

13 darbas

INTERFERENCINIO FILTRO TYRIMAS

Užduotys

1. Sugraduoti spektrometrą pagal bangos ilgius.
2. Užregistruoti šviesos filtro praleidimo spektrus esant skirtingiems spindulių kritimo kampams.
3. Apskaičiuoti filtro parametrus:
 - didžiausio praleidimo faktorių,
 - didžiausią praleidimą atitinkantį bangos ilgį,
 - praleidimo juostos pusplotį ir kontrastą,
 - įvertinti atspindžio faktorių,
 - interferencinės juostelės ryškį.

Teorija

Įvairiems eksperimentams dažnai reikia išskirti siaurą spektro ruožą. Tam naudojami šviesos filtrai – įtaisai, praleidžiantys tik tam tikro bangos ilgio arba tam tikro spektro ruožo šviesos bangas. Įprastiniais spalvotais stiklais arba nuspalvintomis želatinos plėvelėmis (sugerties šviesos filtrais) galima išskirti apie 50 nm ruožą. Siauresnį ruoželį (apie 2,5 nm) galima išskirti interferenciniais šviesos filtrais. Interferencinių šviesos filtrų veikimas grindžiamas šviesos interferencijos reiškiniu plokštelėse arba plonose plėvelėse.

Juostiniai šviesos filtrai apibūdinami didžiausio *praleidimo faktoriumi* $T_{\max} = I_{\max}/I_0$ (čia I_{\max} – didžiausias pro filtrą perėjusios šviesos intensyvumas, I_0 – į filtrą krintančios šviesos intensyvumas); *bangos ilgiu* λ_{\max} , atitinkančiu T_{\max} ; *puspločiu* $\delta\lambda$ – spektro ruožu, kurio ribos atitinka $T_{\lambda} = 0,5 T_{\max}$, ir *kontrastingumu* $\gamma = T_{\max}/T_f$ (čia T_f – fonas).

Norint gauti siaurą praleidimo juostą reikia didinti eigos skirtumą tarp gretimų interferuojančių pluoštelių arba didinti interferuojančių pluoštelių skaičių. Pirmuoju atveju interferuoja du poliarizuotieji pluošteliai, perėję dvejopai laužančią kristalo plokštelę, tai – *poliarizacinis-interferencinis šviesos filtras*. Antruoju atveju vyksta daugiaspindulinė interferencija dėl daugkartinio atspindžio tarp tarpusavyje lygiagrečių iš dalies skaidrių veidrodžių.

Paprasčiausias interferencinis šviesos filtras yra sudarytas iš dviejų iš dalies skaidrių veidrodžių 1 (13.1 pav.), tarp kurių yra plonas dielektriko sluoksnis 2. Filtrą pereinanti spinduliuotė daug kartų atsispindi nuo veidrodžių ir kiekvieno atspindžio

metu dalis jos patenka į išorę. Sistemos išorėje susidaro begalinė mažėjančios amplitudės spindulių pluoštelių seka. Eigų skirtumas tarp gretimų pluoštelių pastovus ir jie efektyviai interferuoja.

Atstumas tarp veidrodžių turi tenkinti interferencijos maksimumų susidarymo sąlygą bangai, kurią geriausiai praleidžia filtras. Reikia naudoti atspindinčius sluoksnius su maža

sugertimi. Foną tarp maksimumų bei praleidimo juostos pusplotį galima sumažinti naudojant didelės atspindžio gebos veidrodžius, nes tada susikuria daug interferuojančių pluoštelių. Šios sąlygos tenkinamos naudojant daugiasluoksnius pusiau skaidrius dielektrinius veidrodžius. Tokio tipo filtrų praleidimo spektrinis ruožas daug mažesnis, o maksimalus praleidimas didesnis už filtrų su pusiau skaidriais sidabruotais veidrodžiais.

Reikia pabrėžti, kad interferencinių filtrų parametrai priklauso nuo šviesos srauto krypties. Paprastai pateiktieji filtrų parametrai atitinka lygiagrečių spindulių pluoštelių statmeną kritimą. Pasukant filtrą galima keisti praleidimo juostos vietą spektre (tam tikrame bangos ilgių ruože). Juostos poslinkį galima apskaičiuoti, jei yra žinomi tarp atspindinčių paviršių esančių sluoksnių lūžio rodikliai n_1 ir n_2 . Vartojama efektinio lūžio rodiklio išraiška:

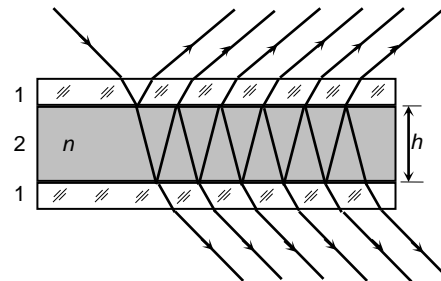
$$n^* = \frac{n_2}{\sqrt{1 - \frac{n_2}{n_1} + \frac{n_2^2}{n_1^2}}}$$

Filtrams su mažo rodiklio tarpikliu (pvz., iš kriolito) n^* vertė yra apie 1,45; jei tarpiklio lūžio rodiklis yra didelis (pvz., iš cinko sulfido), tai n^* yra apie 2,1.

Jei šviesa į filtrą krinta mažesniu negu 30° kampu β , tai labiausiai praleidžiamos šviesos bangos ilgis

$$\lambda_\beta = \frac{\lambda_0 \sqrt{n^{*2} - \sin^2 \beta}}{n^*};$$

čia λ_0 – geriausiai praleidžiamos šviesos bangos ilgis, kai spinduliai krinta statmenai. Iš šios išraiškos išplaukia, kad didelio n^* filtrai, lyginant su mažų n^* verčių filtrais, mažiau pastumia praleidimo juostą.



13.1 pav. Spindulių eiga interferenciniame šviesos filtre

Tarkime, kad į dviejų terpių sandūrą krinta tokio pavidalo banga:

$$s_0 = a_0 \exp i(\omega \tau - kx) = a_0 \exp i\psi.$$

Kiekvieno perėjimo metu bangos amplitudė sumažėja t kartų, po kiekvieno atspindžio – r kartų. Iš plokštelės išėjusių bangų amplitudės yra $a_0 t^2$, $a_0 t^2 r^2$, $a_0 t^2 r^4$ ir t. t. Manoma, kad abu paviršiai atspindi vienodai. Plokštelę perėjusi banga yra atskirų bangų, susidariusių dėl daugkartinio atspindžio, suma. Jos pavidalas:

$$s = t^2 a_0 \exp i\psi + t^2 r^2 a_0 \exp i(\psi - \varphi) + t^2 r^4 a_0 \exp i(\psi - 2\varphi) + \dots;$$

čia φ – fazių skirtumas tarp dviejų gretimų interferuojančių pluoštelių.

$$\varphi = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} 2nh \cos\beta;$$

čia Δ – eigos skirtumas, n – sluoksnio lūžio rodiklis, h – sluoksnio storis, β – spindulių lūžio kampas.

Suminės bangos amplitudė

$$A = a_0 \left\{ t^2 + t^2 r^2 \exp(-i\varphi) + t^2 r^4 \exp(-2i\varphi) + \dots + t^2 r^{2(N-1)} \exp[-(N-1)i\varphi] \right\} = a_0 t^2 \frac{1 - r^{2N} \exp(-Ni\varphi)}{1 - r^2 \exp(-i\varphi)};$$

čia N – interferuojančių pluoštelių skaičius.

Kadangi $r < 1$, kai N didelis, $r^{2N} \rightarrow 0$, tai

$$A = \frac{a_0 t^2}{1 - r^2 \exp(-i\varphi)}.$$

Kompleksiškai jungtinė amplitudė

$$A^* = \frac{a_0 t^2}{1 - r^2 \exp(i\varphi)}.$$

Sandauga AA^* yra perėjusios plokštelę atstojamosios bangos amplitudės kvadratas ir nusako šios bangos intensyvumą I_2 .

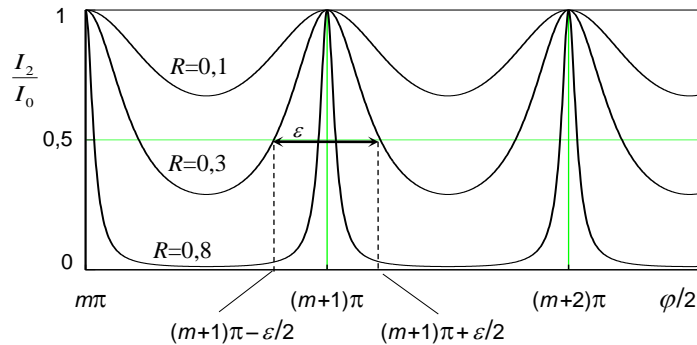
Pasitelkus energinius atspindžio R ir praleidimo T faktorius gaunama išraiška:

$$I_2 \sim AA^* = \frac{a_0^2 T^2}{1 - R^2 - 2R \cos\varphi} = \frac{a_0^2 T^2}{(1 - R)^2 + 4R \sin^2 \frac{\varphi}{2}}.$$

Ši išraiška (Erio (*Airy*) formulė) nusako plokštelę perėjusios šviesos intensyvumo pokytį:

$$\frac{I_2}{I_0} = \frac{a_2^2}{a_0^2} = \frac{T^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2 \frac{\varphi}{2}}. \quad (13.1)$$

Šis dalmuo didžiausias, kai $\sin(\varphi/2) = 0$. Interferencijos maksimumas susidaro tada, kai fazių skirtumas φ tarp gretimų interferuojančių pluoštelių lygus $2\pi m$. Vertės $\varphi/2 = \pi m$ nusako maksimalias dalmens I_2 / I_0 vertes. Minimalios vertės yra tada, kai $\sin(\varphi/2) = 1$, interferencijos minimumas – kai $\varphi = \pi(2m + 1)$. (13.1) išraiškos grafikai įvairiems atspindžio faktoriams R pavaizduoti 13.2 pav.



13.2 pav. Perėjusios šviesos intensyvumo priklausomybė nuo fazių skirtumo tarp interferuojančiųjų pluoštelių (atspindžio faktoriai skirtingi)

Plokštelę perėjusios šviesos intensyvumo grafikas susideda iš maksimumų, kurių forma labai priklauso nuo atspindžio faktoriaus vertės. Kuo didesnis atspindžio faktorius, tuo ryškesni ir siauresni maksimumai, tarp jų – platus minimumai. Maksimumų ir minimumų dalmuo, nusakantis interferencinių juostelių *kontrastą* γ , iš (13.1) išraiškos gaunama:

$$\gamma = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \frac{T_{\max}}{T_{\min}} = \frac{1 + R^2}{1 - R^2}.$$

Interferencinės juostelės kontūro formą, smailės aštrumą nusako dydis, vadinamas *ryškiu* F – tai atstumo tarp dviejų gretimų interferencijos maksimumų ir juostelės pusplotis ε lygus atstumui tarp taškų, esančių į abi maksimumo puses toje vietoje, kur intensyvumas lygus pusei maksimalaus, t. y. $I_2/I_0 = 0,5$.

Norint išreikšti ryškį F (13.1) išraiškoje T keičiamas į $1 - R$:

$$\frac{I_2}{I_0} = \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \frac{\varphi}{2}}$$

m eilės interferencinės juostelės taškai, kuriuose intensyvumas lygus pusei maksimalaus, yra ties $\frac{\varphi}{2} = m\pi \pm \frac{\varepsilon}{2}$. Kai atspindžio faktoriaus R vertė didelė, iš (13.3) išraiškos gaunama:

$$\frac{2\sqrt{R}}{1-R} \frac{\varepsilon}{2} = 1. \text{ Iš čia juostelės kampinis pusplotis}$$

$$\varepsilon = \frac{1-R}{\sqrt{R}}.$$

Kadangi atstumas tarp gretimų juostelių atitinka $\varphi/2$ pokytį dydžiu π , tai ryškis

$$F = \frac{2\pi}{2\varepsilon} = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R};$$

čia λ yra filtro geriausiai praleidžiamos bangos ilgis, $\delta\lambda$ – praleidimo juostos pusplotis. Didėjant atspindžio faktoriui interferencijos juostelių ryškis didėja. Iš (13.3) išraiškos išplaukia, kad kai $\varphi/2 = m\pi$, tai dalmuo $I_2/I_0 = 1$, t. y. banga nuo plokštelės neatsispindi, o tik pereina pro ją. Atsispindėjusios bangos amplitudė lygi nuliui.

Atsispindėjusios ir krintančios bangos intensyvumo dalmuo

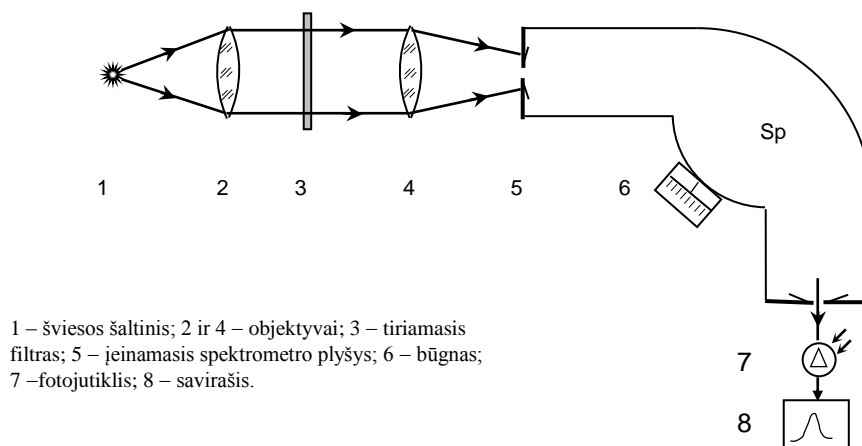
$$\frac{I_1}{I_0} = \frac{4R \sin^2 \frac{\varphi}{2}}{(1-R)^2 + 4R \sin^2 \frac{\varphi}{2}}.$$

Iš šios išraiškos išplaukia, kad kai $\sin(\varphi/2) = 0$, tai $I_1/I_0 = 0$, tuo tarpu šiomis sąlygomis $I_2/I_0 = 1$. Taigi, yra tokių krypčių, nusakomų sąryšiu $\cos\alpha = \frac{m\lambda}{2nd}$, kuriomis sklinda tik plokštelę perėjusioji banga.

Interferencinis vaizdas, kurį sukuria atsispindėjusi nuo plokštelės šviesa, papildo vaizdą, kurį sukuria perėjusi šviesa. Perėjusioje šviesoje siaurus maksimumus skiria platūs minimumai, o atsispindėjusioje šviesoje plačius maksimumus skiria siauri minimumai.

Tyrimas

Interferencinio filtro tyrimui naudojamas spektrometras, registruojantis spektrogramoje spinduliuotės (kaitrinės lempos) ištisinį spektrą. Optinė tyrimo schema pavaizduota 13.3 pav. Pradžioje spektrometras (Sp) graduojamas pagal žinomus spindulių (pvz, gyvsidabrio, helio arba neono) skleidžiamos šviesos bangos ilgius; nustatoma bangos ilgius atitinkančios spektrometro būgno (6) padalų vertės.



13.3 pav. Optinė tyrimo schema

Interferencinio filtro (3) šviesos praleidimo spektras registruojamas naudojant kaitrinę lempą (1), pastatytą objektyvo (2) židinyje. Į tiriamąjį filtrą, kurį galima sukinti apie vertikalią ašį, krinta lygiagrečių spindulių pluoštas. Objektyvu (4) spinduliai nukreipiami į spektrometro įeinamąjį plyšį (5). Filtro spektras registruojamas tokia spektro ruožė, kad aiškiai matytųsi praleidimo juostos sparnai. Filtro spektro registravimo pradžioje ir pabaigoje užrašoma “nulinė” linija, t.y. kai spektrometro įeinamasis plyšys uždengtas. Ši linija yra atskaitos pradžia nustatant foną T_f . Filtro spektras registruojamas esant skirtingiems spindulių kritimo kampams, pasukant filtrą apie vertikalią ašį.

Filtro didžiausio šviesos praleidimo faktoriaus skaičiavimui reikalingi duomenys (krintančiosios ir praėjusios šviesos intensyvumai), gaunami iš rašiklio poslinkio verčių, kurios matuojamos iš spektrogramų santykiniais vienetais. Registruojant filtro spektrus esant skirtingiems spindulių kritimo kampams, parenkamos vienodos registravimo sąlygos (plyšių plotis, stiprinimas) ir spektrometro būgno 6 padalų rodmuo turi atitikti didžiausią praleidimą.

Gautos spektrogramos atitinkamai apdorojamos ir skaičiuojami užduotyse nurodyti interferencinio šviesos filtro parametrai.