

Introducere

În acest capitol voi prezenta motivarea alegerii temei de cercetare, precum și importanța și actualitatea studiului. Într-un prim subcapitol voi prezenta, din punct de vedere general, interesul studiului cristalelor fotonice. În al doilea subcapitol voi accentua scopul tezei și în final voi descrie pe scurt conținutul fiecărui capitol.

1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat

Realizarea de dispozitive pe bază de cristale fotonice a reprezentat principalul obiectiv al fotonicii încă de la apariția sa, scopul principal fiind realizarea unor componente capabile să îndeplinească funcții asemănătoare cu cele ale dispozitivelor electronice, dar la o viteză net superioară și cu un consum de energie mai redus [1]. Fabricarea circuitelor integrate optice rămâne totuși o aspirație nerealizată, unul dintre motivele principale fiind imposibilitatea confinării luminii în spații foarte restrânse [2, 3]. Pentru a împiedica dispersia luminii în material, indiferent de forma sa, este necesară delimitarea spațiului respectiv cu un mediu care în mod intrinsec interzice propagarea radiației dintr-o anumită gamă de frecvențe dorită. Din calcule [4] se poate demonstra că un compozit, format dintr-un material cu permitivitatea dielectrică periodică pe cele trei dimensiuni, adică cristalul fonic, prezintă benzi fotonice interzise, și drept urmare câmpul electromagnetic ce are domeniul spectral inclus în aceste spații interzise nu se poate propaga. Astfel, se pot realiza dispozitive pasive simple ca de exemplu ghiduri de undă și cavități rezonante, prin mărginirea unei regiuni spațiale cu pereți periodici și dispozitive mai complicate, cum ar fi filtrele, splitterele, demultiplexoarele, etc.

1.2 Scopul și obiectivele tezei

Dezvoltarea unor metode și tehnici de analiză și caracterizare a dispozitivelor cu cristale fotonice, ce urmărește proiectarea și optimizarea unor mecanisme fotonice pasive, constituie principalul scop al prezentei lucrări. În paralel, strâns legat de obiectivul principal, sunt analizate o serie de materiale cu o funcție dielectrică îmbunătățită. De asemenea, este evidențiată și realizarea practică a unui cristal fonic pe bază de germaniu.

Cristalele fotonice se definesc ca fiind sisteme periodice artificiale cu proprietatea de a interzice propagarea câmpului electromagnetic în anumite benzi de frecvență, după una, două sau toate cele trei direcții spațiale [4, 5].

Motivele pentru care dispozitivele bazate pe cristale fotonice au fost alese ca subiect al prezentei lucrări sunt legate în primul rând de potențialul lor mare de aplicabilitate practică. Un al doilea motiv este legat de realizarea unor circuite optice de același ordin de mărime cu cele din electronica actuală. Un alt argument de studiu este noutatea și faptul că încă sunt în faza de cercetare, prezentând încă puține utilizări comerciale (de exemplu fibrele pe bază de cristale fotonice). Cristalele fotonice prezintă un teren de cercetare promițător datorită proprietăților neobișnuite pe care le posedă, printre care și benzile interzise, zone caracterizate de viteze de grup mici, refracție negativă. O altă rațiune importantă este posibilitatea de a fi studiate amănunțit cu ajutorul simulărilor numerice și scalabilitatea, adică posibilitatea realizării și testării

fizice a unor cristale la scală marită, cu o radiație din gama microundelor, scăzând costul de fabricare a unor compozite cu periodicitate în domeniul sutelor de nanometrii. Manipularea eficientă a radiației constituie în prezent un obiectiv important al cercetărilor fundamentale și aplicative, vizând realizarea de dispozitive opto-electronice atât pasive cât și active.

Dispozitivele optice pasive cu aplicații în electronică și telecomunicații sunt bazate în special pe efectele asociate propagării diferite a radiației electromagnetice în materiale convenabil alese. O astfel de clasă de sisteme sunt cristalele fotonice, care datorită proprietății lor de a permite propagarea luminii doar la anumite energii au aplicații imediate în construirea de filtre, splitere, cuploare, demultiplexoare, etc.

Acestea operează în principiu în baza proprietății fundamentale a cristalelor fotonice, aceea de existență a benzilor fotonice în anumite domenii de frecvență. De asemenea, realizarea ghidurilor de undă la aceste frecvențe este astfel imediată.

O altă clasă de aplicații are la bază posibilitatea de a cupla câmpul optic cu excitațiile elementare din solidul cristalin în care acestea sunt realizate. Acestea sunt dispozitivele optice active, cu aplicații în optică cuantică în criptarea informației, realizarea de tranzistori optici, construirea de laseri polaritonici. Până în prezent s-au realizat progrese relativ modeste cu privire la realizarea tranzistorilor optici datorită necesității de comutare rapidă și eficientă între stările optice pentru realizarea porților logice (NOT, AND, OR, NAND, NOR, XOR, XNOR). Acestea sunt puternic dependente de existența mediilor optice neliniare, care să permită interacția dintre undele electromagnetice, precum și cuplajul cu stările electronice ale materialului.

vi i

Astfel, se vor putea studia procese de condensare bosonică (condensare Bose-Einstein) asociate interacției excitonilor dintr-un semiconductor excitat rezonant cu o radiație de energie egală cu a benzii interzise cu câmpul electromagnetic incident, confinat într-o cavitate rezonantă într-un cristal fonic (atât 1D cât și 2D). Aceste fenomene au fost puse în evidență foarte recent și constituie punctul de plecare pentru aplicații deosebit de promițătoare ale opticii cuantice.

Pe de altă parte, până în prezent au fost realizate puține studii privind comportarea câmpului de radiație într-un cristal fonic format din materiale magnetice. Este de așteptat ca, în structuri de straturi alternante (cristale fotonice 1D) de materiale cu funcții dielectrice diferite, în care se introduce un strat activ, cu dimensiune fie mai mare, fie mai mică (defect), să apară efecte de localizare puternică a luminii. În plus, dacă defectul constă dintr-un strat magnetic activ (Co, Fe, Mn, Sm), atunci un efect de rotire a planului de polarizare (efect Faraday) a câmpului electromagnetic însoțit de o amplificare a transmisiei poate fi observat. De asemenea, se poate identifica rotația planului de polarizare a lumii reflectate (efect Kerr), însoțită de o amplificare a radiației reflectate. Astfel, conversia radiației cu polarizare TM în TE și invers ar putea deveni posibilă. Aceste efecte, în esență își au originea în existența termenilor nediagonali ai funcției dielectrice. În ceea ce privește cristalele fotonice bi-dimensionale, este de așteptat posibilitatea de a pune în evidență procese de ordonare a componentelor de câmp magnetic.

Toate aceste aplicații reclamă în primă instanță confinarea radiației într-o cavitate optică, fiind urmată de interacția efectivă cu o stare electronică a materialului. Sub aspect fundamental, în prezent dovada cuplajului dintre aceste două stări

este de dată recentă, fiind raportate doar câteva studii de frontieră publicate în ultimii 4-5 ani în jurnale de mare impact (Nature, Nature Photonics, Science, Phys. Rev. Lett). Acestea sunt bazate pe interacția luminii într-o cavitate optică realizată într-un cristal fonic fie uni-dimensional, fie bi-dimensional cu excitonii generați într-o structură de tip barieră de potențial. S-a revelat astfel că o secvență alternantă de tip AlAs/GaAs/InGaAs/GaAs/AlAs în care sunt generați excitoni prin pompaj optic se cuplează eficient cu fotonii din regiunea centrală, rezultând polaritoni excitonici cu aplicații în laseri polaritonici, iar cuplajul eficient al fotonilor dintr-o cavitate rezonantă bi-dimensională realizată într-o structură hexagonală din InAs cu excitonii creați optic permit cuplajul și manipularea acestor stări în mod eficient, cu aplicații imediate în realizarea circuitelor de comutare.

Avantajul folosirii tehnicilor de sinteză ale materialelor asociate fizicii suprafețelor este de asemenea imediat, permitând în principiu realizarea dispozitivelor cu aplicații potențiale în optoelectronică și telecomunicații sub formă de rețele optice integrate, rezultate direct din procesul de fabricare al structurii (MBE, PLD, FIB).

Pe de altă parte, proprietățile optice ale acestor materiale derivă în mod direct din proprietățile lor electronice. Astfel, înțelegerea aspectelor fundamentale asociate acestor materiale constituie o necesitate.

În acest sens, lucrarea prezentă aduce câteva contribuții importante la:

- 1) Înțelegerea modului în care cavitățile optice realizate în cristale fononice unidimensionale pot conduce la amplificarea radiației și la cuplarea sa eficientă cu mediul de propagare;
- 2) Realizarea de ghiduri de undă în cristale fononice bi-dimensionale cu aplicații ca elemente de circuit în electronică și telecomunicații;
- 3) Studiul modului în care poate fi crescută eficiența procesului de confinare a radiației în cavități rezonante construite în cristale fononice bi-dimensionale, fapt care constituie un ingredient principal în realizarea de elemente optice active;
- 4) Posibilitatea de control optic al tranzistorilor în care controlul curentului de purtători este realizat prin intermediul spinului electronilor. În acest sens se urmărește cuplajul câmpului de radiație într-o structură fonică bi-dimensională construită dintr-un material cu potențial aplicativ în spintronică (Sm/Si, Fe/Ge) cu stările electronice asociate materialului magnetic;
- 5) Demonstrarea construcției unui cristal fonic bi-dimensional dintr-un material care constituie o alternativă promițătoare la tehnologia deja existentă, a siliciului.
- 6) Studiarea proprietăților optice ale unui cristal fonic sub forma de „slab” în care alternanța mai multor medii dielectrice contribuie la confinarea radiației, în mod suplimentar față de direcția \parallel și pe direcție perpendiculară structurii fononice.
- 7) Studiarea și revelarea proprietăților electronice ale acestor materiale noi folosind spectroscopia de fotoelectroni, difracția de electroni, microscopia electronică de baleiaj și microscopia cu efect tunel.

1.3 Conținutul tezei

Lucrarea conține date generale și rezultate originale, fiind structurată pe 7 capitole. Primele trei cuprind date generale, informații introductive despre tema abordată, respectiv principalele aspecte privind cristalele fotonice, tehnicile de simulare și metodele experimentale utilizate în analiza și caracterizarea cristalelor fotonice. Majoritatea rezultatelor originale sunt detaliate în următoarele 3 capitole, care cuprind rezultate numerice și experimentale. Ultimul capitol al lucrării este dedicat concluziilor generale ale tezei și perspectivelor temei abordate.

În Capitolul 1, *Baze teoretice*, am realizat o introducere asupra noțiunilor fundamentale cu exemplificarea aplicațiilor cristalelor fotonice și clasificarea acestor materiale artificiale în uni-, bi- și tri-dimensionale. De asemenea, am introdus un subcapitol cu cele mai importante realizări din acest domeniu începând cu 1987 și până în prezent.

În Capitolul 2, *Tehnici de simulare*, sunt descriși pe scurt anumiți algoritmi de studiu numeric utilizați în analiza funcționării unor serii de dispozitive optice bazate pe cristale fotonice. Cu aceștia am obținut informații pentru diferite structuri cu geometrii și proprietăți diferite. Primul procedeu matematic utilizat pentru generarea armonicii a doua în cristale fotonice neliniare [6] a fost metoda elementelor finite, urmat de cel al dezvoltării în unde plane aplicat pe o structură de cristal fonic cu rețea hexagonală [7]. A treia metodă utilizată a fost cea a diferențelor finite în domeniu timp, utilă pentru evoluția în timp și spațiu a câmpului [8, 9, 10, 11]. Un ultim algoritm de calcul studiat este metoda multipol pentru analiza fibrelor pe bază de cristale fotonice [12].

Capitolul 3, *Metode experimentale*, este dedicat tehnicilor de caracterizare *insitu* (XPS, ARUPS, LEED, STM) și *ex-situ* (FTIR, MOKE) folosite în cadrul acestei teze de doctorat pentru a descrie proprietățile electronice, optice și structurale ale materialelor ce constituie suportul de realizare al cristalelor fotonice.

Studiile teoretice și experimentale s-au efectuat în cadrul Facultății de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației din cadrul Universității Politehnica București, în colaborare cu Laboratorul de Fizica Suprafeței și Interfeței din cadrul Institutului Național de Cercetare – Dezvoltare Fizica Materialelor (INCDFM) și cu Laboratorul de Nanostructuri din cadrul CEA-Saclay. De asemenea, am colaborat și cu Laboratorul de procesare optică a materialelor nanostructurate, Laboratorul de materiale și structuri multifuncționale din cadrul INCDFM și cu Departamentul Laseri al Institutului Național de Fizica Laserilor, Plasmei și Radiațiilor (INFLPR).

În capitolul 4, *Cercetări privind cristalele fotonice bi-dimensionale*, am studiat cristalele fotonice bi-dimensionale cu diferite simetrii și defecte și am analizat modurile pare și impare la interfața Cu/SiO/Si. Un prim obiectiv a fost determinarea diagramelor de dispersie cu intenția găsirii unor cristale posedând benzi fotonice interzise cât mai largi. În paragraful 4.1 am studiat în mod comparativ cristalele fotonice cu simetrie pătratică și hexagonală realizate sub formă de cilindri cu indice de refracție mare separat de un material cu indice de refracție mic, pentru diferite valori ale razei cilindrilor variind de la $0.25 \mu\text{m}$ la $0.4 \mu\text{m}$, μ fiind constanta de rețea a cristalului fonic [10]. În final am analizat două cavități rezonante cuplate la două frecvențe diferite, pentru a evidenția eficiența ghidurilor de undă realizate în cristale fotonice pe bază de Ge de a constitui o alternativă la tehnologia siliciului. În paragraful 4.2 am evidențiat apariția unor stări localizate în apropierea nivelului Fermi, care duc la o îmbunătățire a modului de

propagare a câmpului electromagnetic [8]. De asemenea, se poate modela dimensiunea și poziția benzilor fotonice interzise în funcție de simetria cristalului și raza cilindrilor, pentru posibilitatea selectării regimurilor de frecvență necesare pentru fiecare caz de aplicație dorită. În paragraful 4.3 am studiat elemente esențiale folosite la construcția dispozitivelor optice pasive complexe, ghidul de undă și cavitatea rezonantă [11, 9].

Capitolul 5, *Cercetări privind fibrele pe bază de cristale fotonice*, este dedicat analizei modurilor în fibrele pe bază de cristale fotonice [12]. Elementul central folosit la proiectarea unor astfel de fibre este metoda multipol, în esență o metodă matematică capabilă de o acuratețe ridicată și o convergență rapidă, cu resurse modeste de calcul, care ia în considerare și partea reală și cea imaginară a constantei modului propagat, oferind informații despre pierderile asociate propagării luminii.

În Capitolul 6, *Alte contribuții la dezvoltarea domeniului cristalelor fotonice*, am prezentat câteva studii experimentale legate de caracterizarea unor suprafețe de Si [13, 14, 15] și Ge [16, 17, 18], în vederea optimizării performanțelor cristalelor fotonice și formarea de noi materiale cu caracteristici îmbunătățite. Am utilizat metode experimentale de XPS, LEED, MOKE. De asemenea, am realizat și caracterizat un cristal fonic într-o matrice de germaniu prin metode de XPS, LEED, STM, ARUPS, SEM, FTIR și simulări numerice [19].

Capitolul 7, *Contribuții și concluzii*, sintetizează principalele rezultate originale obținute și publicate în reviste de specialitate.

În finalul lucrării sunt prezentate datele bibliografice și, separat în Anexa A, lista de lucrări ale autorului, în Anexa B, lista cu tabelele, figurile și abrevierile, în Anexa C, rețeaua reciprocă și zona Brillouin și în Anexa D, instalațiile experimentale utilizate la realizarea și prelucrarea probelor.

Acknowledgement

Rezultatele prezentate în această teză de doctorat au fost obținute cu sprijinul financiar al Ministerului Muncii, Familiei și Protecției Sociale prin Fondul Social European, Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013, Contract nr. POSDRU/107/1.5/S/76909.