

Raport stiintific

privind implementarea proiectului

Creșterea și modelarea de reflectori Bragg pentru microcavități cuantice

in perioada octombrie – decembrie 2011

Simularea și proiectarea asistată de computer a reflectorilor Bragg

Pentru a observa interacția lumină-materie este necesară realizarea de rezonatori cu o calitate optică foarte înaltă, care să manifeste rezonanțe fotonice bine definite și să permită un cuplaj eficient cu excitonii mediului activ. Ideea este să se realizeze o confinare eficientă atât a fotonilor, cât și a purtătorilor, folosind cavități de dimensiuni micronice, numite generic *microcavități*.

Din punct de vedere calitativ, o microcavitate semiconductoare este foarte similară cu un rezonator Fabry-Pérot cu oglinzi plane (reprezentat in Figura 1), care este un sistem compus din două oglinzi M1 și M2 separate de un mediu având un indice de refracție n_{cav} și o lungime L_{cav} . Un câmp electromagnetic incident pe M1 sub un unghi θ_1 va călători înainte și înapoi prin cavitate, dând naștere la un câmp reflectat și unul transmis de fiecare parte a cavității.

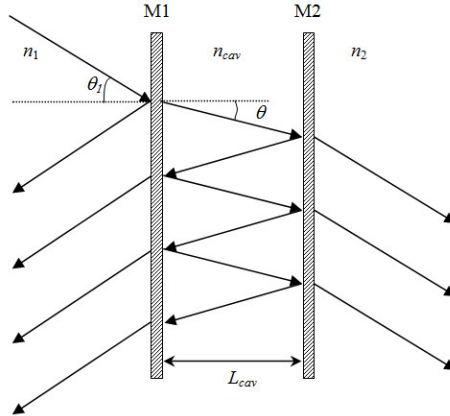


Figura 1. Reprezentare schematică a unui rezonator Fabry-Pérot.

Transmitanța unui rezonator Fabry-Pérot pentru care oglinzile M1 și M2 sunt făcute din materiale dielectrice având coeficienții de reflectivitate r_1 , respectiv r_2 , și coeficienții de transmisie t_1 , respectiv t_2 , iar $n_1 = n_2 = 1$, poate fi scrisă ca [O. Svelto, *Principles of Lasers* (Springer, 1998)]:

$$T_{FP} = \frac{t_1^2 t_2^2}{1 - 2r_1 r_2 \cos 2\varphi + r_1^2 r_2^2} \quad (1)$$

unde $\varphi = 2\pi n_{cav} L_{cav} \cos(\theta) / \lambda$, unghiul φ fiind legat de θ_1 prin legea lui Snell.

Formula (1) poate fi rescrisă în funcție de reflectanță și transmitanță, definite ca $R_i = |r_i|^2$, respectiv $T_i = |t_i|^2$, cu $R_i + T_i = 1$ pentru cazul unui rezonator ideal (care nu manifestă pierderi prin absorbție, împrăștiere, etc.):

$$T_{FP} = \frac{(1-R_1)(1-R_2)}{(1-\sqrt{R_1 R_2})^2} \frac{1}{1 + \frac{4\sqrt{R_1 R_2}}{(1-\sqrt{R_1 R_2})^2} \sin^2 \varphi} \quad (2)$$

Figura 2 este rezultatul unei simulări computerizate (folosind programul *MATLAB*) și ilustrează variația T_{FP} în funcție de φ pentru diferite valori ale R_1 și R_2 , cu $R_1 = R_2$.

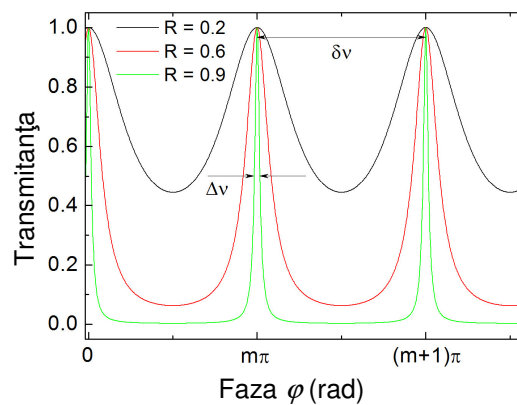


Figura 2. Transmitanța unui rezonator Fabry-Pérot pentru care $R_1 = R_2$.

Oglinzile folosite de regulă pentru realizarea microcavităților semiconductoare sunt oglinzi dielectrice numite *distributed Bragg reflectors* (DBRs), sau **reflectori Bragg** (vezi Figura 3), care sunt structuri multistrat din materiale semiconductoare cu indici de refracție alternanți mici și mari.

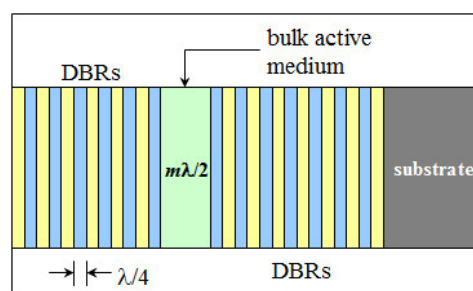


Figura 3. Structura generală a unei microcavități cuantice cu mediu activ *bulk*.

[imagine reprodusă din propunerea de proiect]

Obiectivul general al proiectului îl reprezintă realizarea de reflectori Bragg de înaltă calitate, având dopaj controlat, care să permită integrarea ulterioară a acestora în microcavități semiconductoare de diferite tipuri.

Simularea și proiectarea asistată de *computer* a reflectorilor Bragg, care urmează să fie creșcuți prin tehnici laser în etapele următoare, contribuie la realizarea acestui obiectiv general prin

faptul că ea oferă posibilitatea de a modela o multitudine de tipuri de reflectori Bragg pentru microcavități semiconductoare folosind *teoria matricei de transfer*. Această abordare face posibilă o estimare *a priori* a efectelor pe care diferite tipuri de interacții și mecanisme fizice le pot avea asupra proprietăților optice ale structurilor rezultante, cum ar fi: i) dependența de lungimea de undă a coeficienților optici ai materialelor; ii) lărgirea spectrală indusă de prezența agenților de dopaj; iii) posibila variație a coeficienților optici datorită prezenței dopanților, etc.

Necesitatea utilizării *teoriei matricei de transfer* [E. Hecht, *Optics* (2nd Ed., Addison Wesley, 1987)] ca unealtă pentru studiul propagării luminii prin microcavitățile semiconductoare se datorează faptului că aceste structuri sunt alcătuite de regulă din câteva zeci de straturi cu indici de refracție diferiți/variabili. Avantajul acestui formalism este faptul că el rescrie legile Snell-Descartes într-o formă matriceală, ceea ce îl face să fie ușor de implementat în calcule numerice.

După cum am menționat anterior, reflectorii Bragg sunt structuri periodice multistrat, de regulă compuse din două materiale semiconductoare alternante cu indici de refracție n_1 și n_2 , și având grosimi d_1 și d_2 , astfel încât $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0 / 4$, unde λ_0 este lungimea de undă de rezonanță a cavității. Rolul acestor straturi este ca prin interferențe constructive să recupereze partea transmisă a unde electromagnetice incidentă la fiecare interfață (Figura 4).

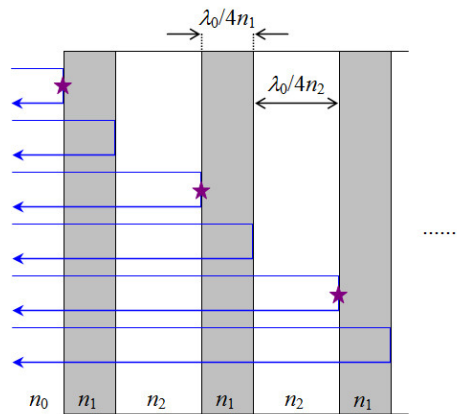


Figura 4. Reprezentare schematică a unui reflector Bragg.

Mulțumită formalismului matricei de transfer, răspunsul optic al unui reflector Bragg poate fi dedus cu ușurință folosind metode numerice. Pentru un reflector Bragg alcătuit din $2N$ straturi, putem scrie amplitudinile câmpurilor transmise (a_N) și incidente (b_N) la ultima interfață în funcție de amplitudinile câmpurilor incidente (a_1) și transmise (b_1) la prima interfață:

$$\begin{bmatrix} a_N \\ b_N \end{bmatrix} = \prod_{i=2}^{2N} P_i D_{i-1,i} \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

unde $D_{i-1,i}$ este matricea de transfer la interfața dintre mediul $i-1$ și mediul i , iar P_i este matricea de propagare prin mediul i . Astfel, formalismul matricei de transfer permite un calcul simplu al reflectanței și transmitanței ale unei structuri multistrat, fiind îndeosebi adecvată calculelor numerice. În consecință, simulările spectrelor de reflectivitate și de transmisie pentru reflectorii Bragg care vor fi efectuate în cadrul WP1 se vor realiza cu ajutorul unui cod numeric dezvoltat

pentru platforma MATLAB, care va folosi formalismul matricei de transfer pentru calculul acestor coeficienți.

O astfel de simulare a unui spectru de reflectanță este ilustrată în Figura 5, pentru cazul unui reflector Bragg alcătuit din 8 perechi de $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{AlN}$ crescute pe un substrat de Si (111). Grosimea straturilor este ajustată în așa fel încât banda de reflexie să fie centrată pe o energie ν_0 de 3.49 eV (~ 355 nm), aceasta fiind energia de recombinare radiativă a unui exciton liber al GaN, la temperatura camerei. Parametrii utilizați în această simulare sunt: indicele de refracție al mediului de incidență (aer), $n_0 = 1$; indicii de refracție ai AlN ($n_{\text{AlN}} = 2.165$) și $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ ($n_{\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}} = 2.52$) la 355 nm [N. Antoine-Vincent *et al.*, J. Appl. Phys. 93, 5222 (2003)]; indicele de refracție al substratului de Si (111) ($n_{\text{Si}} = 5.64$) la 355 nm [J. Humlicek *et al.*, J. Appl. Phys. 65, 2827 (1989)].

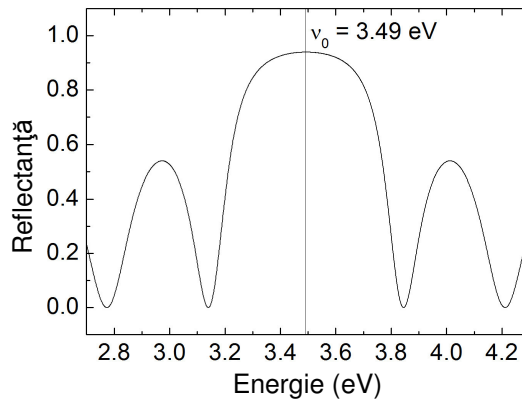


Figura 5. Spectrul teoretic de reflectivitate al unui reflector Bragg alcătuit din 8 perechi de straturi de $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{AlN}$ de grosime $\lambda/4$ crescute pe Si (111).

Maximul estimat al reflectanței acestui reflector Bragg este $R \cong 0.94$, la energia centrală ν_0 . Putem defini *banda de reflexie* ca fiind intervalul spectral centrat în ν_0 pentru care $R > 0.9$. Pentru un număr suficient de mare de straturi (N), lărgimea benzii de reflexie este proporțională cu diferența dintre indicii de refracție ai celor două materiale. În cazul structurii simulată mai sus, banda de reflexie are o lărgime de ~ 34 nm, ceea ce în domeniul energiei ar corespunde la o lărgime de ~ 335 meV în acest domeniu spectral.

Reflectanța unui reflector Bragg poate fi estimată și analitic dacă $\nu = \nu_0$ [P. Yeh, *Optical Waves in Layered Media* (Wiley, New York, 1988)]:

$$R = \left(\frac{1 - \frac{n_s}{n_0} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{2N}}{1 + \frac{n_s}{n_0} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{2N}} \right)^2 \quad (4)$$

unde n_s este indicele de refracție al substratului, iar n_0 este indicele de refracție al mediului de incidență. Se poate observa că dacă contrastul dintre indicii de refracție ai straturilor Bragg este mic, N trebuie crescut astfel încât să se recupereze reflectanța dorită la energia centrală.

Figura 6 ilustrează dependența maximului reflectanței de numărul de perechi de straturi de grosime $\lambda/4$ pentru un reflector Bragg de $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{AlN}$, folosind indicii de refracție citați la spectrul de reflectivitate teoretică prezentat în Figura 5. Astfel, datorită faptului că în cazul nostru raportul dintre indicii de refracție ai straturilor Bragg este $n_1/n_2 = 1.164$, se observă că este necesară creșterea a cel puțin 9 perechi de straturi $\lambda/4$ pentru a obține un reflector Bragg cu o reflectanță maximă mai mare de 95%.

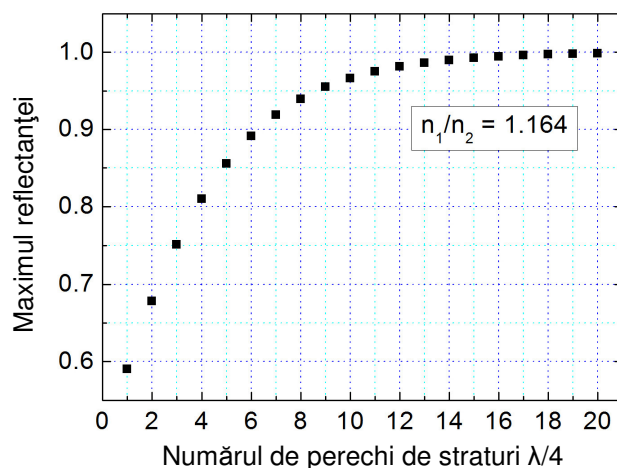


Figura 6. Maximul simulat al reflectanței în funcție de numărul de perechi de straturi $\lambda/4$ pentru un reflector Bragg de $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{AlN}$.

Concluziile etapei

Principalul pachet de lucru din cadrul acestei etape a fost *Modelarea reflectorilor Bragg utilizând teoria matricei de transfer* (WP1). În acest sens, am dezvoltat un cod numeric pentru platforma MATLAB care încorporează elementele teoriei descrise în acest raport. După cum am arătat, acest program este capabil să simuleze spectrele parametrilor optici ai unor structuri dielectrice complexe, multistrat. El va fi utilizat pentru simularea și proiectarea reflectorilor Bragg care urmează să fie creșcuți prin tehnici laser în cadrul etapelor următoare.

Pe partea de laborator, menționăm că în această perioadă au fost efectuate adaptări ale instalațiilor de depunere pentru creșterea de reflectori Bragg, cu aplicații în domeniul microcavităților semiconductoare. În acest sens, fondurile de logistică au fost utilizate pentru: i) achiziționarea unui sistem de microbalanță cu cuarț folosit la monitorizarea *in situ* a grosimii straturilor depuse; și ii) achiziționarea unui generator de radiofrecvență necesar experimentelor de depunere laser pulsată asistată de plasmă a straturilor dielectrice.

Director proiect,

F. Șer