь АЕ, відбитий назад в перше середовище (повітря), і промінь АВ, переломлений у друге середовище n_2 . Промінь АВ відбивається в точці В від кордону розділу n_2/n_3 назад у друге середовище n_2 і після заломлення через межу розділу n_2/n_1 виходить у перше середовище (CF)

Оптична різниця ходу променів і площини CD

$$S = n_2(AB + BC) - n_1AD \quad (1.1)$$

Якщо геометрична товщина плівки дорівнює h_1 , а кути падіння і заломлення, утворені променем з нормаллю до поверхні, φ_1 та φ_2 , то

$$AB = \frac{h}{\cos \varphi_2} \quad (1.2)$$

$$AC = 2htg \varphi_2 \quad (1.3)$$

$$AD = AC \sin \varphi_1 \quad (1.4)$$

Якщо врахувати закон заломлення на межі двох середовищ n_1 і n_2 то оптична різниця ходу променів

$$S = n_2AB - n_1AD = \frac{2n_2h}{\cos \varphi_2} - 2n_1h \sin \varphi_1 tg \varphi_2 = \frac{2n_2h}{\cos \varphi_2} - 2n_2h \sin \varphi_2 tg \varphi_2 \quad (1.5)$$

Звідки

$$S = 2n_2 h \cos \varphi_2 \quad (1.6)$$

Величину $n_2 h \cos \varphi_2$, що визначає положення екстремуму і характер спектрального відбиття від поверхні з плівкою при падінні під кутом, часто називають ефективною товщиною плівки. Таким чином, при збільшенні кута падіння оптична товщина плівки буде зменшуватися пропорційно косинусу кута заломлення в плівці. В результаті екстремальне значення (R_{\max} або R_{\min}) і вся спектральна крива змістяться в напрямку короткохвильової частини спектру. Однак наведений розрахунок слід розглядати як наближений, оскільки в ньому не враховуються деформації спектральної кривої, викликані явищами поляризації світла, відбитого під кутом.

Для дзеркал, які повинні працювати під кутами падіння світла $\varphi_1 \neq 0$, покриття необхідно виготовляти, як це впливає з формули (1.6), з оптичною товщиною більшою ніж робоча довжина хвилі. Наприклад, для дзеркала кільцевого He-Ne лазера, що працює під кутом 45° , максимум відбиття повинен знаходитися $\lambda \approx 700$ нм.

Більш прискіпливий аналіз показує, що у дзеркала із оптичними товщинами шарів Н та L однаковими і рівними $\lambda/4$ за нормального падіння світла, при похилому падінні світла товщини шарів не будуть рівними між собою, оскільки кути заломлення в шарах Н та L різні. Ця відмінність, однак, мала і на коефіцієнт заломлення БДД впливає слабо.

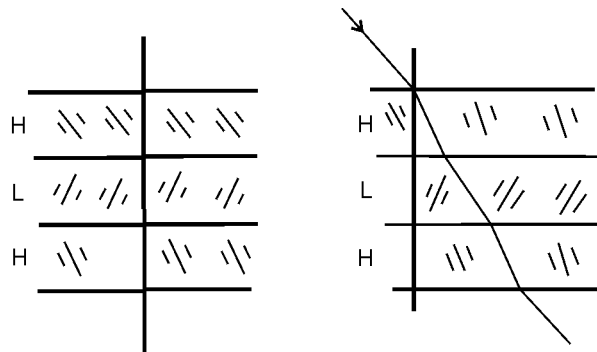


Рис. 1.2

В цілому спектральна крива БДД має такі характерні області: зону високого відбивання шириною декілька сотень нанометрів, де знаходиться основний максимум першого порядку, і зону з побічними максимумами. Для багат шарових покриттів з шарів рівної оптичної товщини характерні однакова висота побічних максимумів по обидві сторони від основного.

1.2. Оптичні параметри БДД і способи їх вимірювання

1.2.1. Енергетичні параметри

У літературі, присвяченій лазерам, дзеркала характеризуються, як правило, одним параметром - коефіцієнтом відбиття на робочій довжині хвилі. Однак, як буде показано далі, для найбільш високо-відбиваючих дзеркал цей коефіцієнт не може бути вимірний із задовільною точністю, а кількість параметрів, які необхідно брати до уваги при створенні найбільш складних приладів, може досягати чотирьох-шести. При цьому тільки для вимірювання спектральної характеристики використовуються прилади, що серійно випускаються, для вимірювання ж таких параметрів, як коефіцієнт відбиття або розсіювання «назад» в даний час існують лише окремі лабораторні установки.

Для пояснення труднощів, що виникають при вимірюванні параметрів БДД, розглянемо баланс енергії падаючого на дзеркало випромінювання (рис. 1.3).

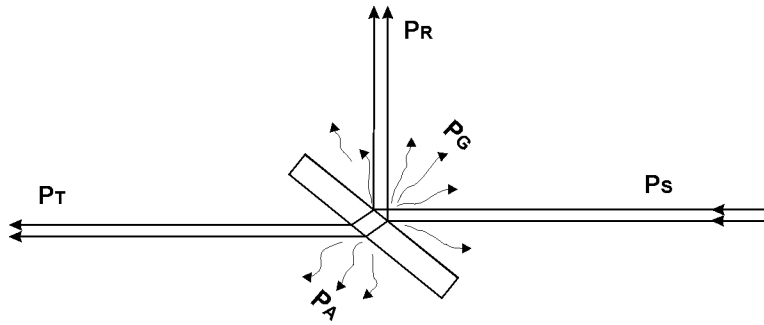


Рис. 1.3

Оскільки потужність падаючого випромінювання P_S , ділиться на відображену P_R , ту що проходить P_T , розсіяну P_G і поглинену P_A компоненти, має місце рівність

$$P_S = P_R + P_T + P_G + P_A \quad (1.7)$$

При цьому поглинання падаючого на дзеркало випромінювання викликає його нагрівання, що використовується в приладах калориметричного типу для безпосереднього вимірювання втрат на поглинання.

Коефіцієнт поглинання, який визначається як

$$A = \frac{P_A}{P_S} \cdot 100\% \quad (1.8)$$

для БДД складає соті частки відсотка і в більшості розрахунків приймається рівним нулю. Однак відхилення від оптимальних режимів в процесі виготовлення можуть призвести до різкого збільшення коефіцієнта поглинання у всій партії виготовлених дзеркал. Тому одне дзеркало з партії перевіряють на «технологічному» лазері. Якщо втрати на поглинання надто незначні, пороговий струм (мінімальний струм, при якому виникає генерація в лазері) не буде перевищувати певного значення, характерного для конкретного приладу. В іншому випадку дзеркало має підвищений коефіцієнт поглинання або пропускання.

Коефіцієнт пропускання, який визначається як

$$T = \frac{P_T}{P_S} \cdot 100\% \quad (1.9)$$

можна виміряти наступним чином (рис. 1.4: 1 - лазер; 2 - нейтральний світлофільтр; 3 - дзеркало; 4 - фотоприймач; 5 - вимірювальний прилад, 6 - пластинка; 7 - поляризатор).

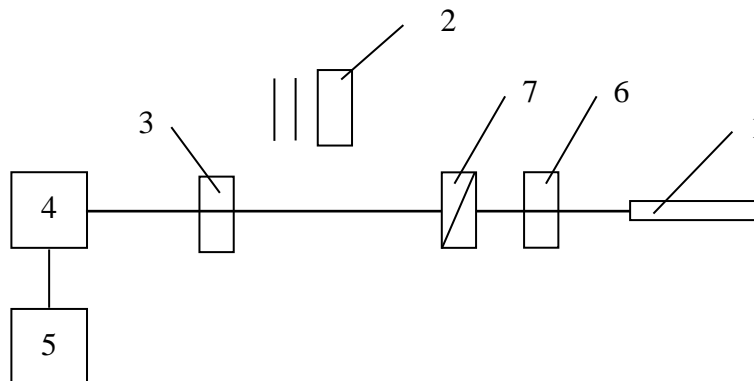


Рис. 1.4

Спочатку на шляху променя встановлюють нейтральний світлофільтр з відомим коефіцієнтом пропускання τ_{nl} . При цьому показання вимірювального приладу

$$a = P_{laz} \tau_{nl} S_{PD} \quad (1.10)$$

де P_{laz} ~ потужність випромінювання лазера; S_{PD} - чутливість фотоприймача.

Потім на шляху променя встановлюють досліджуване дзеркало і прибирають нейтральний світлофільтр. Показання вимірювального приладу

$$b = P_{laz} \tau S_{PD} \quad (1.11)$$

де τ - коефіцієнт пропускання дзеркала. З (1.10) і (1.11) знаходимо

$$\tau = \frac{b \tau_{nl}}{a} \quad (1.12)$$

за умови, що за час вимірювання потужність лазера і чутливість фотоприймача не змінювалися.

Якщо дзеркало призначено для роботи під кутами падіння, відмінними від 0° , необхідно враховувати що його коефіцієнт пропускання залежить від поляризації падаючого випромінювання. Поляризація, при якій, вектор \vec{E} розташований перпендикулярно площині падіння променя (що збігається з площиною малюнка), умовно називають S-поляризацією, а при розташуванні його в площині падіння променя - P-поляризацією (рис. 1.5).

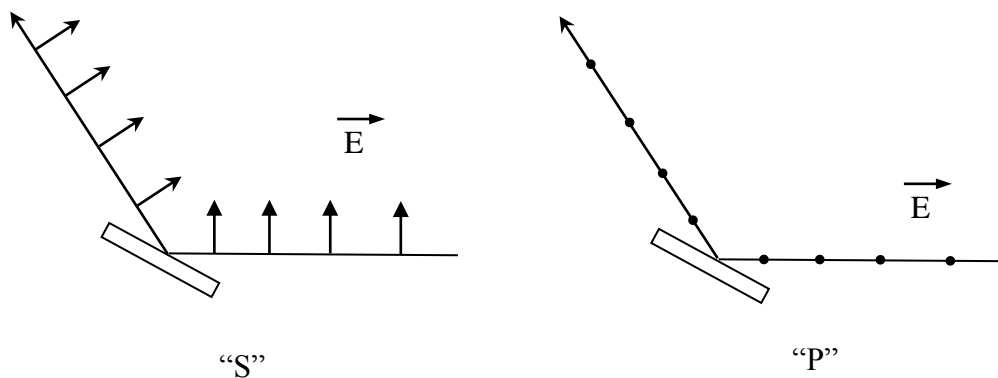


Рис. 1.5

Для встановлення потрібного виду поляризації на шляху променя розміщують поляризатор, орієнтований відповідним чином. Однак, оскільки випромінювання лазера вже є лінійно поляризованим, при деяких положеннях поляризатора буде відбуватися гасіння променя. Щоб уникнути цього між лазером і поляризатором поміщають чвертьхвильову пластинку, яка змінює лінійну поляризацію лазера на кругову (циркулярну).

Згідно з визначенням коефіцієнт відбиття

$$R = \frac{P_R}{P_S} \quad (1.13)$$

Прилад для вимірювання R-рефлексометр, його принцип дії полягає у вимірюванні потужності відбитого P_R і падаючого P_S променів (рис. 1.6. 1 - лазер; 2 - дзеркало; 3 - фотоприймач; 4 - вимірювальний прилад). Потім за формулою (1.13) обчислюється R.

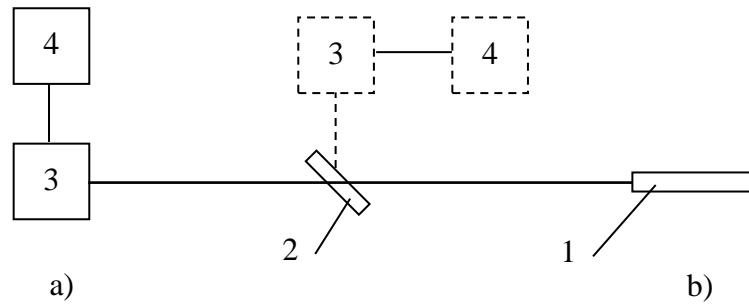


Рис. 1.6

Оцінимо необхідну для практичних цілей точність вимірів. Для створення, наприклад, високодобротного резонатора лазера, потрібні дзеркала з коефіцієнтом відбиття 99,90 ... 99,95%. Для вимірювання приросту $\Delta R = 0,05\%$ з відносною похибкою 20% абсолютна похибка повинна відповідати $0,05\% \cdot 0,2 = 0,01\%$.

При виконанні вимірювань за описаною методикою має місце два основних джерела похибок: нестабільність потужності лазера за час переведу фотоприймача з позиції *b* в позицію *a*, і зсув світлової плями на фотоприймачі в поєднанні з нерівномірністю чутливості його по фоточутливій області. Вплив першого дестабілізуючого чинника може бути знижений застосуванням стабілізованого по потужності лазера, другого - використанням фотоприймача з інтегруючої сферою.

Тим не менш, досягнення похибки 0,01% при оптичних вимірюваннях являє собою важке завдання навіть для окремих унікальних приладів. Цим і пояснюється той факт, що для БДД вимірювання можливі, але точність їх буде незадовільною, хоча для значень $R \approx 80 \dots 97\%$ такі прилади широко застосовуються.

Коефіцієнт розсіювання

$$G = \frac{P_c}{P_s} \quad (1.14)$$

вимірюють наступним чином. БДД поміщають в інтегруючу сферу під тим кутом, під яким повинно працювати дзеркало. Для виведення відбитого і того, що пройшов променів в ній є невеликі отвори. Потужність P_c вимірюється фотоприймачем, область детекції якого повернена всередину сфери (рис. 1.7).

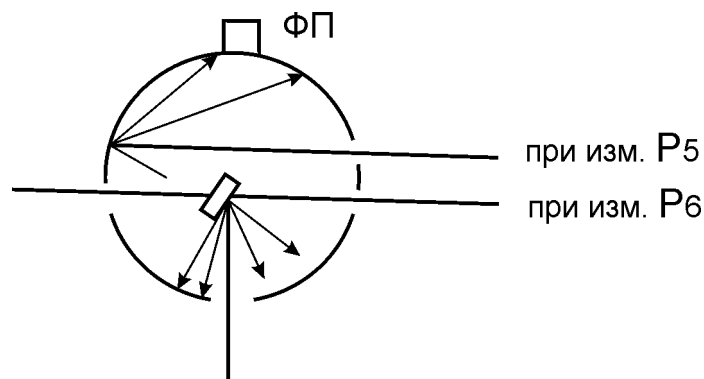


Рис. 1.7

Потім промінь спрямовують через сусідній отвір, при цьому вимірюється P_s .

Конструкція реального приладу, що працює за розглянутим принципом, досить складна, оскільки комутація променя досягається за рахунок застосування спеціального оптомеханічного модулятора. Результати вимірювання обробляються автоматично.

На практиці застосовується більш проста схема, що має один принциповий недолік, розглянутий далі (рис.1.8: 1 - нейтральний світлофільтр; 2 - інтегруюча сфера; 3 - еталон дифузного відбиття; 4 - фотоприймач; 5 - тримач з досліджуваним дзеркалом; 6 - вимірювальний прилад).

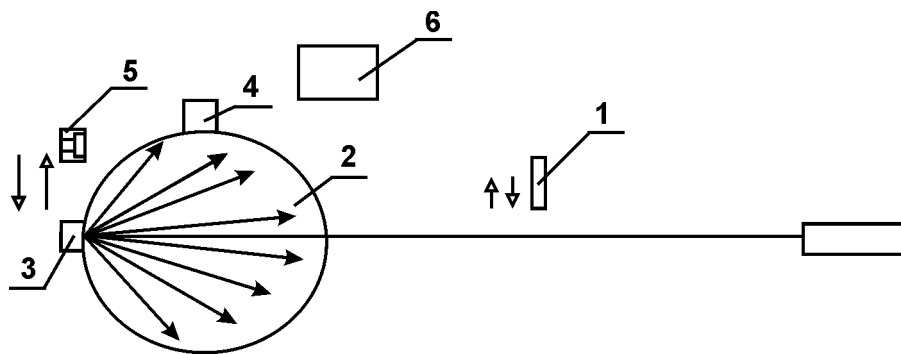


Рис. 1.8

Виміри проводяться наступним чином. На шляху променя встановлюють нейтральний світлофільтр, а в сферу - еталон дифузного відбиття. При цьому показання вимірювального приладу

$$a = P_{laz} \tau_{np} R_{et} S_{PD} \quad (1.15)$$

де R_{et} - коефіцієнт дифузного відбиття еталона, $R_{et} \approx 0,90...0,95$. Після цього замість еталона 3 встановлюють досліджуване дзеркало 5 і прибирають фільтр 1. Показання вимірювального приладу

$$b = P_{laz} G S_{PD} \quad (1.16)$$

з (1.15) та (1.16) знаходимо

$$G = \frac{b \tau_{np} R_{et}}{a}$$

Недолік даної схеми полягає в тому, що БДД, розраховане на ненульовий кут падіння світла, доводиться вимірювати при куті падіння променя 0^0 . При цьому БДД може пропускати значно більше світла, ніж якщо б воно було встановлено під робочим кутом, і за наявності за дзеркалом будь-яких додаткових поверхонь показання будуть завищені.

Призначення фільтра 1 полягає в тому, щоб зробити параметри a і b величинами одного порядку. Якщо в якості фотоприймача 4 використовувати кремнієвий фотодіод, який характеризується лінійною залежністю вихідного струму від освітленості в широкому динамічному діапазоні, фільтр 1 можна виключити. Для кращих БДД з $\sigma \approx 0,02\%$ $a:b = 5000:1$. У всіх розглянутих схемах доводиться мати справу зі слабкими електричними сигналами, тому в якості вимірювального приладу використовують селективні вимірювальні підсилювачі, а світловий пучок модулюють з частотою близько 0,2 ... 2,0 кГц.

Описана методика забезпечує вимірювання інтегрального коефіцієнта розсіювання. Для деяких застосувань БДД істотну роль відіграє відносна величина розсіяного випромінювання в напрямі до джерела випромінювання, котру називають розсіюванням «назад». Ця величина є складовою частиною інтегрального коефіцієнта розсіювання і може бути в принципі виміряна за схемою рис. 1.9, де 1 - лазер; 2 — розділювач світла; 3 - досліджуване дзеркало; 4 - фотоприймач; 5 - вимірювальний прилад; 6 — пастка для світла.

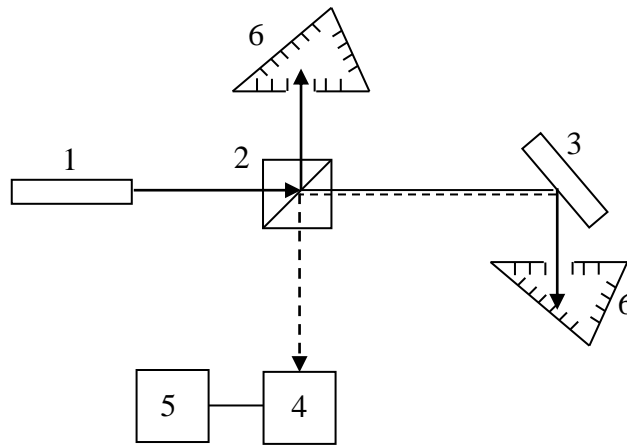


Рис. 1.9

Через те, що вимірювана величина занадто мала, різні паразитні засвічення вносять значні похибки в подібні вимірювання. Через неможливість забезпечити повне поглинання світла пастки 6 змушують періодично коливатися, оскільки основний сигнал вимірюється у вузькій смузі частот, вплив засвічень послаблюється.

1.2.2. Поляризаційні властивості БДД

При падінні на дзеркало лінійного поляризованого світла (якщо світло падає не по нормалі) в загальному випадку вид поляризації не зберігається (рис. 1.10). Відбите випромінювання може набути еліптичну поляризацію (поляризація, однак залишиться лінійною, якщо на даній довжині хвилі і при даному куті падіння оптичні товщини всіх шарів дорівнюють $\lambda/4$).

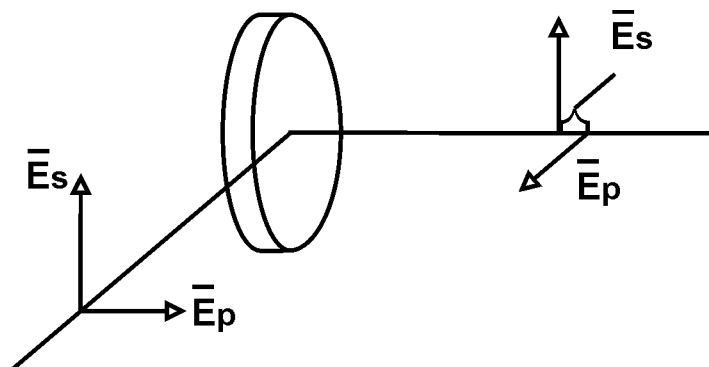


Рис. 1.10

Характеристика, що визначає поляризаційні властивості БДД, називається фазовою анізотропією. Як видно з рис. 1.10, фазова анізотропія σ являє собою фазовий зсув між миттєвими положеннями ортогональних компонент вектора напруженості електричного поля \vec{E} . Параметри поляризованого світла, а отже, і властивості відбиваючих поверхонь вимірюють за допомогою оптичного приладу - еліпсометра.

1.2.3. Вимірювання спектральних характеристик БДД

Більшість сучасних спектрофотометрів забезпечують автоматичне вимірювання спектральної залежності коефіцієнта пропускання досліджуваних зразків. Для проведення вимірювань необхідно встановити бажану швидкість розгортки спектру, швидкість руху паперового бланка та діапазони довжин хвиль. При проведенні вимірювань на однопроменевих приладах (в тому числі УМ-2) спектральна характеристика будується по точках.

1.3. Обладнання та вимірювальні прилади

1. Монохроматор УМ-2.
2. Освітлювач з лампою розжарювання.
3. Конденсатор.
4. Підставка для досліджуваних деталей.
5. Кремнієвий фотодіод.
6. Мікроамперметр М95 із шунтом.
7. Джерело живлення лампи.
8. Діелектричне дзеркало.

1.4. Опис установки

Дана установка призначена для дослідження спектральної залежності коефіцієнта пропускання оптичних деталей, зокрема діелектричних дзеркал. Установка (рис. 1.11; 1 - монохроматор; 2 - освітлювач; 3 - конденсатор; 4 - підставка для деталей; 5 - фотодіод; 6 - мікроамперметр; 7 - джерело живлення лампи; 8 - діелектричне дзеркало) працює таким чином: джерело світла 2 проектується конденсатором на вхідну щілину монохроматора 1. Монохроматор виділяє вузькі спектральні лінії, довжина хвилі яких встановлюється за допомогою вимірювального барабана. Його градування зв'язане нелінійною залежністю з довжиною хвилі, що виділяється, тому для її установки слід використовувати табл. 1.1. Ширина спектрального інтервалу, що виділяється, залежить від ширини щілин монохроматора (чим вужча щілина, тим менше ширина спектру лінії і нижче її інтенсивність). У даній роботі вимірювання рекомендується проводити при ширині вхідної щілини 3 мм і вихідної - 4 мм (ціна поділки барабанчика щілини 0,01 мм, межі розкриття - 4 мм). Світло з вихідної щілини потрапляє на фотодіод 5, струм фотодіода вимірюється мікроамперметром 6. Якщо показання його дорівнюють b , а після установки досліджуваної деталі - c , то відносний коефіцієнт пропускання на даній довжині хвилі

$$\tau(\lambda) = \frac{c}{b} \cdot 100\% \quad (1.17)$$

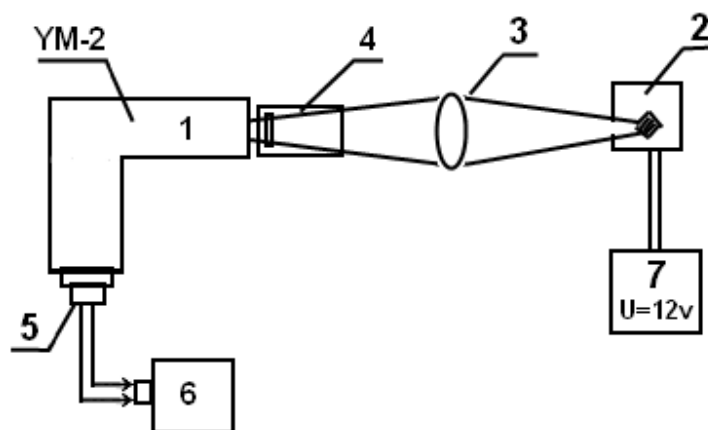


Рис. 1.11

Таблиця І.І

Довжина хвилі, нм	Відлік по вимірювальному барабану, поділок
540	2230

550	2300
560	2360
570	2420
580	2470
590	2510
600	2555
610	2600
620	2635
630	2675
640	2720
650	2750
660	2790
670	2820
680	2855
690	2885
700	2920
710	2950
720	2975
730	3005
740	3030
750	3060
760	3085
770	3110
780	3135
790	3160
800	3180

Побудувавши на основі вимірних значень $\tau(\lambda)$ графік, отримаємо шукану спектральну залежність коефіцієнта пропускання. По осі ординат прийнято відкладати $R=1-\tau$, для чого точку $\tau=100\%$ розташовують на початку координат.

1.5. Порядок виконання роботи

Варіант 1. Зняти спектральну залежність коефіцієнта пропускання двох діелектричних дзеркал при куті падіння світла 0° ,

Варіант 2. Зняти спектральну залежність коефіцієнта пропускання діелектричного дзеркала при кутах падіння світла 0° та 45° .

1.6. Методика проведення вимірів

1.6.1. Увімкнути джерело живлення лампи. Якщо використовується джерело живлення ЛИПС-35, то встановити напругу 11 В, плавно збільшуючи її від нуля. Перевести перемикач на мікроамперметрі з положення «Арретир» в положення «Нар.шунт.». Чутливість мікроамперметра регулювати за допомогою шунта.

1.6.2. Установити на вимірювальному барабані монохроматора відлік, відповідний мінімальній довжині хвилі за табл. 1.1.

1.6.3. При встановленому дзеркалі записати покази амперметра; вийнявши дзеркало, записати нові покази.

1.6.4. Повторити п.1.6.3 для варіанту 1 з другим дзеркалом. Для варіанту 2 те ж дзеркало встановити на підставку « 45° ».

1.6.5. Виконати вимірювання в діапазоні 540 ... 800 нм через кожні 10 нм.

1.6.6. Обробити результати вимірювань, побудувати спектральні залежності коефіцієнта відбиття на одному графіку.

1.7. Вміст звіту

1. Мета роботи
2. Схема стенду і характеристики вимірювальних приладів і пристроїв.
3. Таблиці експериментальних і розрахункових даних.
4. Графіки виміряних характеристик.
5. Висновки про виконану роботу.

Контрольні питання

1. Як побудоване БДД?
2. Які матеріали застосовуються для виготовлення БДД і як від них залежить коефіцієнт відбиття?
3. Який принцип роботи БДД?
4. Як залежить оптична товщина діелектричних плівок від кута падіння світла?
5. В яку область спектру (довгохвильову або короткохвильову) зміщується спектральна характеристика БДД при збільшенні кута падіння світла?
6. Які характерні області має спектральна крива БДД?
7. Назвіть оптичні параметри БДД
8. Як розподіляється в просторі потужність падаючого на дзеркало випромінювання і яке співвідношення між результуючими компонентами?
9. Що таке коефіцієнт поглинання, яке його типове значення?
10. Що таке коефіцієнт пропускання, як його вимірюють?
11. Призначення поляризатора і пластинки $\lambda/4$ в приладі для вимірювання пропускання.
12. Що таке коефіцієнт відбиття, як його вимірюють?
13. Що таке коефіцієнт розсіювання, як його вимірюють?
14. Переваги та недоліки різних оптичних схем для вимірювання розсіювання.
15. Що таке розсіювання «назад» у БДД і як його можна виміряти?
16. Чи змінює БДД вид поляризації падаючого на нього випромінювання?
17. З яких міркувань вибирається ширина вихідної щілини монохроматора?
18. Яка геометрична товщина шарів L і H у діелектричного дзеркала, якщо максимум відбиття припадає на $\lambda = 700$ нм, а шари виготовлені з SiO_2 з $n = 2,0$?
19. Чому діелектричне дзеркало незначно ускладнює спостереження різних предметів, навіть якщо його коефіцієнт пропускання становить десяті й соті частки відсотка?
20. Основні джерела похибок при вимірюванні коефіцієнта відбиття. Як його можна зменшити?