

7. ROTIREA NATURALĂ A PLANULUI DE POLARIZARE A LUMINII

A. Scopul lucrării: Studiul fenomenului de rotire naturală a planului de polarizare. Determinarea puterii de rotație specifică a zahărului. Determinarea concentrației unei soluții de zahăr.

B. Dispozitive și materiale necesare: Polarimetru Laurent, tuburi polarimetrice, cilindri gradați, balanță, zahăr, apă distilată.

C. Principiul fizic al lucrării

Din ecuațiile lui Maxwell rezultă că undele electromagnetice optice sunt unde transversale în care intensitatea câmpului electric \vec{E} , inducția magnetică \vec{B} și vectorul de undă \vec{K} sunt reciproc perpendiculare astfel încât formează un triedru drept. Dacă vectorul \vec{E} își păstrează direcția de acțiune în orice punct de pe direcția de propagare (independent de timp), unda electromagnetă optică se numește liniar polarizată sau plan polarizată. Într-o astfel de undă intensitatea câmpului electric \vec{E} se poate descompune în două componente coerente reciproc perpendiculare ale căror faze de oscilație sunt egale sau diferă cu un număr întreg de π :

$$(1) \quad \Delta\psi = m\pi \quad (m=0, 1, 2, \dots)$$

Planul care conține direcția de propagare $\vec{K} = K \cdot \vec{N}$ și direcția inducției magnetice \vec{B} se numește plan de polarizare.

Radiația optică liniar polarizată se poate obține din radiația nepolarizată (naturală) cu ajutorul unui dispozitiv numit polarizor. În calitate de polarizor se poate folosi un filtru de polarizare sau o prismă de polarizare cum ar fi, de exemplu, prisma lui Nicol. Pentru

analiza stării de polarizare se folosește un dispozitiv identic cu polarizorul numit polarizor analizor. Un polarizor selectează din unda plană nepolarizată numai componentele intensității câmpului electric paralele cu o anumită direcție numită direcția de transmisie a polarizorului.

Teoria propagării undelor electromagnetice optice în substanțe anizotrope, arată că o undă electromagnetică plană polarizată liniar care se propagă în substanța anizotropă pe direcția axei optice trebuie să-și conserve starea de polarizare oricare ar fi direcția de acțiune a intensității câmpului electric.

Pentru a verifica această concluzie se poate organiza un experiment după schema din figura 1. Un fascicul de raze paralele monocromatic polarizat liniar cu ajutorul unui polarizor P trece pe direcția axei optice Δ printr-o lamă de cuarț de grosime L . Fluxul fasciculului care iese din substanță este măsurat cu un receptor R care are la intrare un polarizor analizor A. Rotind cristalul de cuarț în jurul direcției de propagare se constată că fluxul fasciculului emergent rămâne nemodificat. De aici se poate trage concluzia că rotirea cristalului de cuarț în jurul direcției de propagare nu produce nici o schimbare în condițiile de propagare a radiațiilor.

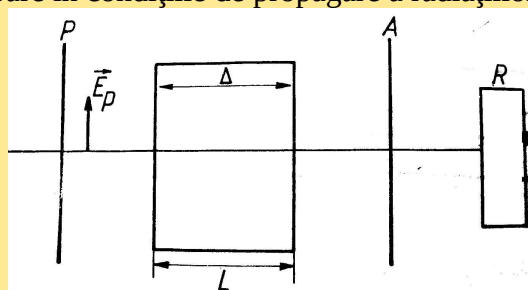


Fig. 1

Eliminând lama de cuarț din drumul fasciculului, se rotește analizorul

în jurul direcției de propagare până când receptorul indică flux de valoare zero. În această situație direcțiile de transmisie ale polarizorului P și analizorului A formează un unghi de 90^0 (sunt orientate în cruce). La introducerea lamei de cuarț în calea fasciculului, astfel încât propagarea să aibă loc în lungul axei optice, se constată că receptorul indică flux diferit de zero. Se constată totodată că prin rotirea analizorului în jurul direcției de propagare, se găsește o orientare a direcției lui de transmisie pentru care receptorul indică din nou flux de valoare zero. Din cele arătate rezultă că în cazul cuarțului cristalin, starea de polarizare se conservă, dar planul de polarizare a unei liniiare polarizate este rotit cu un anumit unghi. Unghiul de rotire α al planului de polarizare a radiației la trecerea ei prin substanță este egal tocmai cu unghiul cu care este rotit analizorul (în sensul de rotire a planului de polarizare) între cele două poziții pentru care receptorul indică flux de valoare egală cu zero. Fenomenul de rotire a planului de polarizare a fost descoperit de către Arago în anul 1811. Ulterior au fost descoperite și alte substanțe care prezintă proprietatea naturală de a roti planul de polarizare. Experimentele efectuate cu eșantioane de diferite grosimi au arătat că unghiul de rotire a planului de polarizare poate fi exprimat prin formula:

$$(2) \quad \alpha = [\alpha] L$$

unde L este grosimea stratului de substanță, iar $[\alpha]$ este o mărime caracteristică substanței și se numește rotație specifică. În conformitate cu (2), rotația specifică este o mărime numeric egală cu unghiul de rotire a planului de polarizare exprimat în grade produs de un strat de substanță de grosime egală cu unitatea.

Substanțele care rotesc planul de polarizare se numesc substanțe optic active. Există substanțe optic active pozitive cu $[\alpha] > 0$ numite și dextrogire și substanțe optic active negative cu $[\alpha] < 0$ numite și levogire. Pentru substanțele solide $[\alpha]$ se exprimă de regulă în

grade/mm.

În anul 1815 J.B. Biot a arătat că și soluțiile lichide ale unor substanțe solvite în solvenți optic inactivi sunt optic active. El a stabilit experimental că, în cazul soluțiilor, unghiul de rotire a planului de polarizare poate fi exprimat prin formula:

$$(3) \quad \alpha = [\alpha_c] \cdot cL$$

cunoscută sub denumirea de legea lui Biot. În (3) c este concentrația soluției, iar $[\alpha]$ este o mărime caracteristică substanței și se numește putere de rotație specifică. Convențional $[\alpha]$ se exprimă în grade pentru un strat de soluție cu grosimea de 1dm și concentrație de 1g/cm³. În aceste condiții $[\alpha]$ este definită ca fiind o mărime numeric egală cu unghiul de rotire a planului de polarizare al unei radiații monocromatice exprimat în grade produs de un strat de soluție cu grosimea de un decimetru și concentrația de un gram pe centimetru cub.

Pentru amestecuri de N substanțe optic active dizolvate într-un solvent optic inactiv, unghiul de rotire a planului de polarizare este aditiv, adică poate fi exprimat prin formula:

$$(4) \quad \alpha = \sum_{i=1}^N [\alpha_{ci}] c_i L.$$

Formulele (3) și (4) pot fi folosite pentru determinarea concentrației unor substanțe în soluții pentru care se măsoară experimental unghiul de rotire α . Aparatele cu care se măsoară unghiul de rotire a planului de polarizare se numesc polarimetre. Pentru o substanță optic activă dată mărimea $[\alpha]$ depinde și de lungimea de undă a radiației. Dependența unghiului de rotire α (3) de lungimea de undă λ este cunoscută sub denumirea de polarizare rotatorie. Deoarece $[\alpha]$ depinde și de lungimea de undă a radiațiilor, măsurătorile se efectuează de regulă cu radiația monocromatică emisă de o lampă spectrală cu vapori de sodiu ($\lambda_D=5893\text{\AA}$).

D. Întrebări și teme de control

1. **Ce se înțelege prin lumină liniar (plan) polarizată ?**
2. **În ce constă fenomenul de rotire naturală a planului de**

polarizare și cum poate fi pus în evidență acest fenomen ?

3. Care sunt elementele componente principale ale unui polarimetru și ce rol are fiecare dintre acestea ?
4. Definiți mărimile $[\alpha]$ (2) și $[\alpha_c]$ (3) și precizați care sunt unitățile de măsură convenționale ale acestor mărimi ?
5. Cum se explică faptul că mărimea $[\alpha_c]$ nu depinde de concentrația soluției și nici de lungimea tubului polarimetric ?
6. Cum este construită și ce rol are Lama Laurent ?
7. Demonstrați relația (12) și explicați figura 2.
8. Descrieți modul de lucru pentru determinarea unghiului α .

Unele polarimetre sunt construite astfel încât în calitate de receptor de radiații R (Fig. 1) să fie folosit ochiul uman. În acest caz se folosește proprietatea ochiului de a aprecia cu mare precizie egalitatea de iluminare a unor suprafețe adiacente iluminate cu radiații de aceeași compoziție spectrală. Un astfel de polarimetru este polarimetrul Laurent în care între polarizorul P și analizorul A se introduce o lamă jumătate de lungime de undă numită și lamă Laurent. Aceasta este o lamă anizotropă de cuarț cu axa optică paralelă cu fețele lamei și are o astfel de grosime încât introduce între cele două unde generate în ea prin fenomenul de dublă refracție o diferență de drum egală cu un multiplu impar de $\lambda_0/2$:

$$(5) \quad \delta = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2} \quad m=0, 1, 2, \dots$$

în care λ_0 este lungimea de undă a radiației în vid. Diferenței de drum (5) îi corespunde o diferență de fază:

$$(6) \quad \Delta\psi = (2m + 1)\pi .$$

Planul determinat de axa optică a lamei anizotrope și normala la suprafața ei se numește planul secțiunii principale a lamei.

O lamă Laurent de formă dreptunghiulară se află montată imediat după polarizor astfel încât ocupă doar porțiunea centrală a fasciculului de raze paralele. La intrarea în lama anizotropă (Fig. 2),

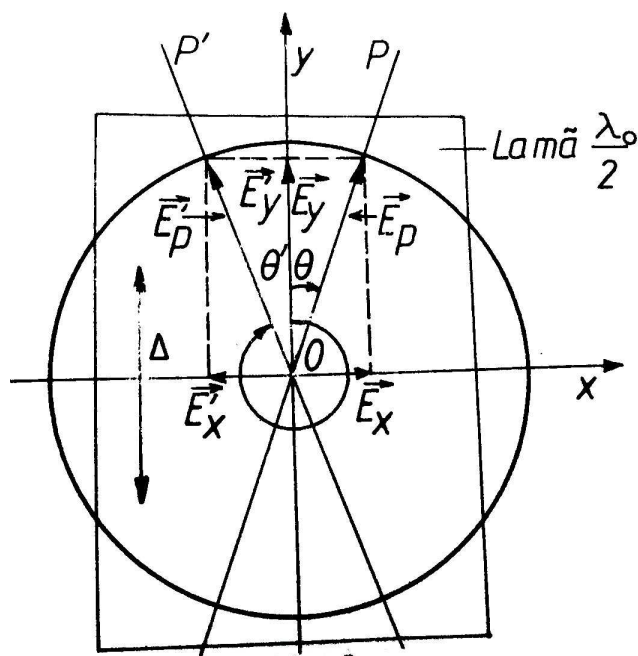


Fig. 2

intensitatea câmpului electric $\overline{E_p}$ din unda liniar polarizată se descompune în două componente: $\overline{E_x}$ pe direcția ox perpendiculară la axa optică a lamei (unda ordinară) și $\overline{E_y}$ pe direcția oy paralelă cu axa optică a lamei (unda extraordinară). Notând cu θ unghiul dintre direcția de acțiune a intensității câmpului electric în unda liniar polarizată, incidentă pe lamă, și planul secțiunii principale a lamei (azimutul undei liniar polarizate) putem scrie relațiile:

$$(7) \quad E_x = E_p \sin \theta = E_p \sin \theta \cos(\omega t + \varphi)$$

$$E_y = E_p \cos \theta = E_p \cos \theta \cos(\omega t + \varphi)$$

$$(8) \quad \overline{E_p} = E_x \vec{i} + E_y \vec{j} = E_p (\vec{i} \sin \theta + \vec{j} \cos \theta) \cos(\omega t + \varphi)$$

$$(9) \quad \tan \theta = \frac{E_x}{E_y}$$

unde \vec{i} și \vec{j} sunt versorii axelor de coordonate ox și oy.

Deoarece lama jumătate de lungime de undă introduce între cele două componente diferența de fază (6), la ieșirea din lamă cele

două componente și câmpul electric rezultat pot fi exprimate prin relațiile:

$$(10) \quad \begin{aligned} E'_x &= E_p \sin \theta \cos[(\omega t + \varphi) + (2m+1)\pi] = \\ &= -E_p \sin \theta \cos(\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

$$(11) \quad \begin{aligned} E'_y &= E_p \cos \theta \cos(\omega t + \varphi) \\ \vec{E}'_p &= E'_x \vec{i} + E'_y \vec{j} = E_p (-\vec{i} \sin \theta + \vec{j} \cos \theta) \cos(\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

$$(12) \quad \tan \theta' = \frac{E'_x}{E'_y} = -\tan \theta \rightarrow \theta' = 2\pi - \theta$$

Relațiile (10), (11) și (12) (și Fig. 2) arată că după trecerea prin lama semiundă, unda electromagnetică rămâne liniar polarizată dar direcția de acțiune a intensității câmpului electric \vec{E}'_p este rotită față de planul secțiunii principale a lamei, într-o direcție simetrică cu direcția de acțiune a intensității câmpului electric \vec{E}_p din unda liniar polarizată incidentă (12). Fasciculul care trece prin porțiunile laterale neacoperite de lama semiundă, își păstrează direcția de acțiune a intensității câmpului electric \vec{E}_p . În aceste condiții, dacă analizorul este rotit astfel încât direcția lui de transmisie este perpendiculară la planul secțiunii principale a lamei semiundă (adică perpendiculară la planul bisector al unghiului dintre cele două direcții de vibrație OP și OP') atunci porțiunile corespunzătoare celor două fascicule vor avea aceeași iluminare deoarece componentele intensității câmpurilor electrice care trec prin analizor sunt egale ($|E'_x| = E_x$) și deci densitățile de flux corespunzătoare sunt egale ($\varphi'_x = \varphi_x$). Egalitatea de iluminare a porțiunii centrale și a porțiunilor laterale ale câmpului vizual se stabilește urmărind cu ochiul obținerea iluminării uniforme a câmpului în timp ce rotim analizorul. Poziția analizorului corespunzătoare egalității de iluminare poate fi reprodusă foarte exact deoarece la cea mai mică rotire a analizorului iluminările celor două plaje (centrală și laterală) se modifică sensibil. Pentru ca precizia de stabilire a egalității de iluminare a celor două plaje să fie cât mai mare lama Laurent este montată de către constructor astfel încât unghiul θ să fie suficient de mic (cuprins aproximativ între 1° și 5°) astfel încât iluminarea corespunzătoare celor două plaje să fie apropiată de

valoarea minimă perceptibilă cu ochiul. Poziția analizorului pentru care cele două plaje au iluminări slabe dar egale se numește poziția de penumbră. După cum rezultă din figura 2, la rotirea analizorului cu 360° vom găsi două poziții de penumbră (de iluminare mică și sensibilitate mare) când direcția de transmisie a analizorului este ortogonală la planul secțiunii principale a lamei și două poziții de iluminări egale de valoare mare când direcția de transmisie a analizorului este paralelă cu planul secțiunii principale a lamei Laurent. Pozițiile de iluminare mare nu se folosesc la măsurători deoarece sensibilitatea de măsurare în aceste poziții este mică.

Dacă direcția de transmisie a analizorului este orientată în una din pozițiile de penumbră iar în drumul fasciculului de raze paralele, între polarizor și analizor, se introduce o substanță optic activă, atunci substanța rotește planele de vibrație OP și OP' (Fig. 2) în același sens cu un unghi α iar cele două plaje devin inegal iluminate deoarece iluminarea uneia crește iar a celeilalte scade. Pentru a realiza din nou egalitatea de iluminare a celor două plaje, trebuie să rotim analizorul cu același unghi α și în același sens astfel încât direcția lui de transmisie să fie ortogonală pe bisectoarea unghiului dintre noile direcții de acțiune a intensității câmpului electric.

Sensul corect de rotire a analizorului se stabilește de către experimentator astfel încât variațiile de iluminare ale celor două plaje să fie compensate (ex. când prin introducerea substanței, iluminarea plajei centrale scade, analizorul se rotește în sensul în care iluminarea acestuia crește și invers).

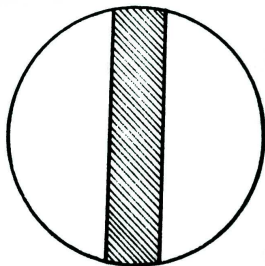
E. Modul de lucru

În această lucrare se va determina puterea rotatorie specifică $[\alpha]$ a zahărului în baza formulei (3). În acest scop se cântărește precis o cantitate de 2 grame zahăr care se dizolvă cu apă distilată într-un cilindru gradat astfel încât volumul total de soluție să fie de 50 cm^3 . Se amestecă bine cu o baghetă și obținem astfel o soluție omogenă de zahăr cu concentrația de $0,04 \text{ g/cm}^3$. Din această soluție se vor prepara apoi, prin diluție cu apă distilată, soluții cu concentrațiile $0,02 \text{ g/cm}^3$ și $0,01 \text{ g/cm}^3$. Soluția de studiat se introduce într-un

tub cilindric care se închide la capete cu două plăcuțe de sticlă plan paralele. Pentru aceasta tubul se așază vertical, se scoate montura și plăcuța de sus și se umple complet în așa fel încât după fixarea plăcuței să nu rămână bule de aer. Se șterg bine geamurile tubului cu tifon uscat.

Se studiază sistemul de citire a unghiului de rotire a analizorului pentru a stabili precizia de măsurare a unghiurilor (se va găsi că aparatul permite citirea unghiurilor cu precizia de $0,05^0$), apoi se pune în funcțiune lampa cu vapori de sodiu a polarimetrului și se așteaptă 2-3 minute până când lampa intră în regim normal de funcționare.

Pentru a vedea clar limita de separație a celor două plaje (Fig. 3) luneta de observare trebuie pusă la punct pe suprafața lamei jumătate de lungime de undă prin rotirea rozetei ocularului în jurul axei optice a aparatului.



Privind în lunetă se reglează analizorul în poziția de penumbră (în care cele două regiuni au iluminări egale și mici). Se citește unghiul corespunzător poziției inițiale a analizorului pe vernierul din stânga (α_i^s) și pe cel din dreapta (α_i^d) utilizând cele două lupe din fața discului gradat.

Se face media aritmetică a celor două unghiuri și se găsește unghiul $\overline{\alpha_i}$ care stabilește poziția inițială a analizorului:

$$(13) \quad \overline{\alpha_i} = \frac{\alpha_i^s + \alpha_i^d}{2}.$$

După aceasta se introduce tubul cu soluția de studiat între polarizor și analizor. Se reglează din nou poziția ocularului lunetei pentru a vedea clar limita de separație a plajelor. Datorită rotirii planului de polarizare a celor două fascicule de către soluția de zahăr, câmpul nu mai apare uniform iluminat. Rotind analizorul cu un unghi egal cu cel cu care a fost rotit planul de polarizare, se ajunge din nou la o

iluminare uniformă a celor două câmpuri (în poziția de penumbră). Se citesc din nou valorile unghiurilor pe discul gradat pe vernierul din stânga (α^s) și pe cel din dreapta (α^d). Se calculează valoarea medie a unghiului care determină poziția finală a analizorului:

$$(14) \quad \bar{\alpha} = \frac{\alpha^s + \alpha^d}{2}.$$

Unghiul de rotire a planului de polarizare se calculează cu relația:

$$\alpha = \bar{\alpha} - \bar{\alpha}_i.$$

Se repetă măsurătorile de 5-6 ori pentru aceeași soluție și se trec rezultatele în tabel. Conform celor precizate anterior se vor exprima unghiurile în grade și sutimi de grad, lungimea L a tubului în dm iar concentrația C a soluției în g/cm^3 .

Cunoscând unghiurile de rotire α și lungimea L a tubului utilizat (înscrisă pe tub) se calculează puterea rotatorie specifică $[\alpha]$ a zahărului utilizând formula (3). Din datele obținute se calculează valoarea medie $[\alpha]_{\text{mediu}}$.

F. Tabel cu date experimentale

Nr. det.	α_i^s	α_i^d	$\bar{\alpha}_i$	α^s	α^d	$\alpha = \bar{\alpha} - \bar{\alpha}_i$	L(dm)	C (g/cm^3)
1.								
2.								
3.								
.								
.								
.								

Pentru a verifica faptul că $[\alpha]$ nu depinde de concentrația soluției nici de lungimea L a tubului, se repetă măsurătorile pentru alte valori ale concentrației și lungimii tubului.

Cunoscând valoarea $[\alpha]$ pentru zahăr și determinând unghiul de rotire α pentru o soluție de zahăr, de concentrație necunoscută se va determina concentrația C a soluției de zahăr utilizând formula (3). Pentru ca rezultatele măsurătorilor să fie precise se folosesc soluții nu prea concentrate (sau tuburi nu prea lungi) deoarece în caz contrar

apare o difuzie puternică a radiațiilor iar limita de separație a celor două plaje devine neclară.

G. Întrebări și teme de control

9. Ce se înțelege prin lumină liniar (plan) polarizată ?

10. În ce constă fenomenul de rotire naturală a planului de polarizare și cum poate fi pus în evidență acest fenomen ?
11. Care sunt elementele componente principale ale unui polarimetru și ce rol are fiecare dintre acestea ?
12. Definiți mărimile $[\alpha]$ (2) și $[\alpha_c]$ (3) și precizați care sunt unitățile de măsură convenționale ale acestor mărimi ?
13. Cum se explică faptul că mărimea $[\alpha_c]$ nu depinde de concentrația soluției și nici de lungimea tubului polarimetric ?
14. Cum este construită și ce rol are Lama Laurent ?
15. Demonstrați relația (12) și explicați figura 2.
16. Descrieți modul de lucru pentru determinarea unghiului α .