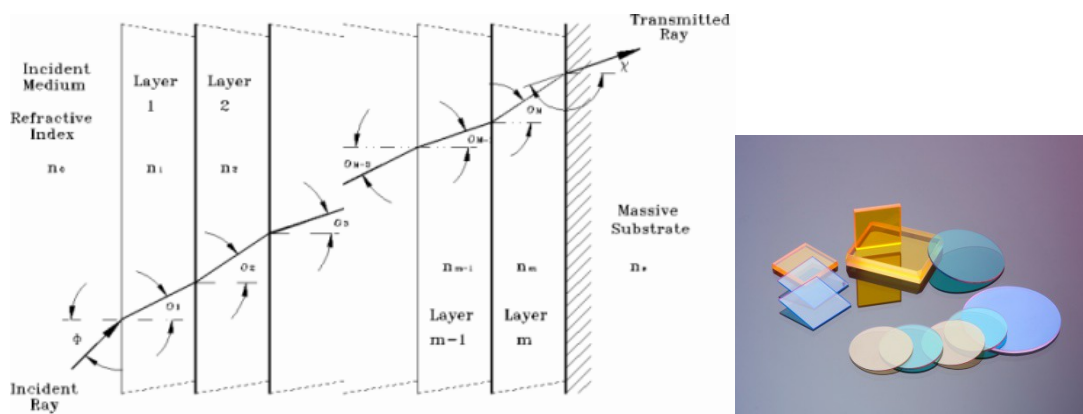


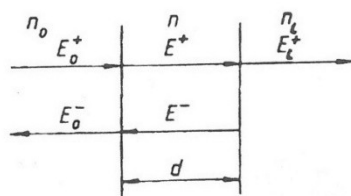
Семинарно упражнение 2: „Оптични покрития. Проектиране на тънкослойни оптични филтри“

Тънкослойните оптични филтри представляват система от покрития с определен коефициент на пречупване за една или повече светлинни компоненти, при което се получава оптична характеристика на пропускане или отражение за дадена дължина на вълната или цял спектър електромагнитни вълни.



Фиг. 1. Многослойни оптични филтри – принцип на взаимодействие със светлината и външен изглед.

Нека си представим, че върху границата между две полубезкрайни среди се намира слой от непогълщащ материал (диелектрик) с показател на пречупване n и геометрична дебелина d . Показателите на пречупване на двете полубезкрайни среди, които се наричат обръщащи среди са: n_0 и n_1 (фиг.2).



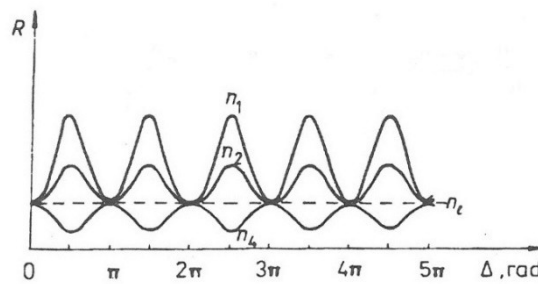
Фиг.2 Означение на основните величини, участващи при проектирането на тънкослойни оптични филтри.

Характеристичната матрица за тази система зависи от $\Delta = \sigma nd$ - фазовата дебелина на слоя, а $\sigma =$ е вълновото число на електромагнитното (ЕМ) лъчение за вакуум. Коефициентът на отражение при четни слоеве m е:

$$R = 1 - \dots, \quad R = 1 - \dots$$

При нечетни слоеве m за коефициента на отражение получаваме:

От сравнението на уравненията се вижда, че при $n > n_1$ или при $n < n_0$ в тези точки се наблюдават максимуми, а при $n_0 < n < n_1$ - минимума, т.е. качествено спектралните характеристики на такава система изглеждат като на фиг.3.



Фиг. 3 Спектрални характеристики на отражение за система от четен и от нечетен брой слоеве.

Първият екстремум (максимумът при $n > n_1$ или минимумът $n < n_1$) се наблюдава при дължина на вълната λ_0 , която се определя от условието:

, откъдето

Тази дължина на вълната, равна на четири оптични дебелини на слоя, се нарича характеристична дължина на вълната, а самият слой – четвъртвълнов, тъй като неговата оптична дебелина е равна на четвърт от характеристичната дължина на вълната. В случаите на по – сложни тънкослойни системи също се определя някаква характеристична дължина на вълната, а дебелините на слоевете се изразяват в мащаб, съответстващ на една четвърт от нея.

Оптичните детайли, върху които се нанасят покритията, се наричат подложки или субстрати (от английската дума substrate, означаваща подложка). Оттук следва и означението за подложка с латинската буква S. Обикновено втората обгръщаща среда е

въздух и се означава с буквата А (air – въздух), или изобщо не се посочва. Ако втората среда е някакъв материал (слепени оптични елементи или съединени чрез оптичен контакт), тя се означава със S' (или S, ако е идентична на първата). За означаване на слоеве с четвъртвълнова оптична дебелина се използват буквите Н и L (от английските думи high – висок, и low – нисък), които съответстват на слоеве с голям и малък коефициент на пречупване. Ако за изработката на покритието се използват повече от два материала, в означенията за слоевете се въвеждат горни индекси: L,L',L'',.....H,H',H''.

Когато оптичната дебелина на слоя е различна от четвъртвълновата, пред означението на слоя се въвежда съответен множител. Например системата, състояща се от подложка с нанесени върху нея три слоя от материали с голям, малък и втори голям показатели на пречупване и оптични дебелини, равни на една, две и една и половина от четвърт от характеристичната дължина на вълната, се записва като: SH2L1,5H'A или S/H/2L/1,5H'/A. Това означение винаги се съпровожда от спецификатор, в който са посочени оптичните константи за всички материали и характеристичната дължина на вълната. Например:

S: стъкло К-8, $n=1,52$;
H: титанов диоксид (TiO_2) $n= 2,25$;
L: силициев диоксид (SiO_2) $n=1,45$;
H': танталов диоксид (TaO_2) $n=2,05$;

В оптичните системи намират приложение най – различни оптични елементи, работещи в режим на пропускане. Съвременните им конструкции съдържат до 10 и повече оптични елементи, което означава до 20 и повече гранични повърхнини между различни оптични среди, едната от които най – често е въздух. Оптичните материали, от които се изработват тези елементи, притежават показатели на пречупване, променящи се в диапазона от 1.38 до 2.6, а за инфрачервената спектрална област и до 4. Това означава, че дори и при нормално падане на светлинния поток (светлинните лъчи са перпендикулярни спрямо повърхността) всяко негово преминаване през границата ще се съпровожда със загуба на енергията му с 3,8% до 17% (а за инфрачервената област и до 36%). При падане на светлинния сноп под ъгъл спрямо нормалата към повърхността загубите нарастват още повече и стават различни за двете поляризации. Тъй като тези загуби са предизвикани от

отражението на светлинния поток от всяка граница, те водят до силно нарастване на т.нар. разсеяна светлина за сметка на вторични отражения.

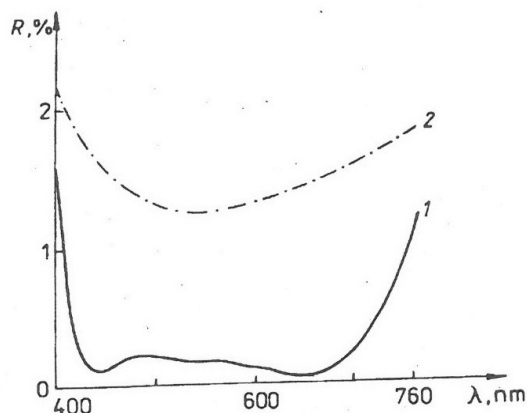
Нека разгледаме един слой с геометрична дебелина d и показател на пречупване n и обгърната от две полубезкрайни среди с показатели на пречупване n_0 и n_1 . Изразът за коефициента на отражение: $R_{o1} = \frac{n_1 - n}{n_1 + n}$, показва че при $n = \sqrt{n_0 n_1}$ и $n_0 < n < n_1$ се наблюдават минимума на R_{o1} . От израза:

$R_{o1} = 1 - T_{o1}$ следва, че при $n = (n_0 n_1)^{1/2}$ се реализира условие за пълно потискане на отражението ($R_{o1} = 0$), т.е. имаме просветляване на дължините на вълната $\lambda_0, \lambda_0/3, \lambda_0/5, \dots$, където λ_0 е характеричната дължина на вълната за просветляващото покритие.

Докато положението на минимума лесно се променя чрез изменение на оптичната дебелина на слоя, достигането дори и теоретично на долната граница на $R_{o1} = 0$ (нулево отражение на светлината и достигане на 100%-вото ѝ пропускане) не винаги е възможно. Например, за да изпълним това условие за оптичен елемент, изработен от кварцово стъкло, би трябвало да използваме материал с $n=1,21$. За оптичен елемент, изработен от най – разпространеното стъкло ВК – 7 е необходимо нанасяне на просветляващо покритие от материал с $n=1,23$. Близки показатели на пречупване към получените притежават такива материали, като BaF_2 (бариев флуорид) и $K_5Al_3F_{14}$ (чиолит). Тези материали обаче притежават ниска химична и механична устойчивост, което прави невъзможно тяхното използване извън херметизирана апаратура. Всичко това показва, че еднослойното просветляващо покритие е недостатъчно ефективно.

При нанасянето на покрития, съдържащи повече слоеве (N), на разположение на конструктора са $2N$ броя параметри (N показатели на пречупване и N дебелини). Променяйки ги, може да се получи спектрална крива с желаните характеристики. Срещат се задачи, изискващи просветляването да е ефективно в широк спектрален диапазон, например при създаването на висококачествена кино и видеоапаратура. Също така често пъти се изисква коефициентът на отражение да не проявява силна зависимост от ъгъла на падане. Тези задачи се решават чрез изготвяне на многослойни просветляващи покрития, съдържащи понякога 11 и повече слоя. Конструирването на тези покрития чрез анализ на съответните аналитични изрази за коефициента на отражение става практически невъзможно още за четири слоя и единствения възможен начин за решаването на подобни задачи става нелинейното програмиране. Характеричната дължина на вълната се

изчислява по формулата: $\lambda_0 = (0,515 + 0,273n_s)\lambda_m$, където m е централната дължина на вълната за зоната на просветляване, n_s е показателят на пречупване на подложката (субстрата) и може да приема стойности от 1,46 до 1,85. Покритието, изработено в съответствие с тази конструкция, дава добри резултати дори при ъгъл на падане на светлинния сноп, достигащ 30° . Характерната спектрална зависимост на коефициента на отражение за такова покритие върху субстрат от стъкло ВК – 7 е приведена на фиг.4 (крива 1), като за сравнение е приведена на подобна зависимост и за еднослойно покритие от магнезиев флуорид (крива 2) ($\lambda_m = 550 \text{ nm}$).



Фиг. 4 Спектрална характеристика на просветляващо (антирефлекторно или още противоотражателно) покритие

При използването на огледала за мощни лазери, например, отделената в покритието мощност достига 100W и повече при изходна мощност на лазера $P \geq 2 \text{ kW}$. Отчитайки, че цялата тази топлина се отделя в слой с дебелина от порядъка на λ и че разпределението на енергията в лъча е неравномерно, следва да се очаква, че в оптичните елементи ще възникнат големи температурни градиенти, които ще предизвикват деформация и драстична деградация на оптичните им параметри.

Съществуват и други приложни задачи, които изискват използването на огледала с по – специални характеристики, например „ студени“ огледала, които отразяват оптичното лъчение във видимата спектрална област и пропускат в инфрачервената.

В случаите когато огледалата са предназначени за работа в ултравиолетовата (УВ, UV) или в инфрачервената (ИЧ, IR) спектрална област, възникват големи трудности при реализацията на изцяло диелектрични максимално отразяващи покрития. Такива огледала са от ключово значение да бъдат поставяни на входната за светлината повърхност на слънчевите клетки. Така те ще пропускат селективно само видимата светлина, която предизвиква фото-е.д.н. и ще отразява УВ и ИЧ областите от спектъра. УВ лъчите предизвикват бързо стареене на материалите, което води до деградация на електрическите им параметри. ИЧ компонентата води до загряване на клетката, промяна на подвижността на токоносителите и съпротивлението на полупроводниците, участващи в конструкцията на клетката и коефициентът на полезно действие намалява.

За UV областта трудности се получават заради отсъствието на материали с достатъчно голяма разлика в показателите на пречупване, което води до необходимостта да бъдат нанасяни покрития съдържащи голям брой слоеве, т.е. с относително голяма сумарна дебелина. Това предизвиква силно светоразсейване в покритието и понижава механичната му устойчивост. Същите недостатъци са присъщи и на покрития за IR-област, тъй като в този случай нанасяните слоеве са с много по-голяма геометрична дебелина (1-2 μm), защото от този порядък са дължините на вълните в тази област. Следва също така да се подчертае, че практически всички материали за UV – и IR- диапазон не притежават достатъчно добри механоклиматични и химични свойства. Всичко това съществено затруднява производството на оптични елементи с многослойна диелектрична структура, която да притежава добри експлоатационни качества. Тези трудности могат да бъдат преодолени при използване на т.нар. метал – диелектрични огледала, изработени или върху метална подложка, или върху диелектрична подложка с метален високоотразяващ слой.

Проектирането на оптични елементи, като тези дадени в описанието се извършва със специализирани софтуерни продукти. Някои от тях са COMSOL Multiphysics (Optics), Thin Film Center, TFCalc и др.

Използвана литература:

www.photonicsonline.com

C.H. Ho et al. / *Thin Solid Films* 475 (2005) 183–188

Sadhana, *Thin Solid Films*, Vol. 34, Part 4, August 2009, pp. 543–556

TFCalc Manual, version 3.5.15