

Studiul efectului Doppler optic folosind interferometrul Michelson

1. Scopul lucrării

Obiectivele principale ale lucrării constau în determinarea lungimii de undă și a frecvenței laser, precum și a variației de frecvență produse prin efect Doppler optic longitudinal obținut prin reflexia unui fascicul laser pe o oglindă mobilă a interferometrului Michelson.

2. Teoria lucrării

2.1 Noțiuni de bază

Interferența reprezintă fenomenul de compunere a două sau mai multe unde coerente într-un anumit domeniu spațial, rezultând o distribuție spațială caracteristică de intensitate luminoasă cu zone de maxim și minim de intensitate luminoasă numite franje de interferență (Fig. 1). Pentru interferență staționară, condiția de coerență a undelor implică egalitatea frecvențelor undelor și constanța în timp a diferenței de fază a undelor.

Fenomenul de bătăi este rezultatul suprapunerii a două oscilații armonice paralele, cu amplitudini egale și frecvențe puțin diferite ($\nu_2 \cong \nu_1$). Oscilația rezultantă are frecvența egală cu media frecvențelor oscilațiilor componente, $\bar{\nu} = \frac{\nu_1 + \nu_2}{2}$, anvelopa amplitudinii variind periodic lent în timp cu o frecvență numită frecvența bătăilor ce este egală cu diferența frecvențelor componente, $\nu_b = \nu_1 - \nu_2$ (Fig. 2).

Efectul Doppler relativist (sau optic) reprezintă fenomenul de modificare a frecvenței unei luminoase recepționate ν^r față de frecvența unei emise de sursa de lumină ν datorită deplasării relative sursă- receptor. În cazul îndepărtării sursei de lumină față de receptor cu viteza v , pe direcția ce unește sursa și receptorul (efect Doppler longitudinal), frecvența recepționată este mai mică decât frecvența emisă:

$$\nu^r = \nu \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}} \quad (1)$$

unde $\beta = v/c$, c fiind viteza luminii în vid.

2.2 Principiul metodei interferențiale

Interferometria este o metodă optică extrem de precisă pentru determinarea variațiilor de lungime, a densității mediilor transparente, a indicilor de refracție și a lungimilor de undă. Interferometrul este dispozitivul optic ce permite determinarea acestor mărimi fizice cu ajutorul fenomenului de interferență. Principiul de funcționare al interferometrului Michelson este prezentat în cele ce urmează. Un fascicul laser este divizat în două fascicule secundare cu ajutorul unei lame semitransparente (divizor de fascicul 50:50- DF) poziționate la 45° față de fasciculul laser incident, rezultând două fascicule secundare cu intensități aproximativ egale (Fig. 3). Aceste două fascicule parțiale de lumină se propagă pe drumuri diferite, perpendiculare între ele, fiind redirectionate prin reflexie unul către celălalt cu ajutorul a două oglinzi plane (O1 și O2) ce formează imaginile virtuale (S1 și S2) ale sursei laser S. Fasciculele provenite de la cele două surse virtuale S1 și S2 se suprapun pe un ecran translucid (ET). Pe ecranul ET se formează tabloul de interferență, adică o imagine cu zone de maxim și minim de intensitate luminoasă numite franje de interferență. Datorită geometriei de iradiere, franjele de interferență de pe ecran sunt circulare (Fig. 1). Dacă drumul optic (egal cu drumul său geometric în aer) al unuia dintre aceste două fascicule parțiale se modifică, se produce o diferență de fază a celor două unde luminoase ce conduce la o modificare/ deplasare a tabloului de interferență. Așadar, analizând deplasarea tabloului de interferență se poate determina variația drumului optic al fasciculului perturbat.

Dacă oglinda O2 a interferometrului se deplasează pe distanța Δz (Fig. 3), aceasta duce la o deplasare $2\Delta z$ a sursei virtuale S2 și, respectiv, o variație $2\Delta z$ a drumului optic al fasciculului parțial provenit de la sursa virtuală S2. Această diferență de drum optic între cele două unde luminoase parțiale provenite de la sursa virtuală mobilă S2 și sursa fixă S1, duce la o deplasare cu N franje a tabloului de interferență:

$$2\Delta z = N\lambda \quad (2)$$

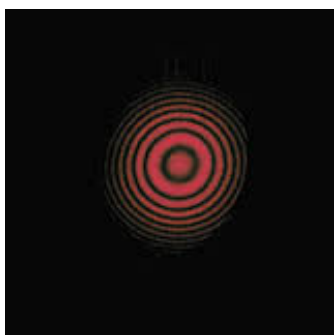


Fig. 1

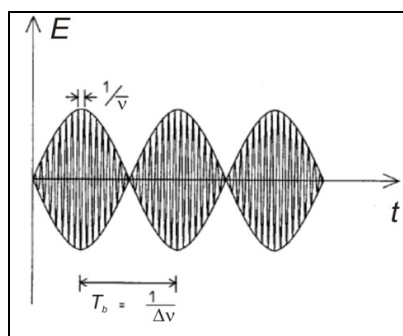


Fig. 2

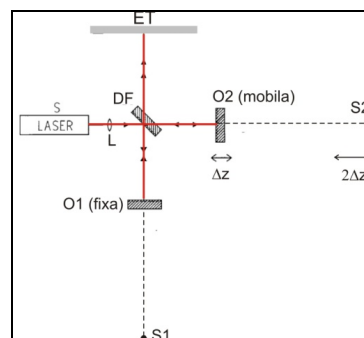


Fig. 3

Pe de altă parte, deplasarea uniformă cu viteza v a oglinzii mobile O2 este echivalentă cu deplasarea uniformă cu viteza $v_s=2v$ a sursei virtuale de lumină S2. Aceasta determină modificarea frecvenței unei electromagnetice provenite de la această sursă S2 prin efect Doppler optic longitudinal. Astfel, prin compunerea oscilațiilor paralele ale vectorilor intensitate câmp electric \vec{E} asociați celor două unde parțiale ce au frecvențe puțin diferite, rezultă fenomenul de bătăi (Fig. 2). Amplitudinea unde rezultante și a intensității unde, care este proporțională cu pătratul amplitudinii unde, variază periodic în timp în fiecare punct de pe ecran, efectul vizual fiind de deplasare a franjelor de interferență. Perioada bătăilor reprezintă intervalul de timp în care apar două maxime sau două minime succesive ale intensității luminoase într-un punct de pe ecran și se poate determina, așadar, împărțind timpul de măsurare $\Delta t \left(= \frac{\Delta z}{v} \right)$ la numărul de franje N' cu care se deplasează tabloul de interferență în acest interval de timp:

$$T_b = \frac{\Delta t}{N'} = \frac{\Delta z}{vN'} \quad (3)$$

Studiul teoretic al fenomenului de bătăi arată faptul că perioada bătăilor este invers proporțională cu diferența $\Delta v = v - v'$ a frecvențelor celor două unde parțiale:

$$T_b = \frac{1}{\Delta v} \quad (4)$$

De asemenea, studiul teoretic al fenomenului Doppler optic (relativist) arată faptul că variația relativă a frecvenței, $\frac{\Delta v}{v}$, prin efect Doppler longitudinal este dată de relația corespunzătoare efectului Doppler acustic dacă viteza sursei S2 este mică comparativ cu c :

$$\frac{\Delta v}{v} \cong \beta = \frac{v_s}{c} . \quad (5)$$

Astfel, ținând cont de relațiile (4) și (5), expresia perioadei bătăilor devine:

$$T_b = \frac{c}{2v\Delta v} = \frac{\lambda}{2v} \quad (6)$$

Egalând expresiile perioadei bătăilor T_b din relațiile (3) și (6) se obține o relație identică cu (2) dacă $N=N'$. Aceasta înseamnă că fenomenul de bătăi produs datorită efectului Doppler și variația drumului optic al fasciculului reflectat pe oglinda mobilă produc o deplasare cu același număr N de franje. Așadar, variația de frecvență $\Delta v = v - v'$ produsă prin efect Doppler optic longitudinal se poate determina în două moduri:

- direct, prin măsurare numărului N de franje cu care se deplasează tabloul de interferență în timpul Δt :

$$\Delta v = \frac{N}{\Delta t}; \quad (7)$$

- indirect, prin determinarea vitezei oglinzii mobile O2:

$$\Delta v = \frac{2v}{\lambda}. \quad (8)$$

3. Dispozitivul experimental

Dispozitivul experimental este prezentat în figura 4. Întregul ansamblu optic al interferometrului Michelson este fixat cu suporturi magnetici pe o placă de bază metalică (PB) izolată împotriva șocurilor mecanice prin picioare de cauciuc. Componentele optice și mecanice ale interferometrului Michelson sunt următoarele:

- laser cu He-Ne (putere 1mW, lungime de ~20 cm) alimentat de la sursa de înaltă tensiune ST- "Laser Power Supply/ Timer". Pentru pornirea emisiei laser, cheia de pornire din spatele sursei de tensiune se rotește în poziția "Laser on". Obturatorul mecanic OB al fasciculului laser va fi coborât prin apăsarea tastei "Start/Reset" (obturatorul poate fi ridicat din nou prin apăsarea tastei "Stop") din zona CO- "Shutter control" de pe panoul frontal al sursei laser.
- oglinzi plane O3 și O4 pentru controlul drumului fasciculului laser He-Ne până la divizorul de fascicul (DF) al interferometrului, asigurând incidența normală a fasciculului laser pe oglinzile O1 și O2. Reglajul fin al direcției fasciculelor reflectate de către fiecare oglindă se poate face prin rotirea șuruburilor de reglaj din spatele fiecărei oglinzi.
- oglinzi plane O1 și O2 ale interferometrului, prevăzute cu câte două șuruburi de reglaj ce pot controla direcția fasciculului reflectat în plan vertical și orizontal. Divizorul de fascicul 50:50 este orientat la 45° față de fasciculul laser incident. Fasciculele parțiale rezultate prin divizarea cu DF sunt perpendiculare pe O1 și O2. Lentila convergentă L, cu distanța focală de 20 mm, se fixează în fascicul după ce se obține suprapunerea celor două fascicule parțiale pe ecranul ET.
- ecranul alb translucid ET pe care se obțin franjele de interferență circulare poate fi înlocuit cu o fotodiodă FD prevăzută cu o fantă liniară îngustă ce trebuie fixată în apropierea zonei centrale a tabloului de interferență (dar nu în punctul central luminos sau întunecos). Semnalul electric produs de fotodiodă este amplificat de 100 ori (butonul amplificatorului pe poziția 100x) înainte de a fi analizat pe ecranul unui osciloscop.

- motor care pune în mișcare oglinda O2 a interferometrului prin intermediul unei curele de transmisie, a unui șurub micrometric și a unei pârghii (levier). Motorul este alimentat de la o sursă de tensiune continuă- ”DC- Constanter”, tensiunea aplicată fiind în intervalul 1,7-2,3 V. Pentru aceasta, butonul ”V” de reglare a tensiunii de pe panoul frontal al sursei motorului se fixează în apropierea diviziunii de 2 V iar butonul ”I” de limitare a intensității curentului la maximum 0,6 A. Mișcarea de rotație a axului motor este transmisă unui șurub micrometric printr-o curea de transmisie trecută peste un discripete (de culoare neagră) cu 50 fante periferice echidistante. Rotația discului cu fante (și a șurubului micrometric atașat) este monitorizată de către o barieră optică, 50 de impulsuri ale numărătorului barierei însemnând o rotație completă a scripetelui și o deplasare pe distanța de 0,5 mm a capului șurubului micrometric atașat. Capul șurubului apasă pe o pârghie (levier) cu raportul brațelor de aproximativ 20:1, inducând o translație pe distanța de 0,02684 mm a oglinzii O2 la o rotație completă a discului cu fante.
- osciloscop cu două canale (CH1 si CH2) ce permite vizualizarea simultană pe ecran a celor semnale electrice provenite de la bariera optică si fotiododa FD. Semnalul barierei optice este sub forma unor pulsuri rectangulare, trecerea unei fante prin fața detectorului barierei optice producând un maxim al semnalului.

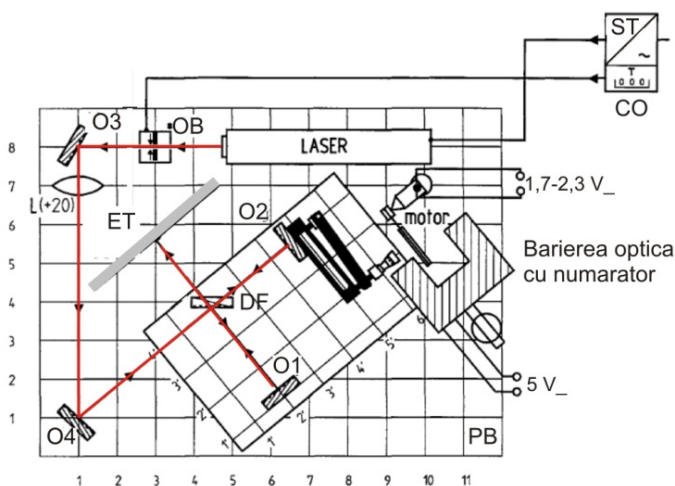


Fig. 4

Observații

1. Nu atingeți suprafețele reflectoare ale oglinzilor/ DF și nici cureaua de transmisie a motorului! Tensiunea aplicată motorului trebuie să aibă polaritatea care asigură deplasarea șurubului micrometric într-un interval maximum de 5 mm, de la diviziunea 5 mm către

diviziunea 10 mm. Aceasta asigură îndepărtarea oglinzii O2 și a sursei virtuale S2 față de DF și ET. După atingerea diviziunii 10 mm, se oprește alimentarea motorului și șurubul micrometric este rotit manual astfel încât să ajungă înapoi la diviziunea 5 mm.

2. Dacă este necesară realinierea fasciculelor parțiale pentru a obține imaginea de interferență, trebuie parcurși următorii pași: se scoate lentila L din suport; se reglează, după nevoie, oglinzile O4, O1 sau O2 până când cele două fascicule laser parțiale suprapuse pe ecranul ET formează un spot care sclipește; se reintroduce lentile L și, dacă este nevoie, se reglează foarte puțin una dintre oglinzile O1 și O2 pentru a obține inelele de interferență pe ET sau pe ecranul negru al fantei fotodiodei FD.

4. Modul de lucru

Folosind, la nevoie, șuruburile de reglaj fin ale oglinzilor O1, O2 și O4 se obțin franje de interferență circulare pe ecranul translucid ET. Se stabilește o viteză constantă de deplasare a oglinzii mobile O2 a interferometrului Michelson prin fixarea unei anumite tensiuni continue de alimentare a motorului. Pentru o tensiune fixată, se face un set de 10 măsurători asupra mărimilor Δt , N și Z , după cum urmează:

- a) șurubul micrometric se poziționează la diviziunea 5 mm, rotind manual discul de aluminiu (de culoare alb-metalică) atașat șurubului;
- b) se stabilește o tensiune de alimentare a motorului de antrenare a șurubului micrometric în intervalul 1,7-2,3 V (butonul "V" al sursei de alimentare a motorului se fixează puțin peste diviziunea de 2V) iar butonul "I" de limitare a curentului la o valoare de până la 0.6A. Se observă deplasarea tabloului de interferență de pe ecranul ET sau de pe ecranul negru al fantei fotodiodei FD și schimbarea periodică a intensității luminoase în centrul imaginii de interferență datorită deplasării uniforme a oglinzii O2 a interferometrului.
- c) se oprește motorul fixând curentul de limitare la 0A și se resetează numărătorul barierei optice apăsând tasta "Set" a barierei;
- d) se setează osciloscopul astfel: scara de timp la 2s/DIV, scara de tensiune pe CH1 și CH2 la 10-20 V/div. Se pornește înregistrarea semnalelor apăsând tasta START a osciloscopului.
- e) apăsând tasta "Start/ Reset" de pe panoul frontal al sursei laser se coboară obturatorul OB al fasciculului laser și se pornește cronometrul digital T. Odată cu începerea cronometrării (care pornește cu o întârziere de aproximativ 3 s din momentul apăsării tastei "Start/ Reset") se pornește motorul fixând un curent de limitare de până la 0,6 A și se verifică începerea funcționării numărătorului barierei optice (dacă numărătorul nu pornește, se re-poziționează furca barierei, aliniindu-se pe direcția fantelor circulare din discul cu fante și se re-pozește măsurătoarea).

- f) înregistrarea osciloscopului se oprește apăsând tasta STOP după ce semnalele cu maxime și minime ocupă întregul ecran al osciloscopului. De asemenea, se oprește motorul fixând curentul de limitare la 0A. Se stabilește pe ecranul osciloscopului numărul Z de maxime ale semnalului barierei optice (adică numărul de fante) și numărul N de maxime ale fotodiodei (adică numărul total de franje cu care s-a deplasat tabloul de interferență) care apar pentru un interval de timp $\Delta t = 20s$.
- g) se repetă de 10 ori aceste măsurători;
- h) se face, în același mod, un al doilea set de 10 măsurători pentru o viteză de deplasare mai mare a oglinzii O2, fixând o tensiune de alimentare a motorului mai mare.
- i) la finalul măsurătorilor, se oprește motorul, sursa laser, amplificatorul fotodiodei și osciloscopul.

5. Prelucrarea datelor experimentale

Datele experimentale referitoare la mărimile Δz , N și Z , notate în tabele separate pentru fiecare din cele două seturi de măsurători corespunzătoare la viteze diferite ale oglinzii O2, se prelucrează după cum urmează:

- se calculează deplasarea Δz a oglinzii O2 cunoscând numărul mediu Z de fante numărate de bariera optică și faptul că 50 impulsuri ale numărătorului înseamnă o deplasare de 0,02684 mm a oglinzii O2. Pentru fiecare din cele două seturi de măsurători, se calculează valorile medii și abaterile standard ale mediilor pentru Δz și N . Apoi se calculează valoarea medie a lungimii de undă laser (cu relația (2)) și abaterea standard a mediei folosind metoda propagării erorilor. De asemenea, se calculează frecvența laser. Se compară acest rezultat cu cel cunoscut din literatura de specialitate pentru laserul cu He-Ne.
- folosind relația (7) se determină deplasarea de frecvență Doppler pentru fiecare din cele două seturi de măsurători. Se compară deplasările de frecvență obținute în cele două seturi de măsurători.
- cunoscând valoarea medie Δz și timpul Δt se determină viteza de deplasare a oglinzii O2 pentru fiecare set de date. Folosind valoarea lungimii de undă laser He-Ne din literatura de specialitate, se determină deplasarea de frecvență Doppler folosind relația (8). Se compară acest rezultat cu cel obținut prin folosirea relației (7).