

9. STUDIUL POLARIZĂRII LUMINII PRIN REFLEXIE ȘI REFRACTIE. VERIFICAREA LEGII LUI MALUS

A. Scopul lucrării. Stabilirea simetriei axiale a radiației naturale. Verificarea legii lui Malus. Studiarea modului de variație a gradului de polarizare cu unghiul de incidență. Determinarea pe cale grafică a unghiului Brewster.

B. Dispozitive și materiale necesare; instalație pentru măsurarea gradului de polarizare, lamă de sticlă cu fețe plan paralele.

C. Principiul fizic al metodei.

Sursele de lumină sunt formate dintr-un număr foarte mare de sisteme atomice (atomi, molecule, ioni atomici sau moleculari) care printr-un mijloc oarecare sunt aduse în situația de a emite radiație electromagnetică din domeniul optic.

Procese de emisie ale radiațiilor optice de către sistemele atomice sunt de durată finită și sunt guvernate de legi statistice. În consecință undele electromagnetice emise într-un proces de emisie individual, finite în spațiu și timp, sunt numite grupuri de undă.

Grupurile de undă se propagă în spațiul din jurul sursei, formând fasciculul emis de aceasta. Întrucât într-un punct oarecare din spațiu, la un moment dat, acționează un număr foarte mare de grupuri de undă, ce au diverse orientări ale vectorului intensitate de câmp electric, vectorul intensitate de câmp electric rezultat variază astfel încât, valoarea medie în timp a pătratului intensității lui este aceeași pe orice direcție perpendiculară la direcția de propagare; câmpul are simetrie sferică.

Undele electromagnetice, deci și cele din domeniul optic, sunt unde transversale, (oscilațiile vectorilor intensitate de câmp electric \vec{E} și inducție magnetică \vec{B} se efectuează într-un plan perpendicular pe direcția de propagare. În aceste condiții, orientarea vectorului intensitate de câmp electric poate fi caracterizată relativ la o direcție fixă din spațiu, conținută într-un plan perpendicular la direcția de propagare. Unghiul $\alpha \in [0, 2\pi]$ pe care îl formează vectorul intensitate de câmp electric cu direcția fixă se numește

azimut.

Radiațiile pentru care azimutul intensității câmpului electric are, cu aceeași probabilitate, valori stabilite la întâmplare din domeniul de definiție, se numesc radiații nepolarizate, sau naturale. O radiație nepolarizată este echivalentă cu două radiații necoerente (independente una de alta), liniar polarizate pe direcții reciproc perpendiculare (au planele de vibrație perpendiculare).

Radiațiile pentru care variația azimutului câmpului electric poate fi exprimată printr-o anumită legătură se numesc radiații total polarizate.

Radiațiile total polarizate pentru care azimutul este constant în timp ($\alpha = \text{const.}$) se numesc radiații liniar polarizate. Pentru radiații liniar polarizate se definește planul de vibrație (plan care conține direcția de propagare și vectorul intensitate de câmp electric) și planul de polarizare (plan ce conține direcția de propagare și este perpendicular pe planul de vibrație).

Radiațiile a căror azimut variază periodic după legea $\alpha = \omega \cdot t$, unde ω este pulsația câmpului electromagnetic, iar t este timpul, se numesc radiații total polarizate eliptic sau circular.

Radiațiile pentru care, într-un punct de pe direcția de propagare, vectorul intensitate de câmp electric, având originea în acel punct, execută o mișcare circulară uniformă, se numesc eliptic polarizate dacă extremitatea vectorului intensitate de câmp electric descrie o elipsă și circular polarizate dacă descrie un cerc.

Între radiațiile nepolarizate și cele liniar polarizate există o gamă largă de radiații, având azimutul variind după hazard, numite radiații parțial polarizate, caracterizate prin faptul că fluxul, măsurat pe două direcții reciproc perpendiculare și conținute într-un plan perpendicular pe direcția de propagare, are valori extreme (maximă φ_M și minimă φ_m).

Radiațiile parțial polarizate pot fi caracterizate printr-o mărime P numită grad de polarizare, definită prin relația:

$$P(R) = \frac{\varphi_M(R) - \varphi_m(R)}{\varphi_M(R) + \varphi_m(R)}$$

(1)

în care φ_M reprezintă valoarea maximă, iar φ_m valoarea minimă a densității de flux, în vecinătatea punctului în care exprimăm mărimea P .

Pentru radiațiile nepolarizate $\varphi_M = \varphi_m$, deci $P=0$; pentru radiații liniar polarizate $\varphi_m=0$, deci $P=1$. În cazul radiațiilor parțial polarizate $0 \leq P \leq 1$.

După cum se știe, un filtru de polarizare (polaroid, prisma de polarizare) este un dispozitiv care lasă să treacă numai componenta câmpului electric paralelă cu o direcție numită direcția de transmisie a polarizorului. După un asemenea dispozitiv se obține radiație liniar polarizată, având planul de vibrație determinat de direcția de propagare a radiațiilor și de direcția de transmisie a filtrului de polarizare.

Valorile fluxului pe două direcții reciproc perpendiculare date pot fi obținute prin orientarea direcției de transmisie a polarizorului pe direcții paralele la direcțiile considerate.

În cazul fasciculelor emise de sursele de lumină obișnuite (fascicule de lumină naturală, nepolarizată), un receptor prevăzut cu filtru de polarizare la intrare, măsoară același flux la rotirea direcției de transmisie a polarizorului în jurul direcției de propagare, ceea ce demonstrează simetria axială a luminii nepolarizate.

Dacă pe un receptor prevăzut la intrare cu un filtru de polarizare ajunge radiație parțial polarizată, indicațiile relativ la flux ale receptorului vor avea valori extreme pentru două orientări reciproc perpendiculare ale direcției de transmisie a polarizorului.

Ca urmare a interacțiunii radiațiilor cu substanța poate avea loc o modificare a gradului de polarizare. În particular, în procesele de reflexie și refracție se poate modifica gradul de polarizare al luminii.

Componentele intensității câmpului electric reflectat, E_{rn} , normală la planul de incidență și E_{rp} paralelă la planul de incidență sunt legate de componentele intensității câmpului electric incident : E_{in} normală la planul de incidență și E_{ip} , paralelă la planul de incidență, prin relațiile lui Fresnel:

$$E_{rn} = \rho_n \cdot E_{in}$$

$$E_{rp} = \rho_p \cdot E_{ip}$$

(2)

în care coeficienții lui Fresnel ρ_n și ρ_p pot fi exprimați în funcție de unghiurile de incidență (i_1) și de refracție (i_2), dintr-un punct de pe o suprafață de separație dintre două medii omogene, izotrope și transparente, prin relațiile:

$$\rho_n = -\frac{\sin(i_1 - i_2)}{\cos(i_1 + i_2)}$$
$$\rho_p = \frac{\operatorname{tg}(i_1 - i_2)}{\operatorname{tg}(i_1 + i_2)}$$

(3)

După cum rezultă din relațiile (2) și (3), cu excepția cazului când $i_1 = i_2$ (când ρ_n se poate anula), pentru orice unghi de incidență $i_1 \neq 0$ există componentă a câmpului reflectat normală la planul de incidență. Coeficientul de reflexie - ρ_p - pentru componentele de câmp electric conținute în planul de incidență, se anulează pentru:

$$i_1 + i_2 = \frac{\pi}{2}; \operatorname{tg}(i_1 + i_2) = \pm\infty$$

(4)

Unghiul de incidență i_1 care satisface relația (4) se numește unghi Brewster. Relația (4) și legea refracției în punctul de incidență ($n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$) permit stabilirea valorii unghiului Brewster:

$$\operatorname{tg} i_{1B} = \frac{n_2}{n_1}$$

(5)

Chiar dacă radiația incidentă este nepolarizată, radiația reflectată la unghi Brewster este total polarizată liniar, având vectorul intensitate de câmp electric orientat perpendicular la planul de incidență ($E_{rp} = 0$, deoarece $\rho_p = 0$)

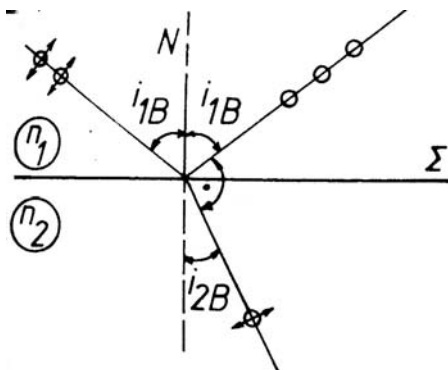


Fig.1

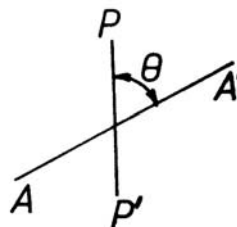


Fig.2

La incidență Brewster (Fig.1) unghiul dintre raza reflectată și raza refractată este $\frac{\pi}{2}$; radiația reflectată este total polarizată, având planul de vibrație perpendicular la planul de incidență, iar radiația transmisă este parțial polarizată.

Dacă radiația de la o sursă ajunge la receptorul prevăzut cu filtru de polarizare (numit analizor), fluxul măsurat de receptor poate fi exprimat prin legea lui Malus:

$$\varphi_A = \varphi_P \cdot \cos^2 \theta$$

(6)

în care θ este unghiul format de direcțiile de transmisie ale celor două filtre de polarizare.

În Fig.2 PP' reprezintă direcția de transmisie a polarizorului, iar AA' este direcția de transmisie a analizorului.

D. Întrebări recapitulative

1. Demonstrați legea lui Malus, utilizând proprietatea polarizorilor de a elimina, prin absorbție dicroică, una din componentele intensității de câmp electric din unda incidentă.
2. Demonstrați relațiile dintre coeficienții lui Fresnel, în baza relațiilor de definiție și a legii refracției.
3. Caracterizați starea de polarizare a radiațiilor reflectată și

transmisă la incidență Brewster.

4. Ce valori poate avea unghiul de incidență Brewster pentru sticle cu indice de refracție n din domeniul $[1,40 - 1,70]$?

5. Caracterizați starea de polarizare a radiațiilor la incidență diferită de incidența Brewster.

E. Modul de lucru

Instalația utilizată în Laboratorul de Optică pentru măsurarea gradului de polarizare a luminii are (Fig.3) următoarele părți componente:

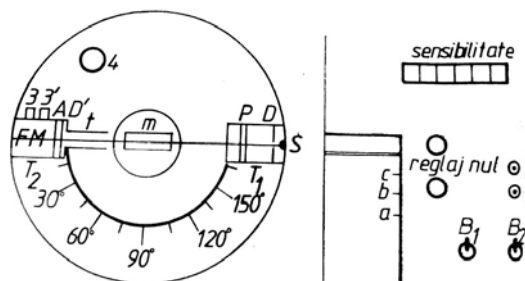


Fig.3

Pe o masă circulară M este montat tubul T_1 (cu posibilitatea de rotire pe un cerc centrat în centrul suportului C prevăzut cu diviziuni pentru măsurarea unghiurilor la centru) și tubul T_2 fix. Tubul T_1 conține sursa S , o diafragmă D și polarizorul montat la capătul tubului.

Tubul T_2 , tubul t (montat pentru eliminarea luminii parazite) și diafragma D' lasă lumina de la sursa S să ajungă la analizorul A , care poate fi rotit în jurul direcției de propagare, cu ajutorul unui sistem mecanic acționat de la butonul 4. În același tub se găsește fotomultiplicatorul FM . Accesul razelor de lumină pe catodul fotomultiplicatorului este oprit în poziția 3' a manetei 3.

În circuitul exterior al fotomultiplicatorului se găsește un bloc care asigură pe de o parte redresarea curentului, iar pe de altă parte amplificarea și înregistrarea semnalului obținut de la fotomultiplicator.

Se verifică dacă maneta 3 este în poziție 3'. Se conectează blocul redresor -amplificator -înregistrator la rețea la 220V. Butoanele B_1 și B_2 se trec pe poziția deschis. Se alege treptă 1 de sensibilitate. Se reglează nulul aparatului punând maneta înregistratorului pe poziția b, iar maneta 3 în poziția închis 3'. Butoanele pentru reglajul brut și fin a nulului permit aducerea peniței înregistratoare pe una din liniile hârtiei. Reglarea nulului se verifică înaintea fiecărei înregistrări.

Se scoate polarizorul P. Se aduce tubul T_1 în prelungirea tubului T_2 . Se aduce maneta de obturare a amplificatorului pe poziția 3. Se trece maneta înregistratorului din poziția a în poziția b. Dacă semnalul este prea mic se poate trece pe treapta a doua de sensibilitate. Când maneta înregistratorului se află în poziția c se asigură înregistrarea semnalului de la fotomultiplicator pe hârtia de înregistrat care se deplasează cu viteză constantă.

Se înregistrează semnalul la rotirea analizatorului, prin apăsare continuă pe butonul 4, care acționează un motorăș ce antrenează analizorul în mișcare circulară, printr-un sistem de roți dințate.

Se introduce polarizorul P în tubul T_1 , rotindu-l până când, pentru o poziție fixată a analizorului A, obținem o indicație maximă a peniței înregistratorului. Se înregistrează semnalul la o rotire completă a analizorului.

Acest grup de determinări permite concluzii referitoare pe de o parte la simetria axială a radiațiilor optice naturale, iar pe de altă parte verificarea legii lui Malus.

Pentru verificarea legii lui Malus se va reprezenta grafic funcția $\cos^2\theta$ cu $\theta \in [0, \pi]$ și se va compara cu graficul obținut în prezența polarizorului P în sistem.

În scopul studierii polarizării luminii prin reflexie se procedează în felul următor:

- Se alege o direcție pentru tubul T_1 .
- Se pune maneta 3 în poziția deschis și maneta înregistratorului în

Se trece maneta înregistratorului în poziția c și se efectuează înregistrarea pentru o rotație completă a lui A. Se repetă măsurătorile pentru unghiuri de incidență din domeniul $i_1 \in [0, \frac{\pi}{2}]$ din 10 în 10 grade. Se măsoară pentru fiecare înregistrare φ_M și φ_m și se calculează gradul de polarizare P, utilizând formula (1). Se reprezintă grafic gradul de polarizare în funcție de unghiul de incidență.

[illegible]