



(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2019 00224

(22) Data de depozit: 08/04/2019

(41) Data publicării cererii:
27/11/2020 BOPI nr. 11/2020

(71) Solicitant:
• CENTRUL INTERNAȚIONAL DE
BIODINAMICĂ,
INTRAREA PORTOCALELOR, NR.1B,
SECTOR 6, BUCUREȘTI, B, RO

(72) Inventatori:
• GHEORGHIU EUGEN, BD.UNIRII NR.12,
BL.7 C, SC.A, AP.18, SECTOR 4,
BUCUREȘTI, B, RO;

• DAVID MIHAI SORIN,
STR. STANISLAV CIHOSCHI NR. 7, AP. 4,
SECTOR 1, BUCUREȘTI, B, RO;
• GHEORGHIU MIHAELA,
BD. UNIRII NR. 12, BL.7C, SC.A, AP.18,
SECTOR 4, BUCUREȘTI, B, RO;
• POLONSCHII CRISTINA,
ȘOS. COLENTINA NR. 16, BL. A2, ET. 5,
AP. 38, SECTOR 2, BUCUREȘTI, B, RO

(54) **METODĂ DE MĂSURARE A DIFERENȚEI DE FAZĂ
ȘI A MODIFICĂRII DE INTENSITATE INDUSE DE O PROBĂ
ASUPRA UNOR FASCICULE CU POLARIZARE
CONTROLATĂ, DAR AU ACELAȘI DRUM OPTIC**

(57) Rezumat:

Invenția se referă la o metodă de determinare a intensităților și diferenței de fază introduse de o probă între componentele ortogonale (P și S) ale polarizării unui fascicul emergent din probă, polarizat eliptic sau liniar, pe o direcție diferită de P și S, cu aplicare în microscopie, studiul materialelor sau senzorică. Metoda conform invenției constă în iluminarea probei cu fascicule care au riguros același drum optic, dar polarizări și defazaje, față de un fascicul de referință, cu valori cunoscute, controlate, urmată de polarizarea celor două fascicule, între probă și un detector, cu ajutorul unui polarizor care are o axă de polarizare rotită

cu un unghi cunoscut față de polarizarea unuia dintre fascicule, și de măsurarea intensităților luminii la ieșirea din polarizor, pentru fasciculele între care au fost introduse întârzieri de fază cu valori fixe, cunoscute, iar din intensitățile luminii măsurate, se calculează intensitățile componentelor ortogonale P și S și diferența de fază dintre componentele ortogonale ale polarizării unui fascicul emergent din probă.

Revendicări: 8
Figuri: 2



Metodă de măsurare a diferenței de fază și a modificării de intensitate induse de o probă asupra unor fascicule cu polarizare controlată, dar au același drum optic
DESCRIERE

Invenția se referă la o metodă de determinare a diferenței de fază și a modificării de intensitate asociate unei probe test, prin iluminarea acesteia cu fascicule care au riguros același drum optic, dar polarizări și defazaje (față de un fascicul referință) cu valori cunoscute, controlate.

Metoda are aplicații practice în microscopie (e.g. de contrast de fază, de rezonanța plasmonilor de suprafață sau de reflexie), studiul materialelor, sau senzorică, pentru determinarea cu precizie a modificărilor intensităților fasciculelor și a defazajelor introduse de diferite componente ale probei de analizat și obținerea parametrilor fizici (ex. optici, electrici) ale unor obiecte/sisteme (microscopice) în timp real și la viteze crescute de achiziție.

Metodele elipsometrice, bazate pe studiul polarizării fasciculelor, sau interferometrice, bazate pe analiza diferențelor de drum optic introduse de probe, sunt utilizate cu succes în analiza și în caracterizarea materialelor din punct de vedere al proprietăților optice. Faza este mult mai sensibilă la modificări ale proprietăților optice ale probelor ceea ce conduce la o mai bună acuratețe a măsurătorilor iar determinarea proprietăților optice ale probelor din defazajul introdus de acestea în fasciculele de iluminare se face mult mai precis.

În brevetul US 8436995 B2 se descrie un dispozitiv și o metodă elipsometrică de măsurare a plasmonilor de suprafață în care într-un aranjament de tip reflexie totală internă se modulează electro-optic polarizarea fasciculului de iluminare iar din analiza (prin metoda de tip lock-in) a modulației se extrag informațiile despre intensitatea și defazajul fasciculelor reflectate.

În brevetul US 7623246 B2 se descrie o metodă și un dispozitiv de măsurare diferențială a fazei rezonanței plasmonilor de suprafață cu ajutorul a două fascicule polarizate P și respectiv S în raport cu planul de reflexie. Măsurătoarea se face din analiza franjelor produse de interferența celor două fascicule dintre care unul este utilizat ca referință.

În brevetul US 7812963 B2 se descrie o metodă de elipsometrie, interferometrie și măsurare a împrăștierii luminii de către un obiect în scopul determinării proprietăților optice ale acestuia. Măsurarea se face introducând controlat o diferență de drum optic între două fascicule provenite din aceeași sursă

Dezavantajul principal al metodelor și sistemelor descrise mai sus constă în faptul că drumul optic al celor două fascicule care interferă pentru a putea măsura diferența de fază introdusă de probă este diferit. Acest lucru afectează precizia măsurătorilor datorită neomogenităților inerent diferite introduse de diferite componente în calea fasciculelor. Vibrații de amplitudini diferite ale componentelor pot de asemenea să introducă artefacte sau erori în măsurătorile de fază.

Problema tehnică pe care o rezolvă invenția este aceea că permite măsurarea intensităților și a diferenței de fază care sunt modificate de proprietățile optice ale probei, prin iluminarea probei cu fascicule care au riguros același drum optic, dar polarizări și defazaje (față de un fascicul referință) de valori controlate. Se utilizează un element care variază polarizarea unui fascicul polarizat provenit de la o sursă de lumină (coerentă sau necoerentă), efect care poate fi însoțit și de introducerea unei întârzieri de fază (defazaj), care poate fi o celulă de tip Pockels, placă Savart, sau un ansamblu format dintr-o lama tip $\lambda/2$ și o lama tip $\lambda/4$ generând, controlat, un fascicul polarizat liniar, sau unul polarizat eliptic. Acest fascicul, cu polarizarea controlată, întâlnește apoi proba (care poate avea de o parte și de alta componente optice ex.

prismă Wollaston/Nomarski) care, în funcție de structura și proprietățile sale optice și de polarizarea fascicolului incident, modifică fascicolul emergent, de exemplu, în cazul în care acesta este polarizat eliptic, sau polarizat liniar pe o direcție diferită de P sau S (de exemplu la $\pi/4$), modifică atât defazajele între componentele ortogonale ale polarizării acestuia, cât și amplitudinile (și implicit intensitățile) componentelor ortogonale respective (P și S) sau, în cazul în care fasciculul emergent este polarizat liniar (P, respectiv S), introduce atât un defazaj între fasciculul polarizat liniar față de fasciculul de referință (de exemplu fasciculul incident în probă), precum și modificări ale amplitudinii (și implicit intensității) acestuia față de fasciculul incident. Trecând fasciculul printr-un analizor (un polarizor rotit la un unghi diferit față de polarizarea de iluminare) se vor selecta, de exemplu, în cazul în care acesta este polarizat eliptic, sau liniar pe o direcție diferită de P sau S, doar componentele de aceeași polarizare (e.g. paralelă cu direcția de polarizare a analizorului) care vor interfera între ele. Intensitatea măsurată la final va depinde de intensitățile celor două componente ortogonale (P și S), și de defazajul dintre ele. În cazul fasciculelor polarizate liniar P, respectiv S, analizorul modifică numai intensitățile (conform legii lui Malus). Cu ajutorul elementului de control al polarizării și fazei, se modifică controlat polarizarea și defazajul fasciculelor incidente sau/și emergente probei. Din intensitățile măsurate pentru cel puțin 3 fascicule cu același drum optic, dar cu polarizări distincte, cu defazajele corespunzătoare, de exemplu două fascicule polarizate liniar P, respectiv S și un fascicul polarizat eliptic, sau polarizat liniar pe o direcție diferită de P sau S, se extrag valorile intensităților celor două fascicule polarizate liniar (P și S) și defazajul dintre componentele ortogonale. Din aceste valori se calculează parametri fizici ai probei (indici de refracție, grosimi) utilizând metoda matricii de transfer pentru analiza propagării undelor electromagnetice (luminoase) prin probă.

Se prezintă în continuare patru exemple de aplicare a acestei metode (care nu limitează domeniul ei de aplicare) și în legătură cu fig. 1-2 care reprezintă:

Figura 1 - Schema metodei de măsurare a intensității componentelor ortogonale (P și S) și a diferenței de fază dintre acestea pentru un fascicul emergent dintr-o probă iluminată cu un fascicul eliptic, sau polarizat liniar pe o direcție diferită de P sau S – analiza probei prin transmisie; în acest exemplu, diferența de fază relevă componenta gradientului pe direcția de separare spațială a componentelor P și S realizată de o prismă Wollaston/Nomarski, poziționată în fața probei

Figura 2 - Schema metodei de măsurare a intensității componentelor ortogonale (P și S) și a diferenței de fază pentru un fascicul reflectat de o probă iluminată cu un fascicul eliptic, sau polarizat liniar pe o direcție diferită de P sau S – analiza probei prin reflexie

Exemplul 1. În conformitate cu figura 1, un fascicul de la o sursă de lumină (1), polarizat liniar la $\pi/4$ cu ajutorul unui element de polarizare (2), întâlnește un element care modifică fasciculul prin introducerea unor polarizări controlate de exemplu, două liniare P, S și două eliptice, sau polarizate liniar pe o direcție diferită de P sau S (3) apoi iluminează proba (4), care are de o parte și de alta câte o prismă Wollaston/Nomarski (5, 6). Proba modifică fasciculul incident introducând atât un defazaj între componentele ortogonale ale fasciculelor polarizate eliptic sau polarizate liniar pe o direcție diferită de P sau S, cât și modificări ale amplitudinilor (și implicit intensităților) componentelor ortogonale respective (P și S) sau, în cazul în care fasciculul incident probei are polarizarea liniară P, respectiv S, introduce atât un defazaj între

fasciculul polarizat liniar față de fasciculul de referință (de exemplu fasciculul incident în probă), precum și modificări ale amplitudinii (și implicit intensității) acestuia față de fasciculul incident. Fasciculul (cu polarizare controlată) parcurge în continuare același drum optic și este trecut printr-un analizor (7) ajungând apoi la detector (8). Din cele 3 intensități măsurate în cazurile în care fasciculele au polarizările liniare P, S și $\pi/4$, se calculează defazajul- φ introdus de probă între componentele ortogonale ale polarizării fasciculului de iluminare polarizat liniar la $\pi/4$, conform formulei:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{I_P}{2} \\ I_2 = \frac{I_S}{2} \\ I_3 = I_{\pi/4} = \frac{1}{2} \left(I_P + I_S + 2\sqrt{I_P \cdot I_S} \cos \varphi \right) \\ \varphi = \cos^{-1} \left(\frac{I_3 - I_1 - I_2}{2 \cdot \sqrt{I_1 \cdot I_2}} \right) \end{cases} \quad (1)$$

unde I_P , I_S și $I_{\pi/4}$ sunt intensitățile măsurate corespunzătoare fasciculelor polarizate liniar P, S și $\pi/4$

Exemplul 2. În conformitate cu figura 1, un fascicul de la o sursă de lumină (1), polarizat liniar la $\pi/4$ cu ajutorul unui element de polarizare (2), întâlnește un element care modifică fasciculul prin introducerea unor polarizări controlate de exemplu, două liniare P, S și două eliptice (3) apoi iluminează proba (4), care are de o parte și de alta câte o prismă Wollaston/Nomarski (5, 6). Proba modifică fasciculul incident introducând atât un defazaj între componentele ortogonale ale fasciculelor polarizate eliptic cât și modificări ale amplitudinilor (și implicit intensităților) componentelor ortogonale respective (P și S) sau, în cazul în care fasciculul incident probei are polarizarea liniară P, respectiv S, introduce atât un defazaj- φ între fasciculul polarizat liniar față de fasciculul de referință (de exemplu fasciculul incident în probă), precum și modificări ale amplitudinii (și implicit intensității) acestuia față de fasciculul incident. Fasciculul (cu polarizare controlată) parcurge în continuare același traseu și este trecut printr-un analizor (7) ajungând apoi la detector (8). Cu elementul de introducere a unor polarizări controlate, de exemplu un module de întârziere (retarder), precum o celulă Pockels (3) se introduc polarizări și valori de defazaje cunoscute între componentele polarizării fasciculului incident în probă și se măsoară cu ajutorul detectorului (8) intensitatea fasciculului modificat de probă, a carui expresie depinde de întârzierea de fază θ (de exemplu $\theta=0; \pi; \pi/2; 3\pi/2$), introdusă de modulul de retardare, conform relației:

$$I(\theta, \varphi) = \frac{1}{4} \left(I_P + I_S + (I_P - I_S) \cdot \cos \theta + 2 \sin \theta \sqrt{I_P \cdot I_S} \cdot \sin \varphi \right) \quad (2)$$

Pentru cele patru cazuri obținem, conform formulei:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 = I(0, \varphi) = \frac{I_P}{2} \\ I_2 = I(\pi, \varphi) = \frac{I_S}{2} \\ I_3 = I\left(\frac{\pi}{2}, \varphi\right) = \frac{1}{4} \left(I_P + I_S + 2\sqrt{I_P \cdot I_S} \sin \varphi \right) \\ I_4 = I\left(3\frac{\pi}{2}, \varphi\right) = \frac{1}{4} \left(I_P + I_S - 2\sqrt{I_P \cdot I_S} \sin \varphi \right) \end{array} \right. \quad (3)$$

Cu ajutorul celor patru intensități se determină atât defazajul- φ introdus de probă, precum și expresia unei mărimi obținută din datele experimentale, notate *Verif*, a cărei valoare (dacă este egală cu unitatea) indică realizarea corectă a măsurătorilor, conform formulei:

$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{I_3 - I_4}{2 \cdot \sqrt{I_1 \cdot I_2}} \right); \quad (4)$$

$$Verif = \frac{I_3 + I_4}{I_1 + I_2} \rightarrow 1$$

Exemplul 3. În conformitate cu figura 2, se realizează un aranjament de iluminare prin reflexie totală internă. Se introduce un element de cuplare a câmpului evanescent (9) al fascicului incident cu proba (care prezintă proprietăți de ghid de undă) pentru măsurarea defazajului introdus de modificarea rezonanței plasmonilor de suprafață în relație cu proprietățile probei. Obținerea diferenței de fază și a raportului intensităților dintre cele două fascicule se face la fel ca în exemplul 1, utilizând relația (1).

Exemplul 4. În conformitate cu figura 2, se realizează un aranjament de iluminare prin reflexie totală internă. Se introduce un element de cuplare a câmpului evanescent (9) al fascicului incident cu proba (care prezintă proprietăți de ghid de undă) pentru măsurarea defazajului introdus de modificarea rezonanței plasmonilor de suprafață în relație cu proprietățile probei. Obținerea diferenței de fază și a raportului intensităților dintre cele două fascicule se face la fel ca în exemplul 2, utilizând relațiile (3) și (4).

Pentru obținerea unei mărimi asociate intensității fascicului modificat de probă, dar independentă de intensitatea fascicului incident, se analizează rapoarte, precum raportul intensităților fasciculelor cu polarizare P, respectiv S - R_{PS} - care se calculează conform relației:

$$R_{PS} = \frac{I_P}{I_S} = \frac{I_1}{I_2} \quad (5)$$

sau raportul intensităților fasciculelor cu polarizare P, respectiv S măsurate după trecerea prin probă și printr-o referință poziționată în locul probei, de exemplu aer (I_{Paer} , I_{Saer}), R_{Ppaer} , R_{Spaer} :

$$R_{Ppaer} = \frac{I_P}{I_{Paer}} = \frac{I_1}{I_{1aer}}; R_{Spaer} = \frac{I_S}{I_{Saer}} = \frac{I_2}{I_{2aer}} \quad (6)$$

Valorile rapoartelor intensităților au relevanță experimentală și teoretică pentru determinarea proprietăților optice ale probei investigate prin fitarea cu modelele matematice.

Revendicări:

1. Metodă de măsurare a intensităților și a diferenței de fază introduse de o probă între componentele ortogonale ale polarizării unui fascicul emergent din probă, polarizat eliptic, sau polarizat liniar pe o direcție diferită de P sau S, prin iluminarea probei cu fascicule care au riguros același drum optic, dar polarizări și defazaje (față de un fascicul referință) cu valori controlate **caracterizată prin aceea că** fasciculele parcurg același drum optic
2. Metodă conform revendicării 1 **caracterizată prin aceea că** înainte de probă, fascicule au polarizări și întârzieri de fază de valori fixe cunoscute
3. Metodă conform revendicării 2 **caracterizată prin aceea că** se utilizează minim trei fascicule cu polarizări și întârzieri de fază, distincte, de valori fixe cunoscute.
4. Metodă conform revendicării 3 **caracterizată prin aceea că** între probă și detector cele două fascicule sunt trecute printr-un polarizor
5. Metodă conform revendicării 4 **caracterizată prin aceea că** polarizorul are axa de polarizare rotită cu un unghi cunoscut față de polarizarea unuia dintre fascicule.
6. Metodă conform revendicării 5 **caracterizată prin aceea că** se măsoară intensitățile luminii la ieșirea din polarizor pentru fasciculele între care au fost introduse întârzieri de fază de valori fixe, cunoscute
7. Metodă conform revendicării 6 **caracterizată prin aceea că** din intensitățile luminii măsurate la ieșirea din polarizor se calculează intensitățile componentelor ortogonale P și S
8. Metodă conform revendicării 6 **caracterizată prin aceea că** din intensitățile luminii măsurate la ieșirea din polarizor se calculează diferența de fază dintre componentele ortogonale ale polarizării unui fascicul emergent din probă.

Desene

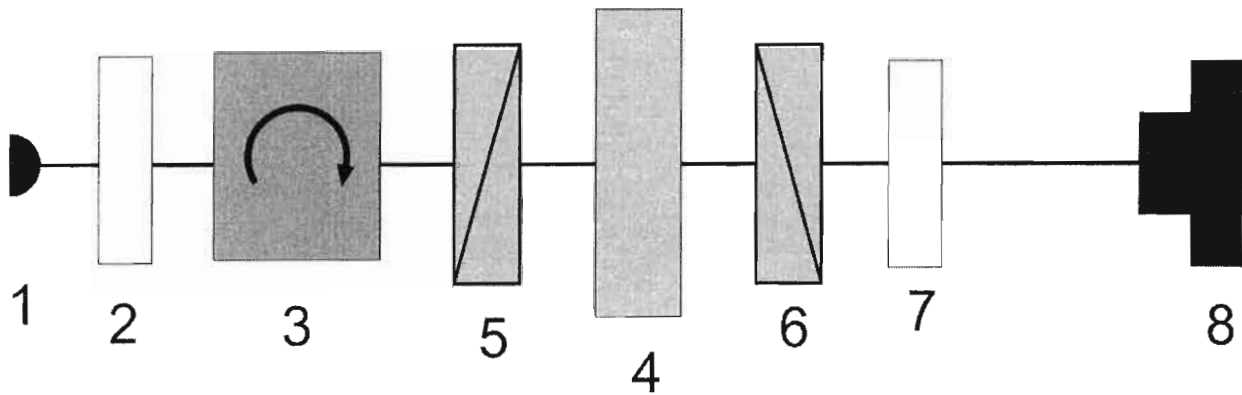


Fig. 1 Schema metodei de măsurare a intensității componentelor ortogonale (P și S) ale unui fascicul eliptic și a diferenței de fază dintre componentele ortogonale respective— analiza probei prin transmisie; în acest exemplu, diferența de fază relevă componenta gradientului pe direcția de separare spațială a componentelor P și S realizată de o prismă Wollaston/Nomarski, poziționată în fața probei

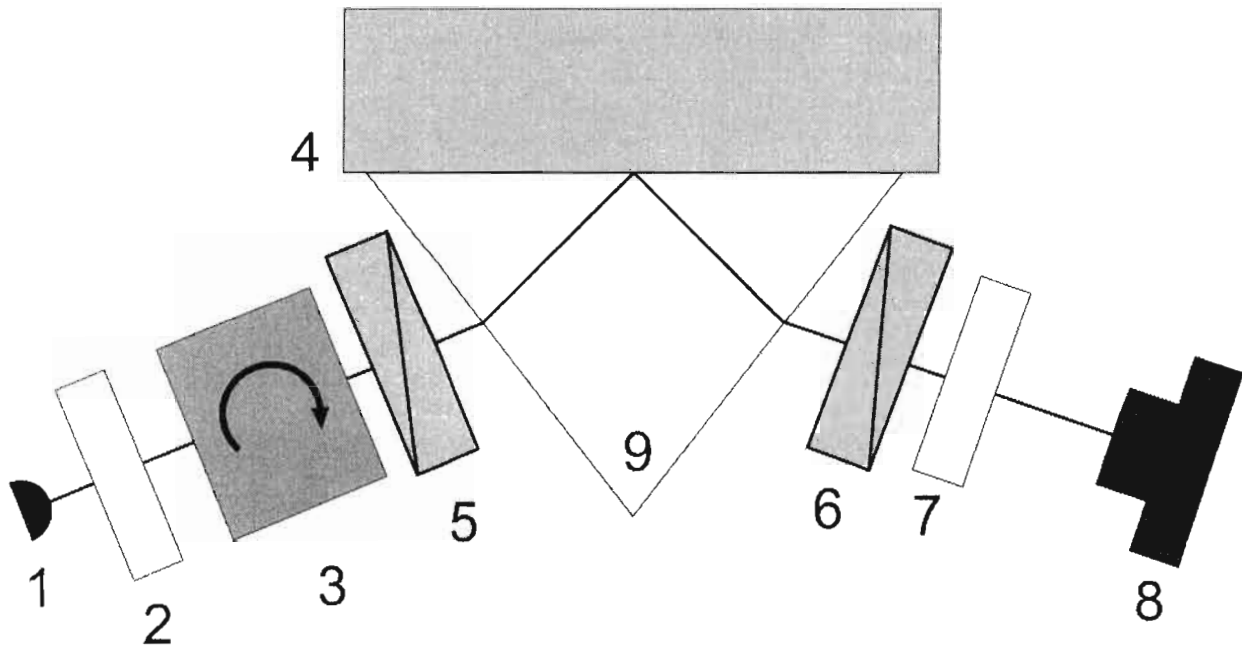


Fig. 2 Schema metodei de măsurare a intensității componentelor ortogonale (P și S) ale unui fascicul eliptic și a diferenței de fază dintre componentele ortogonale respective— analiza probei prin reflexie