

**Rezumat al Tezei de Abilitare**

# **Dezvoltarea de dispozitive optice neliniare integrate pentru comunicații cuantice**

**CS II dr. Sorin TAȘCU**

**Iași 2022**

## Rezumat

Încă din antichitate, a putea controla calea urmată de lumină de-a lungul propagării a fost și rămâne un lucru fascinant. După primul experiment de ghidare a luminii într-un jet de apă (realizat în 1841 de J.D. Colladon), apariția tehnologiilor ce au permis crearea laboratoarelor de tip cameră curată la începutul anilor 1940 și progresele înregistrate între anii 1950 și 1960 în ceea ce privește tehnicile de fabricare a ghidurilor de undă, au deschis progresiv căile către domeniul Opticii Integrate de astăzi, oferind astfel posibilitatea ghidării luminii în dispozitive mici, controlând în același timp și fluxul acesteia. În dezvoltarea acestui domeniu de cercetare fascinant, monocristalul de niobat de litiu  $\text{LiNbO}_3$  a deținut întotdeauna un rol important. Succesul acestui material feroelectric se datorează excelentelor sale proprietăți optice neliniare (NLO) și electro-optice (EO) beneficiind în același timp de maturitatea de fabricație bazată pe procesul Czochralski, astfel încât numeroși furnizori pot fi găsiți în întreaga lume. În plus, proprietățile sale fizice sunt compatibile cu toate etapele tehnologice desfășurate în laboratorul de tip cameră curată, cu tratamentele termice, cu procesele de șlefuire-polizare și respectiv de încapsulare.

De exemplu, temperatura Curie ridicată ( $\sim 1200^\circ\text{C}$ ) permite păstrarea proprietăților NLO și EO chiar și în timpul tratamentelor termice, ceea ce nu este cazul altor materiale. În plus, monocristalul LN oferă un domeniu larg de transparență (340nm - 4,6 $\mu\text{m}$ ) care deschide calea către aplicații de la vizibil la infraroșu mediu. Absorbție foarte scăzută ( $< 0,15\%/ \text{cm}$  @ 1,06 $\mu\text{m}$ ) și dispersia optică redusă în banda de transparență contribuie, de asemenea, la succesul său. Pe lângă acestea, substraturile de niobat de litiu polarizate periodic (PPLN) care leagă inversarea domeniilor feroelectrice și efectul optic neliniar de ordinul doi, au jucat un rol cheie în dezvoltarea a numeroase aplicații și dispozitive optice neliniare. Drept urmare, cristalele LN/PPLN sunt exploatate în diverse aplicații și dispozitive precum dubloare de frecvență laser, surse de lumină reglabile pe o bandă largă, amplificarea luminii, convertoare de frecvență, comutație-Q pentru lasere, stocare de informații și imagini, acustică de suprafață senzori electromagnetici, giroscopie de precizie, comutatoare optice, modulatori optici, multiplexor, surse de perechi de fotoni intercorelați cuantic pentru aplicații de optică cuantică și comunicații cuantice și, de asemenea, pentru multe alte dispozitive de procesare optică. Pentru fiecare dintre aceste aplicații, provocarea este de a oferi configurații integrate ușor de implementat, cu *pierderi de propagare reduse, eficiență ridicată, stabilitate, robustețe* și, dacă este posibil, *compactitate și consum redus de energie*.

În acest context, teza de abilitare prezintă unele dintre cele mai importante rezultate științifice publicate de dr. Sorin Tascu după obținerea titlului de doctor în **Fizica**, pe platforme (substraturi) de niobat de litiu, în încercarea de a răspunde cerințelor mai sus menționate. Teza este împărțită în trei capitole.

Primul capitol prezintă principalele concepte și tehnici utilizate în studiile prezentate, cum ar fi cvasi acordul de fază (Quasi-Phase Matching - QPM) sau tehnica de inversie în câmp electric extern (e-field poling) utilizată pentru fabricarea domeniilor feroelectrice inversate periodic cât și cele mai uzuale tehnici de fabricare și caracterizare a ghidurilor de unde optice în LN.

Al doilea capitol constă în prezentarea unora dintre contribuțiile autorului la dezvoltarea opticii neliniare integrate și a dispozitivelor optice integrate. Aceste dispozitive

îndeplinesc o anumită funcție optică cum ar fi de exemplu „pâlnia optică”. În acest caz vorbim de ghiduri canal de unde optice segmentate sau/și cu segmentare variabilă în vederea realizării cel mai bun compromis între pierderile la propagare și eficiența de cuplare cu alte dispozitive optice. În egală măsură, dezvoltarea continuă a sistemelor de telecomunicații optice necesită tehnici de măsurare și caracterizare a celor mai importanți parametri care determină performanțele unui dispozitiv. Aceasta a fost ideea de la care s-a pornit atunci când s-a realizat o configurație experimentală all-in-one pentru efectuarea de măsurători precise privind pierderile la propagare, indicele efectiv de grup cât și dimensiunea modului pe dispozitive optice integrate și/sau fibre optice. Posibilitatea de a utiliza o singură configurație, în loc de trei separate, permite măsurători mai rapide, îmbunătățiri în ceea ce privește reproductibilitatea și precizia, precum și reducerea erorilor sistematice.

În egală măsură, în acest capitol sunt prezentate problemele care pot apărea în timpul fabricării domeniilor feroelectrice inversate periodic, cum ar fi cinetica anormală a inversiei domeniilor sau formarea auto-organizată de nanodomenii cvasi-regulate. Cele două studii care abordează această problemă sunt foarte importante atât pentru înțelegerea evoluției unei structuri de domenii cu rezoluție spațială mare, cât și pentru crearea unor structuri de domenii la scară nanometrică cu geometrie controlată, care încă reprezintă o problemă încă de actualitate în ingineria domeniilor feroelectrice.

După cum s-a spus mai sus, aproape pentru toate aplicațiile optice neliniare, provocarea este de a oferi configurații integrate ușor de implementat, cu pierderi de propagare reduse, eficiență ridicată, stabilitate, robustețe și, dacă este posibil, compactitate și consum redus de energie. Elementul principal al aproape tuturor aplicațiilor și dispozitivelor optice integrate, esențial pentru îndeplinirea acestor cerințe, este așa-numitul ghid de undă optică (OWg). Chiar dacă de zeci de ani fabricarea ghidurilor de undă optice a făcut obiectul unor studii de cercetare extraordinare, tehnicile actuale rămân insuficiente pentru a satisface cerințele fotonicii integrate moderne – pierderi reduse la propagare, contrast de indice ridicat pentru un grad înalt de confinare spațială, eficiență neliniară ridicată, stabilitate și robustețe, dimensiuni reduse a dispozitivului, consum redus de energie etc. În acest context, am propus și validat experimental pentru prima dată, din câte știm, faptul că diminuând cât mai mult conținutul de apă al băii acide utilizate în schimbul protonic conduce la noi tehnici de fabricare, numite High Vacuum Proton Exchange (HiVacPE) și, respectiv, High Vacuum Vapor-phase Proton Exchange (HiVac-VPE). Aceste noi tehnici sunt foarte promițătoare, oferind o soluție ce răspunde direct tuturor cerințelor fotonicii integrate moderne. Rolul vidului înalt în tehnicile de schimb de protoni a fost foarte bine descris într-un studiu în care a fost validat experimental controlul și reproductibilitatea excelentă a contrastului de indice și a profilului indicelui ghidurilor de undă optice.

Eforturile tehnologice privind fabricarea OWg în LN pentru aplicații NLO sunt orientate către pierderi mici de propagare, urmărind în același timp cel mai mare contrast de indice de refracție fără a degrada eficiența neliniară și, desigur, o compatibilitate cu substraturile PPLN. Cu toate acestea, cunoașterea contrastului de indice (IC) la lungimile de undă pentru telecomunicații nu este simplă. Pentru a găsi un răspuns acestor probleme, s-a realizat un studiu în care se propune și se testează o nouă metodă hibridă (experimentală și numerică) pentru a determina IC la 1310 nm și 1550 nm a unor ghiduri de undă în niobat de litiu cu IC mic, prin fitarea profilurilor modurilor optice obținute experimental cu cele simulate

prin Metoda Elementelor Finite. Această nouă metodă originală și foarte utilă poate fi utilizată pentru toate ghidurile de undă cu profil de indice de tip gradient ce posedă un IC mic și pentru care propagarea de tip monomodal nu permite utilizarea tehnicii M-lines care necesită o propagare de tip multi-modal.

Ghidurile de undă fabricate pe substraturi de niobat de litiu cu domenii feroelectrice inversate periodic (PPLN) sunt deja unul dintre cele mai utilizate dispozitive pentru numeroase aplicații optice neliniare bazate pe procesul de cvasi-acord de fază (QPM). Un proces neliniar eficient, cum ar fi generarea a armoniciei a doua (SHG), conversia parametrică spontană (SPDC) sau diferite alte variante de conversie a frecvenței optice, necesită, printre altele, tehnici de fabricare a ghidurilor de undă care să permită păstrarea cât mai puțin alterată atât a coeficientului neliniar, cât și a orientării domeniilor feroelectrice a substratului. Ghidurile de undă în fază  $\alpha$  produse direct într-o singură etapă de fabricație sunt bine cunoscute pentru păstrarea atât a proprietăților neliniare excelente, cât și a orientării domeniilor feroelectrice ale substraturilor de niobat de litiu. Cu toate acestea, prin utilizarea microscopiei cu forță piezoelectrică (PFM), dr. Sorin Tascu și colaboratorii arată într-un studiu că există o inversie a dipolilor feroelectrici indusă de procesul de fabricare a ghidurilor de undă în fază  $\alpha$  pe substraturi de niobat de litiu. Rezultatele obținute arată că procesul de schimb de protoni induce o inversare spontană a polarizării și o reducere a coeficientului piezoelectric  $d_{33}$ .

Un alt studiu prezentat în acest capitol este consacrat rezultatelor obținute prin investigarea unui divizor de fascicule de bandă largă care permite separarea la ieșire în două fascicule în fază independent de dispersiile lungimilor de undă. Acest cip fonic integrat a fost implementat folosind ghiduri de undă optice la lungimi de undă telecom fabricate pe niobat de litiu folosind tehnica HiVacPE.

Finalul acestui capitol este dedicat unui studiu ce arată cum structurile PPLN, divizoarele de fascicul, cuploarele și electro-modulatoarele au fost exploatate simultan pe un cip LN monolitic pentru a genera stări de doi fotoni configurabile. Acest cip pune laolaltă cinci elemente integrate diferite pentru a permite producția succesivă de perechi de fotoni, demultiplexarea lungimii de undă a perechilor și interferența cu doi fotoni folosind un cuplaj reglabil. Fiecare funcție optică a cipului prezintă performanțe de nivel înalt în ceea ce privește pierderile și eficiența. Configurația monolitică asigură stabilitate ridicată, consum redus de energie și tensiune de funcționare scăzută. Acest studiu este un exemplu autentic al modului în care optica neliniară integrată este în serviciul comunicațiilor cuantice.

Ultimul capitol este dedicat celor mai importante realizări, în cadrul activităților de cercetare, care au marcat traiectoria profesională a autorului începând cu anul 2003, precum și perspectivele de dezvoltare a carierei, cu accent pe unele dispozitive noi bazate pe conversie parametrică spontană într-o configurație contrar-propagativă de tip-0 (SPDC) în ghiduri de undă fabricate pe substraturi de niobat de litiu polarizat periodic (PPLN/Ws), în care unda semnal și unda complementară se propagă coliniar dar în direcții opuse.