

BIREFRAȚIE ÎN GIDURILE DE UNDĂ PLANARE

Vladimir Parvan, Lucreția Nemerenco, Alisa Mașnic
 Universitatea Tehnică a Moldovei
lnemerenco@yahoo.com

Abstract: Method for automatic determining the spectral dependence of refractive index for ordinary (E_p) and extraordinary (E_s) light waves of the interference transmission or reflection spectra for planar waveguides and nano-layers was developed. Method is used for scientific research and completion of the laboratory.

Cuvinte-cheie: indicele de refracție, unde ordinare și extraordinare, spectrele de interferență.

I. Modelul matematic pentru indicele de refracție

Indicele de refracție determină propagarea luminii în materiale. Folosind ecuațiile lui Maxwell (1) putem scrie:

$$\text{rot} \cdot \text{rot} \mathbf{E} = \text{rot} \left[-\mathbf{m} \mathbf{m}_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \right] = -\mathbf{m} \mathbf{m}_0 \frac{\partial}{\partial t} \text{rot} \mathbf{H} = -\mathbf{m} \mathbf{m}_0 \left(\mathbf{s} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{e} \mathbf{e}_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \right) \quad (1)$$

Luând în considerație, ca în ecuația lui Maxwell (1) $\text{div} \mathbf{E} = 0$ obținem:

$$\text{rot} \cdot \text{rot} \mathbf{E} = [\nabla(\nabla \cdot \mathbf{E})] = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E} - \nabla^2 \mathbf{E}) = \text{grad} \cdot \text{div} \mathbf{E} - \nabla^2 \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E}.$$

rezulta,

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mathbf{m} \mathbf{m}_0 \mathbf{s} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \mathbf{m} \mathbf{m}_0 \mathbf{e} \mathbf{e}_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

(2)

Luând în considerație (2) scriem

$$-\bar{k}^2 E_0 \mathbf{e} = -\mathbf{m} \mathbf{m}_0 \mathbf{e} \mathbf{e}_0 \omega^2 E_0 \mathbf{e} - i \mathbf{m} \mathbf{m}_0 \mathbf{s} \omega E_0 \mathbf{e} \quad (5)$$

Împărțim (5) la $-E_0 \mathbf{e}$ obținem

$$\bar{k}^2 = \mathbf{m} \mathbf{m}_0 \mathbf{e} \mathbf{e}_0 \omega^2 + i \mathbf{m} \mathbf{m}_0 \mathbf{s} \omega \quad \bar{k} = (\mathbf{m}_0 \mathbf{e}_0)^{\frac{1}{2}} \omega \left(\mathbf{m} \mathbf{e} + \frac{i \mathbf{m} \mathbf{s}}{\mathbf{m}_0 \mathbf{e}_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Admitem, ca $c = (\mathbf{m}_0 \mathbf{e}_0)^{-\frac{1}{2}}$ atunci (6):

$$\bar{k} = \frac{\omega}{c} \left(\mathbf{m} \mathbf{e} + i \frac{\mathbf{s} \mathbf{m}}{\mathbf{m}_0 \mathbf{e}_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Vectorul de unda este legat cu parametrii fenomenologici. Admitem, ca $\mathbf{m} = 1, \mathbf{s} = 0, \mathbf{e} = 1$ ecuația (7) poate fi scrisă:

$$\bar{k} = \frac{\omega}{c} \quad (8)$$

$$\bar{k} = \frac{\omega}{u}, \quad u = \frac{c}{N}; \quad (9)$$

unde: N - indicele de refracție a materialului, luând în considerație (9)

$$\bar{k} = \frac{w}{u} = \frac{w}{c} N; \quad N = \left(m\epsilon + i \frac{m\sigma}{\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}$$

unde: N - mărimea complexa;

$$N = n + ik;$$

unde, n - partea reala a coeficientului de refracție, k - coeficientul de extincție (determina coeficientul de absorbție);

$$\bar{k} = \frac{4pk}{l} \quad e = e_1 + ie_2$$

unde: \bar{k} - vectorul de unda

$$\begin{cases} e_1 = n^2 + k^2 = m\epsilon \\ e_2 = 2nk = \frac{m\sigma}{\omega\epsilon_0} \end{cases} \quad (10)$$

Pierderile de energie în materiale sunt determinate atât de parte reala cit și de partea imaginara (este actual pentru ghiduri de unda deoarece partea imaginara penetrează în învelișul fibrei optice). Pierderile de baza a energiei sunt legate cu parte reala, dar o mica parte i se datorează și părții imaginare. Energia absorbita ($2nk$) este legata cu consumul energiei pentru schimbarea conductanței (σ).

II. Metoda de măsurare a dispersiei cromatice în fibrele optice

Cele mai precise metode de măsurare a dispersiei cromatice în fibrele optice sunt metodele interferometre. Schema de structura a metodei de măsurare prin interferență (pe baza interferometrului lui Mach-Zehnder), este prezentata în figura 1. Radiația de la o sursa de banda larga, după selectorul a lungimilor de unda nimereste in interferometrul Mach-Zehnder. La deplasarea liniara a unui din capete a fibrei, ce intra in componenta brațului de referință a interferometrului, în canalul de referință se introduce diferența lungimilor de unda cunoscuta, valoarea căreia permite calculul reținerii de grup a semnalului luminos în fibra testata, care se afla în brațul de măsura a interferometrului. Metoda interferențelor este utilizata in cazul unor segmente de fibră scurte de lungimea a câtorva metri și de obicei este utilizată pentru controlul procesului de producere la fabricarea fibrelor și a componentelor sistemului de emisie.

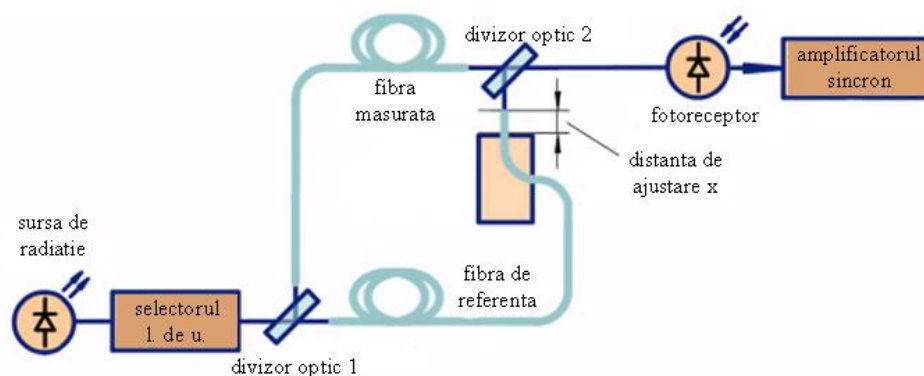


Fig.1. Schema de structura a metodei de măsurare a interferenței indicelui de refracție

III. Dispersia cromatică în structurile planare

La propagarea razelor de lumina prin structura ghidului de unda cu suprafețe plane și paralele S_1 și S_2 are loc interferența razelor reflectate de la suprafața S_1 și a razelor reflectate de la suprafața S_2 (fig.2). Razele reflectate de la suprafața a doua capătă o diferență de lungime de propagare în rezultatul căreia are loc interferența, spectrul tipic este arătat în figura 2.

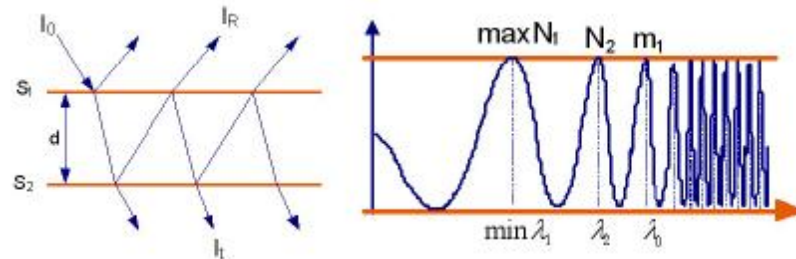


Fig. 2. Metoda de măsurare a interferenței indicelui de refracție

Dacă de măsurat interferența spectrelor de reflexie sau transparență și de identificat consecutivitatea benzilor min-max, atunci pentru fiecare lungime de unda λ se poate de determinat indicele de refracție n . Poziția maximilor și minimilor în spectrul de interferență a reflexiei (transparenței) este determinat din relațiile:

$$I_{\max} = \frac{2nd}{m}; \quad m = 2, 4, 6... \quad (11)$$

$$I_{\min} = \frac{2nd}{m}; \quad m = 1, 3, 5...$$

unde m – numărul benzilor de interferență. În spectrele de interferență a transparenței maxime și minime sunt observate în condiții când, $\sin\alpha = 0$ și $\sin\alpha = 1$.

$$a = \frac{p}{2} + mp,$$

unde $m = 0, 1, 2, \dots$

În această metodă este greu de determinat ordinea benzilor de interferență. Ordinea benzilor de interferență de obicei se determină, dacă este vizibilă banda zero, care are culoarea albă. Dar această bandă nu este văzută în experiment. În acest caz se utilizează metoda diferenței. Pentru două maxime (minime) arbitrare condiția de interferență este următoarea:

$$\frac{2pnd}{\lambda_1} = \frac{p}{2} + M_1 p$$

$$\frac{2pnd}{\lambda_2} = \frac{p}{2} + M_2 p$$

diferența acestor expresii va da, pentru $\lambda_1 > \lambda_2$:

$$2pnd \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) = (M_2 - M_1) p$$

admitem $M_2 - M_1 = M$, atunci primim relația pentru calcul coeficientului de refracție n :

$$n = \frac{M}{2d(n_2 - n_1)}$$

unde $\nu_2 = 1/\lambda_2$, $\nu_1 = 1/\lambda_1$, M – diferența numerelor a vârfurilor de interferență, pentru care se calculează n , ν_1 și ν_2 - frecvențele a maximilor (minimilor).

IV. Instalația experimentală pentru măsurarea spectrelor de interferență

Pentru măsurarea spectrelor de interferență a transparenței sau de reflexie, în laboratorul de optoelectronică a catedrei TLC se utilizează spectrometrul, format pe baza de monocromatoare МДР - 2 sau СДЛ - 1. Spectrele de reflexie se măsoară pentru unghiuri incidente apropiate de

unghiuri normale ($\theta < 3^\circ$), folosind sisteme de focusare cu distanța focală mare. Măsurarea dependentelor unghiulare de transparență la diferite frecvențe fixe poate fi efectuată la instalații ce sunt prezentate în fig.3.

La propagarea razelor de lumină prin structura ghidului de unda cu suprafețe plane și paralele S_1 și S_2 are loc interferența razelor reflectate de la suprafața S_1 și a razelor reflectate de la suprafața S_2 . Razele reflectate de la suprafața a doua capătă o diferență de lungime de propagare în rezultatul căreia are loc interferența. Ghiduri de undă ideale plane sunt cristalele stratificate, în care însăși natura produce suprafețe cu plane paralele S_1 și S_2 . Reprezentantul tipic a acestui tip de cristale sunt cristale tiogalate- $PbGa_2S_4$, care se despică. Spectrele de interferență a transparenței cristalelor $PbGa_2S_4$ sînt prezente în figura 4. În spectrele de interferență se evidențiază proprietatea de birefracție a materialului, care determină prezența liniilor de interferență dense (1, 2, etc.) și un tip de benzi mai înguste.

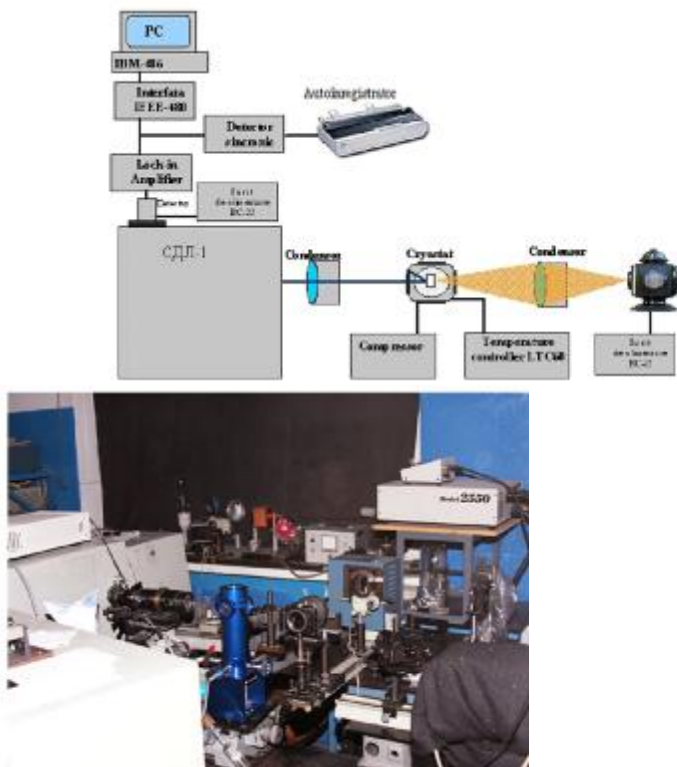


Fig.3. Schema instalației experimentale pentru măsurarea spectrelor optice și instalația propriu-zisă în laborator

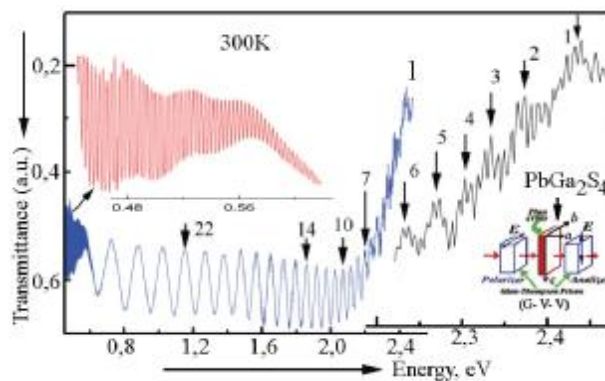


Fig.4. Spectrele de interferență a transparenței cristalelor de $PbGa_2S_4$.

Folosind o programă standard «Origin» sînt identificate pozițiile maximilor și a minimilor spectrelor de interferență. Din maxime (minime) a spectrelor de interferență și din relațiile lui Fresnel pentru interferență se calculează indicele de refracție n_p , n_s și $\Delta n = n_p - n_s$ pentru polarizarea E_p și E_s adică pentru unda luminoasă ordinară și extraordinară, Fig.4.

V. Procedura de calcul automatizat a coeficientului de refracție din spectre de reflecție sau transparenta

1. Pentru calculul coeficienților de refracție este nevoie de găsit poziția maximilor în spectrul de reflecție. **Atenție!!!** In caz daca coloana lungimilor de unda în tabelul cu date inițiale are caracter descrescător, atunci Origin nu va găsi maxime și va indica mesajul de eroare.

2. Există 2 variante de transformare a consecutivității crescătoare și descrescătoare: prima, manipulare cu date din coloane în Excel și a doua, transformarea lungimii de undă în energie.

3. Procedura de transformare a lungimilor de undă în energie: se selectează coloana lungimilor de unda se face clic dreapta pe ea, se alege opțiunea "Set Column Values", în fereastra deschisă se înscrie funcția "1240/Col(A)", se confirmă aplicarea transformării prin tasta "Apply".

4. Procedura de căutare a extremelor spectrului: se selectează ambele coloane (x și y) se deschide opțiunea Analysis, Spectroscopy, Baseline and Peaks, Open Dialog, ok. În fereastra deschisă alegem opțiunea Method "None" pentru excluderea etapei de formare a Baseline, trecem la următoarea etapă prin tasta "Next". La opțiunea Method alegem "Local Max", Next.

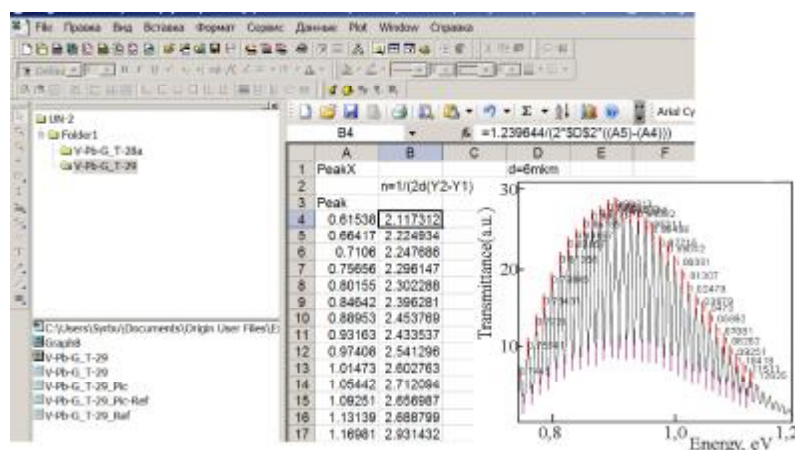


Fig.5. Energia maximelor, notată de programa Origin în spectrele de interferență

La această etapă este posibil de configurat condițiile de căutare a extremelor în dependență de spectrul avut. După apăsarea Next va fi prezentat graficul cu poziția maximilor pe grafic, după cum este prezentat în fig.5. Dacă rezultatul ne satisface tastați Finish dacă nu Prev pentru revenirea la etapa de ajustare. După finalizare căutării în tabelul de date inițiale veți primi **Informația** necesare cu denumirea **PeaksInfo**.

5. În stînga la structura documentului faceți click dreapta alegeți New Window, Excel se va deschide o pagină de Excel în care introduceți coloana B(X1) PeakX care reprezintă poziția maximilor pe axa X.

Formula de calcul $[n = 1.239644 / (2 * \lambda * ((A5) - (A4)))]$ a indicelui de refracție $\{ \lambda \}$ - elementul dat este constanta grosimii ghidului de unda (nano-stratului). Formați coloana cu valori a coeficienților de refracție după le copiați în tabelul cu date inițiale.

6. Construiți dependența indicelui de refracție de energie: cînd este activă tabela fără nici o selecție găsiți meniul Plot, Line, Line

În fig.7 sînt prezentate spectrele de interferență a reflexiei nano structurilor InAlGaAs cu gropi cuantice utilizate în lasere VECSEL (B-r.7,2nm-QW.6,2nm-B-r.7,2 nm) cu lungimea de undă

radiantă 1265 nm. În spectre de reflexie se observă două maxime intensive 0,93 eV și 1,0 eV determinate de tranziții hh1-e1 și hh2-e2 între nivelele a electronilor și golurilor în groapa cuantică [3]. Din partea lungimilor de unda mari a spectrului sînt observate oscilații a spectrelor de interferență din care sînt calculate indicii de refracție n a stratului cuantic.

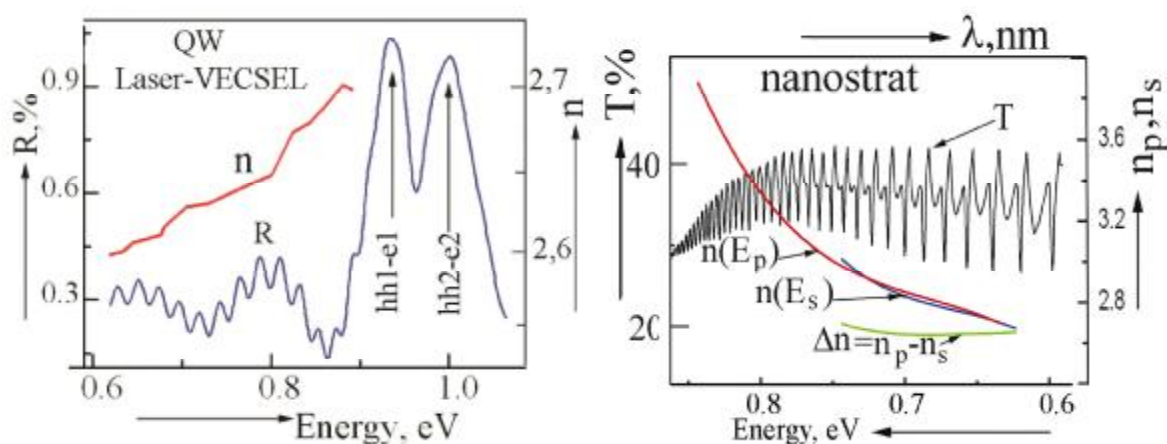


Fig.7. Interferența spectrelor de reflexie a nano structurii InAlGaAs utilizare în laserele VECSEL (B-r.7,2 nm - QW.6,2 nm - B-r.7,2 nm) cu lungimea de undă radiantă 1265 nm. Interferență în spectrele de transparență T a nano stratului birefractiv și valorile calculate a indicelui de refracție n_p , n_s și $\Delta n = n_p - n_s$

În spectrele de interferență a transparenței sau reflexiei în nano straturi birefractive se manifestă interferențe tipice prezentate în Fig. 4. Din calculele spectrelor de interferență sînt obținuți indicii de refracție n_s , n_p și $\Delta n = n_s - n_p$ pentru stratul birefractiv InAlGaAs a gropii cuantice.

VI. Concluzii.

A fost elaborată metoda de calcul a dispersiei cromatice din spectrele de interferență a transparenței și reflexiei, cu utilizarea programei standard Origin. Această programă poate fi utilizată cu succes și la determinarea dependențelor spectrale a ghidurilor de undă planare, cristalelor stratificate și a nanostraturilor cu gropi cuantice de potențial Metoda este utilizată pentru cercetare științifică și pentru realizarea lucrărilor de laborator.

VII. Referințe bibliografice

1. Ivchenko E.L., Optical spectroscopy of semiconductor nanostructures (Alpha Science International, Harrow, UK, 2005).
2. Syrbu N.N., Dorogan A.V., Masnik A., Ursaki V.V., Birefringence of $\text{CuAl}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ crystals, Journal of Optics 13, 035703, 2011, pp.9.
3. Syrbu N., Dorogan A., Dragutan N., Vieru T., Ursaki V., Exciton luminescence in $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum well heterostructures, Physica E 44, 2011, pp. 202-206