

**UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN BUCUREȘTI
DEPARTAMENTUL DE FIZICĂ**

**LABORATORUL DE OPTICĂ
BN - 120 B**

**INTERFERENȚA ȘI POLARIZAREA UNDELOR
ELECTROMAGNETICE**

2004 - 2005

INTERFERENȚA ȘI POLARIZAREA UNDELOR ELECTROMAGNETICE

1. Scopul lucrării

Această lucrare de laborator are ca scop 1) determinarea **lungimii de undă**, respectiv a **frecvenței** undelor electromagnetice utilizate, pornind de la studiul **interferenței** acestora; 2) **analiza calitativă a stării de polarizare a undelor electromagnetice**.

2. Teoria lucrării

2.1. Noțiuni generale despre undele electromagnetice

Prin undă se înțelege propagarea în spațiu a unei perturbații. O altă definiție, echivalentă [1], spune că unda este mulțimea valorilor unei mărimi fizice caracteristice perturbației în propagare, într-un domeniu dat. Dacă perturbația este de natură electromagnetică (suprapunere de câmpuri electrice și magnetice variabile), undele sunt electromagnetice.

Din punct de vedere matematic, undele se reprezintă prin funcții care depind de timp și de coordonatele spațiale. O undă electromagnetică poate fi descrisă prin vectorii de câmp corespunzători \vec{E} (intensitate câmp electric) sau \vec{B} (inducție magnetică).

Maxwell a arătat că undele electromagnetice în vid sunt unde transversale, în care vectorii câmpurilor electric și magnetic sunt reciproc perpendiculari și perpendiculari pe direcția de propagare. Alegând arbitrar ca direcția lui \vec{E} să fie după Oz, iar direcția lui \vec{B} după Oy, direcția de propagare a undei va fi Ox, iar funcțiile de undă vor fi funcții de undă armonice plane, de forma

$$\vec{E} = E_m \cos(\omega t - kx) \vec{I}_z, \quad \vec{B} = B_m \cos(\omega t - kx) \vec{I}_y, \quad (1)$$

unde E_m și B_m sunt amplitudinile câmpurilor, $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$ - frecvența unghiulară, ν -

frecvența, T - perioada, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - numărul de unde, λ - lungimea de undă. Din ecuațiile lui

Maxwell rezultă că mărimile vectorilor \vec{E} și \vec{B} sunt legate prin relația

$$E = cB \quad (2)$$

unde $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ este viteza de propagare a undei în vid.

În practică nu se pot obține unde electromagnetice plane, care sunt o idealizare. Pentru o tratare riguroasă, ar trebui să se ia în considerație mișcări ondulatorii tridimensionale. Totuși, la distanțe relativ mari față de sursă și pe o distanță limitată, frontul de undă tridimensional este aproape plan, astfel încât forma de undă plană reprezintă o aproximație utilă.

Diferitele tipuri de unde electromagnetice (lumina, undele radio, razele X, razele γ , microundele și altele) diferă doar prin lungimile lor de undă și frecvențele corespunzătoare, care se leagă de viteza de propagare a undelor prin relația

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (3)$$

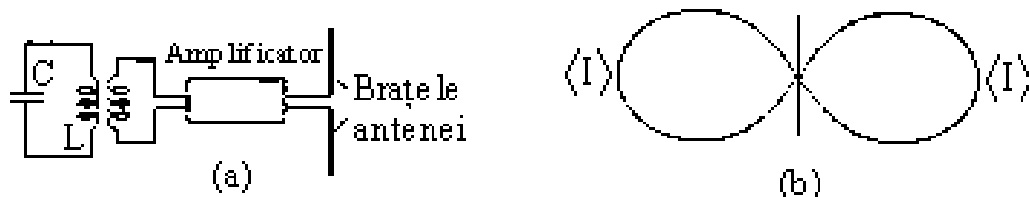


Fig. 1.

În lucrarea de față este utilizat un generator de unde ultrascurte care funcționează pe principiul că sarcinile electrice accelerate emit unde electromagnetice. În figura 1a este prezentată schema unei antene emițătoare. Aceasta este alcătuită dintr-un sistem de două bare metalice (brațele antenei) conectate la o bobină. Tensiunea electromotoare indusă în bobină de un circuit oscilant LC face ca polaritatea celor două bare metalice ale antenei să se schimbe periodic, astfel încât acestea se comportă ca un dipol oscilant, care emite radiație electromagnetică. În imediata vecinătate a antenei, câmpurile electric și magnetic sunt mai complicate decât în unda plană (1), dar la distanțe mai mari descrierea prin unde plane devine o aproximație acceptabilă. Intensitatea medie a undelor emise de antena dipol este reprezentată în figura 1b. Ea este maximă pe direcția perpendiculară pe axa dipolului și nulă pe direcția paralelă cu aceasta

Detecția undelor electromagnetice produse în modul de mai sus se face cu o antenă dipol de recepție asemănătoare cu cea emițătoare. Orientând antena de recepție paralel cu câmpul electric al undei incidente, acesta induce în ea un curent electric alternativ și, corespunzător, o tensiune care poate fi măsurată direct (valoarea sa medie) sau poate fi mai întâi redresată (folosind o diodă) și apoi măsurată.

2.2. Interferența undelor electromagnetice

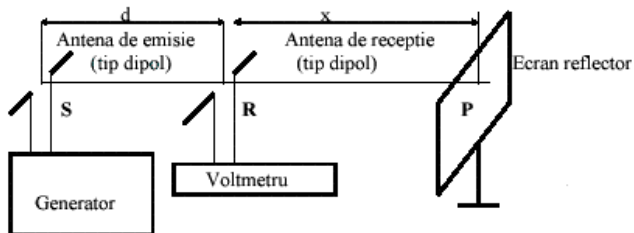


Fig. 3.

Prin interferență se înțelege fenomenul de suprapunere a două sau mai multe unde coerente. Condițiile de coerență a două sau mai multe unde sunt: 1) să aibă **aceeași frecvență** și 2) **diferența de fază să fie constantă în timp**.

În figura 3 este reprezentat schematic dispozitivul experimental utilizat pentru a studia interferența și polarizarea undelor electro-

magnetice. În antena dipol de recepție (receptorul) **R** se suprapun unda directă, provenind de la antena dipol emițătoare (sursa) **S** și unda reflectată pe un ecran metalic **P**, plasat paralel cu planul fiecărei antene. Intensitatea undei rezultate în urma interferenței este proporțională cu tensiunea indicată de un milivoltmetru conectat în circuitul lui **R**.

Intensitatea câmpului electric din unda directă și cea reflectată sunt descrise prin ecuațiile

$$E_1 = E_{m_1} \cos(\omega t - kx_1) = E_{m_1} \cos(\omega t - kd), \quad (4)$$

$$E_2 = E_{m_2} \cos(\omega t - kx_2) = E_{m_1} \cos\left[\omega t - k\left(d + 2L - \frac{\lambda}{2}\right)\right], \quad (5)$$

în care am notat cu $x_{1,2}$ distanțele parcurse de unda directă, respectiv cea reflectată de la sursă la receptor, cu d - distanța de la **S** la **R** și cu L - distanța de la **R** la **P** (atragem atenția asupra faptului că L este o mărime variabilă, depinzând de poziția panoului pe banc). Termenul $\lambda/2$ introdus în faza unei reflectate este datorat unei pierderi de fază egală cu π (echivalent cu o diferență de drum de $\lambda/2$) care se produce la reflexie.

Semnalul emis de antena dipol **S** este distribuit în tot spațiul de jur împrejurul acesteia, după o anumită lege, care depinde de proprietățile constructive ale antenei (mai precis, de **directivitatea** acesteia). Semnalul care pleacă din **S** și ajunge direct în **R** este maxim (fapt asigurat de corelarea directivității celor două antene identice care, la distanța din montajul experimental, “se văd una pe alta”).

Pe de altă parte, semnalul care pleacă din **S** și ajunge pe ecranul reflector **P** este proporțional cu unghiul solid sub care sursa “vede” panoul. Odată cu creșterea distanței dintre **R** și **P**, către panou se va întoarce o parte mai mică a frontului de undă, corespunzătoare unghiului solid mai mic sub care este panoul este văzut din **R**. Restul semnalului se va reflecta pe obiectele din jur, dând naștere (ca urmare a reflexiilor multiple suferite) unor eventuale semnale parazite. Acestea sunt detectate de **R** concomitent cu semnalul reflectat și se manifestă sub forma unor fluctuații / instabilități ale acului indicator al voltmetrului.

Amplitudinea unei rezultate prin interferență va fi dată de relația (vezi “Suprapunerea a doua unde cu aceeași frecvență” - [1], [2]) :

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta x\right), \quad (6)$$

unde diferența de drum este

$$\Delta x = x_2 - x_1 = 2L - \frac{\lambda}{2}. \quad (7)$$

Introducând (7) în (6) și efectuând calculele, obținem

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2 \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right)}. \quad (8)$$

Deoarece diferența de fază dintre cele două unde nu depinde de timp, undele directă și reflectată sunt coerente, iar suprapunerea lor este numită interferență staționară (constantă în timp).

Din relația (1) se observă că intensitatea (proporțională cu pătratul amplitudinii) unei rezultante ia valori cuprinse între o valoare maximă și una minimă, în funcție de mărimea cosinusului. Astfel, minimele intensității corespund acelor valori ale distanței dintre **R** și panoul **P** $L = L_{\min}$ pentru care

$$\cos\left(\frac{4\pi L_{\min}}{\lambda}\right) = 1 \Rightarrow L_{\min} = m \frac{\lambda}{2}, \quad (9)$$

unde $m = 1, 2, \dots$, iar maximele corespund coordonatelor $L = L_{\max}$ pentru care

$$\cos\left(\frac{4\pi L_{\max}}{\lambda}\right) = -1 \Rightarrow L_{\max} = (2m + 1) \frac{\lambda}{4}. \quad (10)$$

Din (9) și (10) se vede că distanța dintre două maxime sau două minime consecutive ale intensității unei rezultante este

$$\Delta L_{\min} = \Delta L_{\max} = \frac{\lambda}{2}. \quad (11)$$

Relația de mai sus este folosită pentru a determina lungimea de undă a radiației utilizate în experimentul de față.

2.3. Starea de polarizare a undelor electromagnetice

Undele electromagnetice emise de antena dipol sunt unde plan polarizate, în care vectorul \vec{E} oscilează permanent după o direcție (de exemplu axa Oz), în timp ce vectorul \vec{B} oscilează după direcția perpendiculară atât pe \vec{E} cât și pe direcția de propagare. Planul definit de direcția vectorului câmp electric \vec{E} și direcția vectorului de undă \vec{k} (direcția de propagare) se numește **plan de oscilație**. Planul perpendicular pe acesta (în care se afla vectorul \vec{B}) se numește **plan de polarizare** (vezi figura 4).

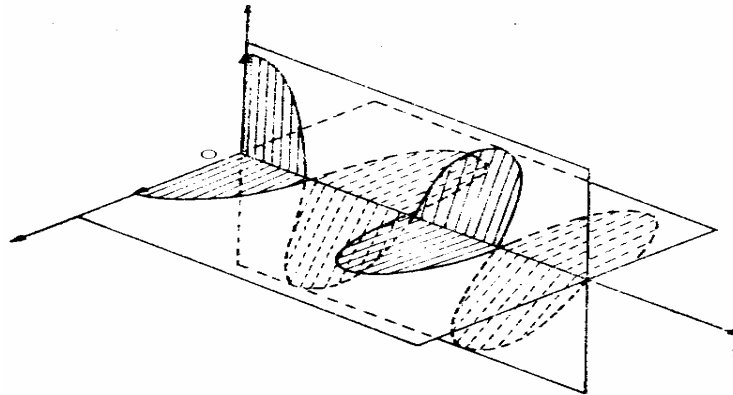


Fig. 4.

În dispozitivul experimental utilizat aici unda emisă este plan polarizată, cu planul de oscilație paralel cu axa dipolului. Cea de-a doua antenă dipol, folosită ca receptor, captează proiecția vectorului \vec{E} pe axa receptorului. Prin urmare $E_{receptionat} = E \cos \alpha$, unde E este intensitatea câmpului electric în unda emisă de S, iar α este unghiul relativ dintre axele celor două antene dipol. Răspunsul receptorului (indicația milivoltmetrului) este proporțional cu pătratul amplitudinii câmpului recepționat. Prin urmare, relația de dependență dintre răspunsul receptorului și unghiul dintre antene este de forma legii lui Malus:

$$U_{mas} = U_{max} \cos^2 \alpha, \quad (12)$$

unde U_{max} este valoarea maximă a tensiunii, corespunzătoare situației în care axele dipolilor sunt paralele, $\alpha = 0$.

De observat că variația semnalului recepționat la rotirea dipolului receptor față de cel emițător constituie o dovadă a transversalității undelor electromagnetice.

3. Descrierea instalației experimentale și a aparaturii utilizate.

Schema bloc a montajului utilizat pentru executarea acestei lucrări a fost deja prezentată în figura 2.

4. Modul de lucru

4.1. După conectarea instalației la rețeaua electrică se așteaptă circa 5 minute pentru stabilizarea funcționării generatorului.

4.2. Păstrând antenele dipol **S** și **R** paralele, se deplasează panoul reflector **P** (atenție la orientarea sa, care trebuie să fie perpendiculară pe direcția **S - R**) dinspre capătul cel mai îndepărtat de **R** către acesta. Fixarea panoului receptor, în scopul citirii tensiunii indicate de milivoltmetru, se face din **2 în 2 cm**. Distanța L dintre **P** și **R** se citește cu ajutorul riglei fixate pe bancul de lucru. Operația se repeta de 5 ori, completându-se **tabelul 1**:

| | | | | |
|--------------------------------|-------|-------|-------|--|
| $L(\text{cm})$ | | | | |
| $U(\text{mV})$ | | | | |
| Prima masuratoare | U_1 | U_2 | | |
| A doua masuratoare | U_1 | | | |
| | U_1 | | | |
| Masuratoarea a 5 ^{-a} | U_1 | U_2 | | |

4.3. Pentru verificarea legii lui Malus se plasează panoul în poziția corespunzătoare maximului cel mai apropiat de antena receptoare (valoarea maximă a tensiunii indicate de voltmetru). Se pornește din poziția în care cele două antene sunt paralele ($\alpha = 0^\circ$), apoi se rotește antena dipol receptoare spre stânga făcându-se citiri ale tensiunii pentru unghiuri din 10° în 10° , până când antenele devin perpendiculare. Se repetă operația, la dreapta. Se completează **tabelul 2**:

| $\alpha_{\text{stânga}}$ | $\cos^2 \alpha_{\text{stânga}}$ | U (mV) | α_{dreapta} | $\cos^2 \alpha_{\text{dreapta}}$ | U (mV) |
|--------------------------|---------------------------------|----------|---------------------------|----------------------------------|----------|
| | | | | | |
| | | | | | |

Observații .

1. Rotirea antenei dipol **R** se va face cu atenție, manevrându-se suportul de plexiglas pe care aceasta este fixată și nu vreunul din cele două brațe ale sale.
2. Pentru a evita fenomenele parazite care apar datorita recepției suplimentare în **R** a undei reflectate pe corpul studentului care lucrează sau pe alte suprafețe în mișcare (studenți care trec prin dreptul mesei de lucru), se va avea grija ca în momentul citirii unui anume rezultat toți ceilalți colegi să fie rugați sa adopte aceeași poziție în spațiu și, în măsura în care este posibil, să stea cât mai departe de cele două antene dipol.

5. Prelucrarea datelor experimentale

5.1. Se construiește graficul mediei tensiunilor \bar{U} în funcție de L . Măsurându-se - pe grafic - distanța dintre coordonatele a două maxime și respectiv a două minime de intensitate, se calculează lungimea de undă a undei electromagnetice emise de antena **S** (vezi relația (1.11) și, respectiv, frecvența generatorului utilizat ($v = c / \lambda$)).

Dat fiind faptul că pe grafic apar mai multe maxime / minime, se pot calcula mai multe valori pentru lungimea de undă, rezultatul final fiind media aritmetică a tuturor acestor rezultate posibile. Pentru fiecare din cele 5 grafice construite pe baza tabelului 1, se determină distanța dintre un maxim și un minim (egală cu $\lambda / 4$), distanța dintre două maxime respectiv între două minime (egală cu $\lambda / 2$). Pentru cele 15 lungimi de undă obținute se determină valoarea medie și dispersia corespunzătoare.

5.2. Se trasează curbele $U = U(\alpha_{\text{stanga}})$ și $U = U(\alpha_{\text{dreapta}})$ pe același grafic, folosindu-se culori sau simboluri diferite.

Se trasează curbele $U = U(\cos^2 \alpha_{\text{stanga}})$ și $U = U(\cos^2 \alpha_{\text{dreapta}})$. Din analiza graficelor se vor trage concluzii referitoare la verificarea legii lui Malus.

Intrebări

1. Ce sunt undele electromagnetice și cum pot fi ele obținute?
2. Verifică rezultatul obținut pentru lungimea de undă afirmația că generatorul emite unde ultrascurte? Dacă aveți în casă un aparat de radio care funcționează într-un domeniu de frecvențe apropiat de valoarea calculată în finalul acestei lucrări, încercați să identificați antena receptoare. Contează sau nu orientarea spațială a radioreceptorului în încăperea?
3. Pe graficul obținut la primul punct al lucrării se poate observa că rezultatul interferenței (contrastul dintre maxime și minime) scade odată cu creșterea lui L . Explicați acest rezultat.
4. Pe cele două grafice destinate verificării legii lui Malus sunt trasate câte două curbe distincte. Conform considerațiilor teoretice, pe ambele grafice cele două curbe ar trebui să se suprapună. Ele apar - totuși - distincte. De ce ?