

(19)



(10)

LT 4709 B

(12)

PATENTO APRAŠYMAS

(11) Patent numeris: **4709**

(51) Int.Cl.⁷: **G01J 4/00**

(21) Paraiškos numeris: **98-191**

(22) Paraiškos padavimo data: **1998 12 23**

(41) Paraiškos paskelbimo data: **2000 07 25**

(45) Patent paskelbimo data: **2000 10 25**

(72) Išradėjas:

Algirdas Audzijonis, LT

Janas Siroicas, LT

Antanas Stasiukynas, LT

(73) Patent savininkas:

Algirdas Audzijonis, Architektų g. 182-8, 2049 Vilnius, LT

Vilniaus pedagoginis universitetas, Studentų g. 39, 2034 Vilnius, LT

(54) Pavadinimas:

Plonos skaidrios plėvelės optinių konstantų nustatymo būdas

(57) Referatas:

Plonos skaidrios plėvelės ant kristalinio pagrindo optinių konstantų nustatymo būdas priklauso optikos sričiai ir gali būti pritaikytas kristalų optinių savybių tyrimui.

Matavimo schemą sudaro pažeisto visiško vidaus atspindžio prizmė (1), uždėta ant plonos skaidrios plėvelės (2) susiformavusios ant skaidraus arba neskaidraus izotropinio arba anizotropinio pagrindo (3). Iš monochromatoriaus nukreipto į prizmę spindulio kampas θ ir atsispindėjusio spindulio nuo prizmės kelyje pastatytas refraktometras (4) su skaičiavimo įrenginiu. Refraktometro (4) pagalba matuojami monochromatinės šviesos s ir p poliarizacijų energetiniai atspindžio koeficientai R_{SS} ir R_{PP} .

Išradimas priklauso optinei spektroskopijai ir gali būti pritaikytas kristalų optinių savybių tyrimui.

Nustatyti plonos ir skaidrios plėvelės storį d ir lūžio rodiklį n_2 galima elipsometrijos pagalba. Matuojame atsispindėjusios šviesos elipsinius parametrus Δ ir Ψ , kurių pagalba gali būti nustatytas s ir p poliarizacijų monochromatinės bangos λ atspindžio amplitudžių r_s ir r_p (kur s yra poliarizacija statmena, o p lygiagreči sistemos paviršiui) santykis

$$\frac{r_s}{r_p} = \operatorname{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta}$$

Surišant Δ ir Ψ su n_2 ir d per r_p ir r_s , esant dviem kritimo kampams θ_1 ir θ_2 , gaunama dviejų lygčių sistema, kurią sprendžiant randamas lūžio rodiklis n_2 ir redukuotas plėvelės storis $d_r = d/\lambda$ (R.M.A. Azzam, N.M. Bashara. Ellipsometry and polarized light.// North -Holland Publishing Company, Amsterdam - New York - Oxford, 1977.- P.583). Tačiau lygčių sistemos

$$f_i(n_2, d_r) = 0, \quad i = 1, 2$$

sprendimas yra komplikotas, daugelyje atvejų nuo pradinės n_2 vertės priklauso konvergencijos greitis ir rezultato tikslumas.

Žinomas plonos skaidrios plėvelės parametrų n_2 ir d_r nustatymo būdas, matuojant atsispindėjusios šviesos elipsometrinius parametrus Δ ir Ψ , žinant θ (D.Charlot and A.Marvani. Ellipsometric data processing: an efficient method and an analysis of the relative errors.// Optics.-1987 -V.24, Nr.20.- P. 3368 - 3373(1985)). Šis būdas leidžia išvengti suskaičiuotų dydžių n_2 ir d_r reikšmių stiprios priklausomybės nuo pradinių šių dydžių verčių, gerai konverguoja ir leidžia, sąlyginai nesudėtingo skaičiavimo pagalba, nustatyti rezultatų (n_2, d_r) jautrio priklausomybę nuo eksperimentiniu būdu gautų parametrų θ , Δ ir Ψ reikšmių. Šiame metode nustatomas n_2 sprendžiant netiesinę lygtį, kurios savybės leidžia panaudoti suprastintą skaitmeninį skaičiavimą. Redukuotą plėvelės storį d_r surandame sprendžiant kitą vieno kintamojo lygtį, kurioje dydis n_2 yra parametru. Toks būdas leidžia, atlikus nesudėtingus matematinius skaičiavimus, parinkti optimalias eksperimentinių parametrų vertes.

Šis plonojo paviršinio sluoksnio optinių parametrų nustatymo būdas turi eilę trūkumų:

1. Reikalingas sudėtingas ir brangus elipsometro įrenginys.
2. Matavimo būdas leidžia nustatyti n_2 ir d_r , sprendžiant vieno kintamojo lygtis, tik jeigu pagrindas yra izotropinis.

Išradimo tikslas sumažinti plonos plėvelės ant įvairaus skaidrumo pagrindo lūžio rodiklio n_2 ir redukuoto storio d_r matavimo paklaidas ir sutrumpinti jų matavimų laiką.

Siūlomame plonos skaidrios plėvelės ant kristalinio pagrindo optinių konstantų nustatymo būde tikslas pasiekiamas taip: žinant šviesos spindulio kritimo kampą θ , matuoja atsispindėjusios šviesos parametrus ir iš jų matematinėmis operacijomis apskaičiuoja plonos

skaidrios plėvelės optines konstantas. Nauja tai, kad matuojant refraktometru monochromatinės šviesos s ir p poliarizacijų energetinius atspindžio koeficientus R_{SS} ir R_{PP} , uždėjus ant plonos plėvelės su įvairaus skaidrumo izotropiniu arba anizotropiniu pagrindu pažeisto visiško vidaus atspindžio skaidrią prizmę su žinomu lūžio rodikliu n_1 , nustato plėvelės lūžio rodiklį n_2 .

Tokiu būdu matuojant nustatomos atskirai skaidrios plėvelės n_2 ir d_r ir jų paklaidos, pagal kurias surandamas optimalus spindulio kritimo kampas θ .

Kiti privalumai:

1. Pagrindas gali būti įvairaus skaidrumo, izotropinis ar anizotropinis (vienaašis kristalas);
2. Matuodami tik atspindžio koeficientus R_{SS} ir R_{PP} pažeisto visiško vidaus atspindžio sąlygomis leidžia nustatyti n_2 ir d_r su santykinę paklaida, neviršijančia 10^{-4} ;
3. Nereikalingas brangus ir sudėtingas elipsometrinis įrenginys;
4. Pasiūlytas plonų plėvelių parametrų n_2 ir d_r skaičiavimo būdas, sprendžiant dvi vieno kintamojo lygtis, sudaro galimybes iš esmės pagreitinti šių parametrų reikšmių nustatymo procesą; parametrų n_2 ir d_r skaičiavimas pasidaro visiškai patikimas, supaprastėja siūlomo būdo tiksluminių charakteristikų įvertinimas.

Išradimas iliustruojamas brėžiniais, kuriuose vaizduojama: fig. 1 – išradimo matavimo schema, fig. 2 – plonos plėvelės lūžio rodiklio n_2 matavimo paklaidos priklausomybės nuo spindulio kritimo kampo θ diagrama.

Matavimo schemą sudaro pažeisto visiško vidaus atspindžio prizmė 1 (fig. 1), uždėta ant plonos skaidrios plėvelės 2, susiformavusios ant skaidraus arba neskaidraus izotropinio arba anizotropinio pagrindo 3. Iš monochromatoriaus (brėžinyje neparodyta) nukreipto į prizmę spindulio kampu θ ir atsispindėjusio nuo jos kelyje pastatytas refraktometras 4 su skaičiavimo įrenginiu. Refraktometro 4 pagalba matuojami monochromatinės šviesos s ir p poliarizacijų energetiniai atspindžio koeficientai R_{SS} ir R_{PP} .

Tokios sistemos amplitudinis atspindžio koeficientas

$$r_{123} = (r_{12} + r_{23} \gamma) / (1 + r_{12} r_{23}), \quad (1)$$

kur $\gamma = \exp(2i\beta) = \exp\left(i \frac{4\pi}{\lambda} d \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}\right)$, r_{12} , r_{23} - atsispindėjusios šviesos nuo atitinkamų (fig. 1) skiriamųjų ribų Frenelio koeficientai, $\beta = \left(i \frac{4\pi}{\lambda} d \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}\right)$, o energetiniam atspindžio koeficientui R galiojo lygtis

$$R = \frac{r_{12} + r_{23} \gamma}{1 + r_{12} r_{23} \gamma} \cdot \frac{r_{12}^* + r_{23}^* \gamma^*}{1 + r_{12}^* r_{23}^* \gamma^*}. \quad (2)$$

Jeigu $n_1 \sin \theta_1 < n_2$, tai $r_{12} = \text{Re}(r_{12})$. Pasinaudodami lygtimi $\gamma^* = \gamma^{-1}$, vietoje (2), gaunane

$$R = \left(r_{12} r_{23}^* + (r_{12}^2 + \rho_{23}^2) \gamma + r_{12} r_{23} \gamma^2 \right) / \left(r_{12} r_{12}^* + (1 + r_{12}^2 \rho_{23}^*) \gamma + r_{12} r_{23} \gamma^2 \right), \quad (3)$$

kur $\rho_{23} = /r_{23}/$. Pažymėję

$$a = r_{12} r_{23}^* (R - 1), \quad b = R(1 + r_{12} \rho_{23}^2) - (r_{12}^2 + \rho_{23}^2), \quad c = r_{12} r_{23} (R - 1), \quad (4)$$

lygtį (1) perrašysime pavidale

$$c\gamma^2 + b\gamma + a = 0. \quad (5)$$

Kadangi, remiantis (4) $a = c^*$, tai

$$c\gamma^2 + b\gamma + c^* = 0. \quad (6)$$

Plėvelės redukuotas storis d_r įeina į parametro γ išraišką (1). Matuodami dviejose statmenose šviesos poliarizacijose, ir remiantis (5), gauname dviejų lygčių sistemą

$$\begin{aligned} c_1 \gamma^2 + b_1 \gamma + c_1^* &= 0, \\ c_2 \gamma^2 + b_2 \gamma + c_2^* &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Iš čia

$$\gamma = \frac{c_2 a_1 - c_1 a_2}{c_1 b_2 - c_2 b_1} = \frac{a_2^* a_1 - a_1^* a_2}{a_1^* b_2 - a_1 b_1} = \frac{c_2 c_1^* - c_1 c_2^*}{c_1 b_2 - c_2 b_1}. \quad (8)$$

Kadangi skaidriai plėvelei $|\gamma| = 1$, tai iš (8) gauname dydį

$$\Gamma(n_3, k_3, n_2, n_1) \equiv |c_1 b_2 - c_2 b_1| - |c_2 c_1^* - c_1 c_2^*| = 0, \quad (9)$$

kuris esant tiksliai žinomoms vertėms n_3 , k_3 , n_2 ir n_1 , yra lygus nuliui. (9) lygtyje neįeina plėvelės storis d . Iš (9) galima rasti plėvelės n_2 , o plėvelės storį d_r randame, įstatę reikšmę n_2 į vieną iš lygčių (7).

Jeigu pagrindas yra anizotropinis kristalas, kurio optinė ašis turi laisvą orientaciją, sistemos pagrindas – plėvelė, atspindžio matricos diagonaliniai nariai τ_{SS} ir τ_{PP} yra:

$$\begin{aligned} \tau_{SS} &= \frac{r_S + (r_{SS} - r_{PP} r_S r_P) e^{i\gamma} + (r_{SS} r_{PP} - r_{SP} r_{PS}) r_S e^{i2\gamma}}{1 + (r_S r_{SS} + r_P r_{PP}) e^{i\gamma} + (r_{SS} r_{PP} - r_{SP} r_{PS}) r_S r_P e^{i2\gamma}} \equiv \frac{g_0 + g_1 e^{i\gamma} + g_2 e^{i2\gamma}}{b_0 + b_1 e^{i\gamma} + b_2 e^{i2\gamma}}, \\ \tau_{PP} &= \frac{r_P + (r_{PP} - r_{SS} r_S r_P) e^{i\gamma} + (r_{SS} r_{PP} - r_{PS} r_{SP}) r_P e^{i2\gamma}}{1 + (r_S r_{SS} + r_P r_{PP}) e^{i\gamma} + (r_{SS} r_{PP} - r_{SP} r_{PS}) r_S r_P e^{i2\gamma}} \equiv \frac{h_0 + h_1 e^{i\gamma} + h_2 e^{i2\gamma}}{b_0 + b_1 e^{i\gamma} + b_2 e^{i2\gamma}}, \end{aligned} \quad (10)$$

kur $r_S = r_{S,12}$; $r_P = r_{P,12}$; $r_{SS} = r_{SS,23}$; $r_{PP} = r_{PP,23}$; $r_{SP} = r_{SP,23}$;

$r_{PS} = r_{PS,23}$ - Frenelio šviesos atspindžio koeficientai nuo atitinkamų skiriamųjų ribų (fig. 1.)

Skaidriam kristalui, kuomet $n_2 > n_1 \sin \theta$,

$$R_{SS} = \tau_{SS} \tau_{SS}^* = \frac{A_1 + A_2 \cos \gamma + A_3 \cos 2\gamma}{B_1 + B_2 \cos \gamma + B_3 \cos 2\gamma},$$

$$\text{kur } A_1 = g_0^2 + g_1^2 + g_2^2, \quad A_2 = 2(g_0 g_1 + g_1 g_2), \quad A_3 = 2g_0 g_2, \\ B_1 = f_0^2 + f_1^2 + f_2^2, \quad B_2 = 2(f_0 f_1 + f_1 f_2), \quad B_3 = 2f_0 f_2.$$

Kadangi $\cos 2\gamma = 2\cos^2 \gamma - 1$, tai

$$2(B_3 R_{SS} - A_2) \cos^2 \gamma + (B_2 R_S - A_2) \cos \gamma + [(B_1 - B_3) R_{SS} - (A_1 - A_3)] = 0 \quad (11)$$

Perrašome (11) pavidale

$$D_2^{(S)} \cos^2 \gamma + D_1^{(S)} \cos \gamma + D_0^{(S)} = 0, \quad \text{čia } D^{(S)} = f(R_{SS}); \quad (12)$$

$$D_2^{(P)} \cos^2 \gamma + D_1^{(P)} \cos \gamma + D_0^{(P)} = 0, \quad \text{čia } D^{(P)} = f(R_{PP}).$$

n_2 , o po to ir d_r , randami sprendžiant (12) lygtį. Neskaidriam kristalui tinka (12) tipo lygtis su nariu $\cos^4 \gamma$.

Siūlomo būdo galimybių atskleidimui išnagrinėta modelinės plonos plėvelės, esančios CaCO_3 kristalo paviršiuje, lūžio rodiklio n_2 ir redukuoto storio d_r nustatymo paklaidų priklausomybė nuo spindulio kritimo kampo θ . Matuojant atspindžio koeficientus R_{SS} ir R_{PP} , spindulio kritimo kampo reikšmė buvo parenkama iš skaičiuojamo dydžio $\delta\sigma^2 = \delta n_2^2 + \delta d_r^2$ minimumo sąlygos. Skaičiavimai parodė, kad optimalios matuojamų parametų sąlygos priklauso nuo kristalinio pagrindo optinės ašies orientacijos ir jo anizotropiškumo $n_o - n_e$ reikšmės (n_o - paprastojo spindulio lūžio rodiklis, n_e - nepaprastojo spindulio lūžio rodiklis). Skaičiuojant plėvelės n_2 ir d_r nustatymo paklaidas, buvo pasirinktos matuojamų atspindžio koeficientų ir spindulio kritimo kampo tokios paklaidų maksimalios reikšmės: $\delta R = 0,005$; $\delta \theta = 10''$. Spindulio apertūros kampo A ir kristalinio pagrindo optinės ašies orientaciją nustatančių kampų γ ir ω paklaidos buvo tokios: $\delta A = 30''$; $\delta \gamma = \delta \omega = 2^\circ$. Skaičiavimai atlikti kristaliniam pagrindui, kurio lūžio rodikliai $n_o = 1,65$, $n_e = 1,48$ ir sugerties rodikliai $k_o = k_e = 0,001$. PVVA prizmės lūžio rodiklis $n_1 = 1,75$.

Fig. 2 parodyta plėvelės lūžio rodiklio paklaidos δn_2 priklausomybė nuo spindulio kritimo kampo θ , kai pagrindo optinė ašis yra statmena plėvelės paviršiui. Šio atveju atspindžio koeficientai R_{SS} ir R_{PP} matuojami PVVA sąlygomis 0,5 % tikslumu. Plėvelės redukuotas storis d_r buvo parinktas toks: 0,04 – kreivė 1; 0,08 – kreivė 2; 0,16 – kreivė 3. Pabrėžtina, kad kiekvienam plėvelės storiui minimalios paklaidos reikšmė yra tarp Briusterio

ir visiško vidaus atspindžio kampo reikšmių. Mažėjant plėvelės storiui paklaidos δn_2 (o kartu ir δd_1) reikšmė auga. Be to, šis būdas panaikina paklaidas, susijusias su blogai apibrėžtų lygčių sprendimu.

IŠRADIMO APIBREŽTIS

Plonos skaidrios plėvelės ant kristalinio pagrindo optinių konstantų nustatymo būdas, kai žinant šviesos spindulio kritimo kampą θ , matuoja atsispindėjusios šviesos parametrus ir iš jų apskaičiuoja plonos skaidrios plėvelės optines konstantas, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad matuojant refraktometru monochromatinės šviesos s ir p poliarizacijų energetinius atspindžio koeficientus R_{SS} ir R_{PP} , uždėjus pažeisto visiško vidaus atspindžio skaidrią prizmę su žinomu lūžio rodikliu n_1 ant plonos plėvelės su įvairaus skaidrumo izotropiniu arba anizotropiniu pagrindu, nustato plėvelės lūžio rodiklį n_2 .