

UNIVERSITATEA DIN BUCUREȘTI Facultatea de Fizică Școala Doctorală de Fizică



Gabriela SALAMU (CROITORU)

CONFIGURAȚII DE LASERI CU CORP SOLID MINIATURALI UTILIZÂND MEDII COMPOZITE ȘI GHIDURI DE UNDĂ

-Rezumatul tezei de doctorat-

Conducător științific dr. Traian DASCĂLU

București, 2018

INVITAŢIE

Sunteți invitat(ă) în data de 17.12.2018, ora 14³⁰, în Amfiteatrul A1 al Facultății de Fizică, să participați la susținerea publică a tezei de doctorat cu titlul: CONFIGURATII DE LASERI CU CORP SOLID MINIATURALI UTILIZÂND MEDII COMPOZITE ȘI GHIDURI DE UNDĂ GABRIELA SALAMU (CROITORU) Comisia este formată din: Prof. Univ. Dr. Daniela DRAGOMAN Presedinte: Facultatea de Fizică, Universitatea din București Conducător CŞ. I Dr. Traian DASCĂLU stiințific: Institutul Național pentru Fizica Laserilor, Plasmei și Radiației Conf. Univ. Dr. Mihai Dincă Membri: Facultatea de Fizică, Universitatea din București **CŞ. I Dr. Marian Zamfirescu** Institutul Național pentru Fizica Laserilor, Plasmei și Radiației Prof. Univ. Dr. Alexandru Lupaşcu Universitatea Politehnica Bucuresti

CUPRINS

Introduc	ere		1
Capitolul	1: Fu	undamente teoretice ale sistemelor laser. Generalități	6
1.1	Mediul	amplificator	6
1.2	Rezona	atori optici	7
1.3	Proces	e de pompaj	8
1.4	Sistem	e laser în undă continuă	12
1.5	Sistem	e laser în regim pulsat	14
Capitolul	2: M	ediul amplificator. Configurația de tip compozit și ghid de undă	17
2.1	Materi	ale compozite	17
2.2	Geome	etrii pentru ghidarea fasciculului de pompaj	18
2.3	Geome	etrii pentru ghidarea fasciculului laser	20
Capitolul	3: La	seri. Rezultate experimentale pentru noi geometrii specifice	25
3.1 putere	Laser c în dom	ompozit Nd:YAG/Cr ⁴⁺ :YAG de tip ceramic pentru generarea de radiație laser de mai eniul vizibil la 532 nm	re 25
3.2	Laser N	Id:YAG pompat lateral prin prismă YAG cu funcționare în regim de pulsuri	29
3.3	Laser N	Id:YAG de tip "lentilă disc subțire" pompat lateral	32
3.4 femtos	Laseri o secunde	de tip ghid de undă realizați prin scriere directă cu fascicul laser cu durată de ordinu Ior	ıl 34
Capitolul	4: Co	oncluzii generale	53
ANEXA 1	. Lista de	e lucrări a autoarei	57
Bibliogra	fie		65

Introducere

Generarea radiației laser la lungimi de undă care acoperă o mare parte din spectrul electromagnetic și care funcționează atât în regim de undă continuă cât și în regim pulsat, oferă o bază solidă pentru dezvoltarea unor aplicații laser inovatoare în domenii de o varietate extraordinară. Curând după prezentarea primului laser în 1960, oamenii de știintă au pornit o cursă contracronometru pentru dezvoltarea laserilor investigând medii active specifice fiecărei stări de agregare a materiei, dezvoltând noi metode de creștere a puterii, energiei, strălucirii pulsurilor laser. În tot acest timp, aplicațiile care implică utilizarea fasciculelor laser au devenit din ce în ce mai numeroase și mai diverse. De exemplu, radiația laser s-a dovedit a fi foarte utilă în domeniul industrial, deoarece poate fi utilizată atât ca instrument de tăiere, gravare, lipire cât și în procesele de microprelucrare cu precizie ridicată fără să introducă impurități întrucât se evită contactul obiectului prelucrat cu un alt obiect. În domeniul medical laserul are deja aplicații bine stabilite (oftalmologie LASIK, chirurgie noninvazivă a articulațiilor, litotripsie, fototerapie) si sunt în curs de aprobare multe instrumente care adresează tratamente laser la nivel celular prin livrarea medicamentelor într-o regiune specifică, microchirurgie, etc. Mai mult, laserii sunt utilizați la scală largă ca surse de radiație în aplicații spectroscopice, în securitate, în comunicații si lista posibilelor aplicatii poate continua.

La aproape 60 de ani de la inventarea sa, laserul susține domenii industriale consacrate și creează premisele deschiderii de noi domenii, de exemplu fabricarea aditivă. Toate aceste tehnologii se bazează pe modul în care fasciculul provenit de la sistemul laser interacționează cu materialul în cauză. Interacția poate fi realizată prin procese liniare sau neliniare, efecte termice sau procese rezonante, totul depinzând de setul de parametri ce caracterizează fasciculul laser (energie/putere, strălucire, durată, frecvență, rată de repetiție, bandă, distribuția intensității, polarizare, calitatea fasciculului, fluctuație spațiu/timp, coerență temporală, coerență spațială).

De aceea, în funcție de aplicația în care laserul urmează a fi implementat este necesară identificarea și optimizarea parametrilor care pot fi modificați pentru ca interacția dintre radiația laser și materialul în cauză să fie un proces eficient. Numărul mare de parametri controlați are ca și consecință directă creșterea gradului de complexitate al acestor laseri și, prin urmare, aplicarea lor în diverse tehnologii industriale, în conditii de fiabilitate ridicată, trebuie bine analizată.

Utilizarea laserilor în mediul industrial implică funcționarea lor în condiții de mediu dificile: variații mari de temperatură, vibrații mecanice, praf, interferențe cu câmpuri electrice sau magnetice și altele. În același timp, acești laseri trebuie să prezinte fiabilitate ridicată iar costurile de producție să rămână la un nivel scăzut.

Pentru a satisface toate aceste cerințe, se impune configurarea sistemului laser în concordanță cu cerințele specifice aplicației. În primul rând, este un proces care trebuie realizat simultan pe mai multe planuri. De exemplu, alegerea mediului amplificator este efectuată în funcție de proprietățile sale spectroscopice (eficiența de absorbție a pompajului, eficiența de emisie laser, eficiența cuantică, etc.), nivelul de concentrație al ionilor dopanți și modul în care sunt distribuiți în materialul-gazdă, proprietățile termo-mecanice, calitatea optică a mediului care, la rândul său, reprezintă un factor foarte important și, bineînteles, costurile. Mai departe, generarea oscilației

laser la o anumită lungime de undă precum si controlul calității fasciculului laser se realizează prin introducerea mediului amplificator într-o cavitate rezonantă. Caracteristicile acoperirilor dielectrice pentru elementele optice care formează rezonatorul laser reprezintă un aspect important deoarece în funcție de caracteristicile acestora poate fi mărită eficiența cu care este extrasă radiația laser din cavitate. În procesul de selecție al elementelor optice se ia în considerare și modul de operare al laserului având în vedere că funcționarea în regim pulsat implică utilizarea de acoperiri cu prag de distrugere laser mult mai ridicat decât în cazul funcționării în regim de undă continuă. De asemenea, calitatea fasciculului laser, diametrul fasciculului, divergenta, lărgimea de bandă a liniei de emisie laser sunt caracteristici determinate de tipul cavității rezonante în care este introdus mediul amplificator, deoarece în funcție de proprietățile și aranjamentul componentelor care alcătuiesc rezonatorul pot fi selecționate atât modurile laser transversale cât si cele longitudinale. Este de la sine înteles că stabilitatea sistemului laser în condiții de lucru industriale este foarte importantă și, prin urmare, proiectarea și execuția componentelor mecanice trebuie să fie de o calitate excelentă. Un alt aspect în ceea ce privește optimizarea parametrilor de lucru ai laserului este procesul de pompaj în mediul amplificator. Alegerea tipului de pompaj se realizează în funcție de o serie de repere: eficiența maximă, durata de viață ridicată, dimensiuni, complexitate și costuri. Se precizează că un element definitoriu atunci când se dorește dezvoltarea unui sistem laser pentru aplicații industriale îl reprezintă modul de lucru al laserului: în undă continuă sau în regim pulsat (utilizare de pulsuri laser cu durată de timp cu ordine diferite ns, ps, fs, etc.). Modul de lucru este selectat în funcție de tipul interacției dintre radiația laser și material: interacție de natură termică (laseri în undă continuă sau pulsuri laser de ordinul µs), fenomene de absorbție neliniară, ablație, generare de câmpuri electromagnetice ultraintense, etc.

În prezent, pentru aplicațiile industriale care necesită niveluri mari de putere sunt utilizați atât laserii cu CO_2 cât și laserii cu fibră optică sau cu mediu activ în stare solidă. Laserii cu CO_2 pot genera emisie laser în regim de undă continuă cu puteri de ordinul a sutelor de kW și pulsuri cu putere de vârf de ordinul GW la lungimi de undă de 10 µm cu o calitate foarte bună a fasciculului laser. Laserii cu fibră sunt utilizați deoarece sunt capabili să furnizeze fascicule cu divergență foarte scăzută și niveluri de putere de ordinul zecilor de kW la lungimi de undă de 1-2 µm. Laserii cu medii active în stare solidă acoperă lungimi de undă într-un domeniu larg (0.5-6 µm) și funcționează atât la puteri medii ridicate cât și în regim de pulsuri ultrascurte.

În toate cazurile, efectele termice din mediul activ laser sunt considerabile iar eliminarea căldurii generate în mediul amplificator trebuie gestionată cu multă atenție, în caz contrar nivelul de putere al emisiei laser este mult sub potential. Pentru a depăși aceste limitări a fost necesară o înțelegere a ansamblului parametrilor care influențează emisia laser și, în funcție de tipul aplicației, optimizarea acelora care sunt importanți în situația dată. De exemplu, restrângând discuția la domeniul laserilor cu mediu activ solid, au fost construiți laseri cu diferite geometrii care includ medii active laser de tip bară, disc subțire sau placă. Fiecare are altă distribuție și curgere a căldurii generate prin defect cuantic- diferența dintre energia fotonilor absorbiți și a celor emiși- care influențează calitatea fasciculului laser. Alegând cu atenție modul în care se

realizează laserul putem obține fascicule laser în undă continuă sau pulsată, cu o distribuție gausiană a intensității, la puteri medii de ordinul sutelor de watti, cu eficiență totală de peste 30%.

Pentru aplicațiile care necesită câmpuri electromagnetice foarte intense s-au dezvoltat sisteme laser cu funcționare în regim de blocare în fază a modurilor laser, cu medii active în stare solidă, care generează radiație cu putere de vârf de ordinul TW sau PW.

Scopul Lucrării

În cadrul acestei teze de doctorat se urmărește rezolvarea unor probleme care ar putea duce la realizarea unor laseri miniaturali, robuști ce funcționează în medii dificile cum ar fi vibrații mecanice, temperaturi ridicate, etc. Obiectivul principal al lucrării îl reprezintă realizarea unor laseri cu medii amplificatoare în stare solidă, în configurații miniaturale sau compacte, care furnizează radiație laser cu niveluri de putere de ordinul W, kW sau MW în domeniul infraroșu apropiat și vizibil al spectrului electromagnetic. Soluțiile prezentate în teză sunt rezultatul analizei extinse și corelate asupra tuturor elementelor laserului: mediul amplificator (formă, dimensiuni, tipul și concentrația ionilor activi, tipul materialului-gazdă), tipul de pompaj corelat cu forma mediului activ și cu caracteristicile sursei de pompaj, a tipului de comutator al factorului de calitate, a sistemului de extragere al căldurii generate, etc.

În lucrarea de față sunt prezentate rezultatele obținute în dezvoltarea mai multor tipuri de configurații laser compacte fiecare având o geometrie specifică, destinată unei anumite aplicații. Elementele comune ale acestor configurații sunt: mediul activ în stare solidă și pompajul realizat cu diode laser cuplate la fibre optice, miniaturizarea, eficiența ridicată.

Prima configurație analizată conține un mediu activ compozit Nd:YAG/Cr4+:YAG de tip ceramic, de formă cilindrică. Folosind acest mediu a fost proiectat și construit un laser care generează un fascicul laser de putere mare la lungimea de undă fundamentală 1064 nm sau, prin intermediul procesului neliniar de generare a armonicii a doua, fascicul laser la 532 nm. În cadrul acestei geometrii, am utilizat ca sursă de pompaj o diodă laser cu emisie la 807 nm. Radiația de pompaj a fost cuplată într-o fibră optică și direcționată către mediul laser folosind două lentile poziționate astfel încât fasciculul de pompaj să fie focalizat în mediul activ. În acest fel, pompajul este realizat în mod longitudinal. Cerințele de realizare ale unui rezonator optic robust și de miniaturizare a laserului ne-au condus la adoptarea unei soluții tehnologice moderne, oglinzile rezonatorului sunt depuse direct pe fetele mediul activ prelucrate în mod special pentru a asigura un paralelism perfect. În final, a rezultat un mediu activ-rezonator optic cu o lungime de 10 mm din care au fost obtinute pulsuri laser la 1064 nm, cu durata de \sim 1 ns si putere de vârf de ordinul MW. Apoi, prin procesul de dublare în frecventă a fost generată emisie laser la 532 nm. Ca urmare a performanțelor obținute, acest laser a fost integrat în mai multe aplicații. De exemplu, el poate fi utilizat ca înlocuitor al sistemului de aprindere convențional (electric) în motoarele cu ardere internă. Laserul livrează un fascicul cu nivel de putere de vârf de ordinul MW care, dacă este focalizat adecvat, poate provoca fenomenul de aprindere al mai multor tipuri de amestecuri sărace aer-combustibil (benzină, motorină, gaz, etc.) cu efecte excelente asupra

creșterii eficienței și a reducerii noxelor. De asemenea, prin intermediul proceselor neliniare de generare a armonicilor superioare, pot fi livrate fascicule laser în domeniul vizibil la mai multe lungimi de undă. Astfel de laseri se pot dovedi a fi utili în procesarea materialelor care sunt transparente la 1064 nm sau în spectacolele de proiecție ca surse de lumină în culorile fundamentale.

A doua configurație constă în utilizarea unui mediu activ laser compozit Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG de tip ceramic care are formă paralelipipedică. Și în acest caz, pompajul este realizat cu diodă laser la 807 nm. Pe suprafața mediului activ este atașată o prismă triunghiulară din același material (YAG), dar care nu conține ioni dopanți în compoziția sa chimică. Rolul acesteia este de a direcționa fasciculul provenit de la fibra optică către mediul laser și, prin fenomenul de reflexie totală internă, radiația de pompaj este confinată și absorbită eficient în mediul Nd:YAG. În acest fel, linia de focalizare este eliminată complet. De asemenea, dimensiunile sistemului sunt reduse considerabil datorită faptului că este utilizat un mediu activ compozit. În plus, cavitatea rezonantă este realizată prin acoperirea suprafețelor laterale ale mediului compozit cu straturi dielectrice. Au fost generate pulsuri laser la 1064 nm, cu durata de ~10 ns și putere de vârf de ordinul kW.

Cea de-a treia configurație conține un mediu compozit Nd:YAG/YAG de tip ceramic care are forma unui disc subțire. Mediul activ este un material compozit de tip ceramic compus dintro zonă centrală de YAG dopată cu Nd înconjurată de o regiune de YAG nedopat. Acesta este prelucrată pentru a forma o lentilă plan-concavă cu zona centrală dopată având o grosime de sub 200 microni iar la margine având ceva mai mult decât diametrul fibrei optice de pompaj. Prin atașarea directă a fibrelor optice pe marginea lentilei se obține un pompaj eficient și uniform al zonei dopate cu ioni de Nd. Pe suprafața plană a acestui mediu activ compozit este depusă oglinda dielectrică cu reflectivitate mare peste care este atașată o suprafața metalică răcită. Beneficiul adus de conceptul "disc subțire" este de faptul că raportul dintre suprafața de răcire și volumul mediului activ este foarte mare, lentila termică este redusă deoarece extracția căldurii generate în mediul activ este realizată longitudinal față de direcția de propagare a fasciculului laser. Folosind această configurație a fost demonstrată emisie laser cu puteri de vârf (în regim pulsat relaxat) de ordinul 1 kW la lungimea de undă 1064 nm pentru pompaj realizat cu diodă laser la lungimea de undă 807 nm.

În următoarea configurație, emisia laser este generată în structuri tip ghid de undă realizate în mediul activ prin modificarea locală a valorii indicelui de refracție realizată prin focalizarea unui puls laser cu durată foarte scurtă (fs) în volumul materialului. Structurile sunt obținute prin translația fascicului laser pe toată lungimea mediului activ. Folosind această tehnică pot fi realizate structuri tip ghid de undă în diferite forme, adică: structuri cu doi pereți, compuse din două linii paralele cu distanța de zeci de microni între ele, sau structuri mai complexe unde modificările sunt realizate astfel încât acestea să aibă formă circulară (diametru maxim de 100 μ m), eliptică sau pătrată. În cazul mediilor active în care nu au fost induse variații ale indicelui de refracție, modul laser este stabilit în funcție de proprietățile optice ale cavității rezonante, de volumul în care are loc inversia de populație și de proprietățile termice ale mediului activ. Pentru laserii tip ghid de undă, modul de pompaj și modul laser condiționate de forma și dimensiunile ghidului de undă. Modul laser nu se mai stabilește liber în mediu ci doar în interiorul ghidului. Acest tip de laseri a fost construit cu scopul de a fi utilizat în domeniul optoelectronicii ca surse de radiație sau ca sisteme amplificatoare foarte compacte pentru radiația în infraroșu.

Mai departe, sunt prezentate caracteristicile optice ale structurilor de tip ghid de undă realizate în mai multe medii active laser, cum ar fi: materiale monocristaline de Nd:YAG, materiale ceramice de Nd:YAG, materiale monocristaline de Nd:YVO₄ și materiale compozite Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG de tip ceramic. Aceste structuri au fost realizate folosind două metode diferite de poziționare a zonei de interacție laser-material: metoda de scriere "pas cu pas" și metoda "helicoidală". Cu ajutorul acestor două tehnici au fost realizate în mediul activ structuri de tip ghid de undă cu forme și dimensiuni variate.

Structurile tip ghid de undă au fost integrate în cavități rezonante pentru a obține emisie laser în infraroșu, la 1064 nm sau 1.3 μ m, și au fost studiate performanțele laser prin comparație cu emisia laser de la mediile active convenționale ("bulk"). Am demonstrat că există o serie de avantaje care motivează utilizarea laserilor tip ghid de undă în anumite aplicatii.

Teza de doctorat este structurată astfel:

În Capitolul 1 sunt prezentate în detaliu aspectele teoretice privind laserii cu medii active în stare solidă. Inițial, sunt descrise fenomenele generale ce stau la baza funcționării unui sistem laser ca urmare a interacției radiației electromagnetice cu materia. Apoi, sunt precizate tipurile de procese de pompaj care pot fi utilizate pentru a genera emisie laser. Mai departe, sunt descrise regimurile de funcționare ale unui sistem laser.

Capitolul 2 descrie tehnicile de fabricare ale mediului amplificator. În acest capitol este introdus conceptul de mediu compozit activ laser și este prezentat rolul său în emisia laser în sisteme miniaturale. Apoi, sunt prezentate diverse geometrii pentru ghidarea fasciculului de pompaj în mediul activ laser.

Capitolul 3 cuprinde rezultatele experimentale pentru geometriile realizate. În primul rând, este prezentat modul de realizare al unui laser compozit Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG de tip ceramic pentru generarea de radiație laser de putere mare în domeniul infraroșu la 1064 nm și vizibil la 532 nm. Apoi, sunt expuse performanțele laser ale sistemelor ce întrebuințează materiale compozite cristaline și policristaline de tip mediu activ/cuplare și propagare tip ghid de undă a radiației de pompaj. De asemenea, sunt raportate rezultatele privind performanțele laser ale laserilor tip ghid de undă în comparație cu cele obținute de la laserii convenționali.

În final, în Capitolul 4, sunt prezentate concluziile generale și perspectivele studiilor de cercetare descrise în această teză.

Fiecare capitol conține referințe bibliografice iar la finalul tezei se găsește o anexă, în care este prezentată lista de lucrări a autoarei.

Capitolul 1: Fundamente teoretice ale sistemelor laser. Generalități

1.1 Mediul amplificator

Amplificarea radiației laser poate fi realizată într-o varietate de materiale: medii lichide, gazoase, de tip semiconductori sau solide (sticle, medii cristaline și ceramici). Toate aceste materiale sunt sisteme care conțin o colecție de atomi, ioni sau molecule.

În cadrul acestei teze vor fi utilizate două tipuri de materiale ca medii amplificatoare: Nd^{3+} :YAG (cristal sau material de tip ceramic) și Nd^{3+} :YVO₄ (cristal). Granatul de yttriu și aluminiu (Y₃Al₅O₁₂–YAG) este un cristal transparent care poate fi crescut prin metoda Czochralski. Procesul de amplificare se realizează dacă sunt introduși ioni de Nd (Nd³⁺) în rețeaua cristalină a YAG-ului. Acești ioni se introduc ca impurități în timpul creșterii și substituie ionii Y³⁺. În general, sunt utilizate cristale cu concentrația atomică de Nd de ordinul 1.0–1.5% sau mai mică. Nivelurile de concentrație mai ridicate ar avea ca efect scurtarea timpului de viață al nivelului laser sau lărgirea liniei de emisie, ce ar cauza tensiuni în cristal (calitate optică slabă). Pentru a îmbunătăți performanțele unui laser este necesară o abordare complexă deoarece există foarte mulți parametri care sunt luați în considerare, unul dintre aceștia fiind concentrația ionului dopant.

În funcție de configurația laser în care urmează să fie introdus mediul amplificator, cristalele de Nd: YAG sunt tăiate în diferite forme: tije cilindrice, dreptunghiulare sau plăci subțiri și pot fi pompate fie cu lămpi cu descărcare în gaz, fie cu diode laser. Cristalul de Nd: YAG este unul dintre cele mai importante medii active în stare solidă pentru aplicații științifice, medicale, industriale și militare datorită câștigului ridicat și al proprietăților termice și mecanice bune.

Nd:YAG se utilizează în mod obișnuit sub formă de monocristal, fabricat prin metoda de creștere Czochralski, dar există și Nd:YAG de tip ceramic (policristalin). Materialele policristaline prezintă interes mare datorită avantajelor remarcabile pe care le posedă în comparație cu materialele laser monocristaline. Astfel, procesul de fabricare este mai flexibil, adică este posibilă creșterea concentrației de ioni dopanți (cum ar fi ionii de pământuri rare) în material și în același timp menținerea uniformității compoziției, spre deosebire de materialele monocristaline. De asemenea, au fost fabricate materiale ceramici cu dimensiuni foarte ridicate în comparație cu materialele monocristaline obținute prin metodele tradiționale de creștere.

Al doilea material utilizat în studiile experimentale realizate în cadrul acestei teze este cristalul de vanadat de yttriu (YVO₄). În acest material, fenomenele de absorbție și emisie sunt polarizate. Ca și în primul caz, se utilizează ca material dopant ionul de Nd³⁺. Pentru Nd:YVO₄, lungimea de undă tipică a emisiei laser este de 1064 nm, adică aceeași ca și pentru Nd:YAG. Alte lungimi de undă importante pentru emisie sunt 914 și 1342 nm. Ultima linie de emisie este mult mai puternică decât linia de la 1.32 µm în Nd:YAG, permițând astfel o performanță mult mai bună pentru operarea la 1.3 µm.

În comparație cu Nd:YAG, Nd:YVO₄ prezintă absorbție și câstig mai mare (datorită faptului că secțiunile corespunzătoare celor două procese sunt foarte mari), lărgime de bandă a căștigului de 1 nm, timp de viață al nivelului laser mai scurt $\approx 100 \ \mu s$, indice de refracție mai mare și

birefringență naturală. Toate aceste caracteristici au consecințe directe asupra performanțelor laser la ieșire.

Atunci când emisia laser este generată în undă continuă, laserul cu Nd: YVO_4 are performanțe similare cu cele ale Nd:YAG. În timp ce proprietățile termice ale cristalului Nd: YVO_4 sunt mai slabe, coeficientul de temperatură al indicelui de refracție este mai mic, astfel încât efectul de lentilă termică nu este mai puternic. Datorită eficienței ridicate a câștigului, puterea de pompaj la prag este foarte scăzută pentru emisia laser.

Nd:YVO₄ este potrivit pentru laseri care generează pulsuri laser prin metoda mode-locking cu rate înalte de repetiție, de ordinul MHz sau GHz. Această caracteristică rezultă în principal datorită faptului că secțiunile pentru emisia laser și absorbție au valori ridicate.

Pentru laserii care funcționează în regim de Q-switch, Nd:YVO₄ nu permite energii ale pulsurilor la fel de mari ca și pentru Nd:YAG, deoarece capacitatea de stocare a energiei este mai mică decât cea a Nd:YAG-ului datorită timpului de viață al nivelului laser mai scurt și eficienței ridicate a câștigului.

1.2 Rezonatori optici

În cele ce urmează se va discuta felul în care se propagă fasciculul de fotoni emiși în spațiul liber sau într-un mediu cu indicele de refracție definit.

Interferometrul Fabry-Perot cu mediu activ laser

Dacă se plasează un mediu amplificator în interiorul unui interferometru Fabry-Perot atunci radiația electromagnetică care se propagă între cele două oglinzi este amplificată. Se introduce factorul de câștig G care definește amplificarea radiației după o trecere în mediu. Atunci transmisia maximă va fi:

$$T_{max} = \frac{(1-R_1)(1-R_2)GV}{\left(1-\sqrt{R_1R_2}GV\right)^2}$$
(1.35)

Lărgimea de bandă (FWHM) devine:

$$\delta \nu = \left| ln(\sqrt{R_1 R_2} G V) \right| \frac{c}{2\pi L} \tag{1.36}$$

Domeniul spectral liber și frecvențele de rezonanță nu se modifică.

Dacă factorul *G* este ales astfel încât este îndeplinită condiția $\sqrt{R_1R_2}GV = 1$ atunci putem spune că interferometrul Fabry-Perot este un rezonator laser.

În funcție de aplicațiile în care urmează a fi utilizate, pot fi construiți rezonatori laser care să permită oscilația unui singur mod longitudinal sau a mai multor moduri. Există diferite metode utilizate pentru a varia sau, mai bine zis, pentru a controla numărul modurilor longitudinale întrun rezonator laser. Astfel, pentru a mări numărul de moduri longitudinale care oscilează se poate modifica lungimea cavității rezonante: dacă se dublează lungimea acesteia atunci se dublează numărul de moduri ce se găsesc sub curba de câștig a mediului activ laser.

Am stabililit că interferometrul Fabry-Perot în care este introdus un mediu amplificator este un rezonator laser (sau oscilator laser). Acest interferometru este configurația cea mai simplă a unui rezonator optic. Dar, pot fi realizate foarte multe configurații pentru a construi un rezonator laser și nu neapărat doar cu două oglinzi.

1.3 Procese de pompaj

Mediile amplificatoare sunt considerate ca fiind un sistem în care se găsește o colecție de atomi, ioni sau molecule. Procesul prin care atomii unui sistem realizează o tranziție de pe un nivel de energie inferior pe niveluri energetice superioare se numește *pompaj*. Atunci când numărul de atomi excitați pe niveluri de energie ridicate depășește numărul de atomi aflați pe nivelurile inferioare se produce fenomenul de *inversie de populație*.

De-a lungul timpului au fost utilizate diverse medii pentru a obține efect laser și, în același timp, au fost dezvoltate mai multe metode de pompaj pentru a servi ca surse de radiație pentru astfel de medii active laser. Există trei tipuri de metode ce sunt utilizate în mod curent pentru sistemele laser: pompajul electric, pompajul chimic și pompajul optic.

În funcție de cerințele aplicațiilor în care urmează a fi implementate, construcția de sisteme laser cu medii amplificatoare în stare solidă implică realizarea de diverse configurații pentru transferul radiației de la o sursă la un mediu activ. Aceste arhitecturi diferă prin modul în care este orientat fasciculul de pompaj în raport cu direcția de propagare a fasciculului laser și in raport cu forma geometrică a mediului activ. De asemenea, ele diferă în funcție de direcția în care este extrasă căldura generată în mediul activ asociată procesului de pompaj și de direcția gradienților termici în raport cu cea a pompajului și a fasciculului laser.

Pentru pompajul cu diode laser, există mai multe tipuri de geometrii de pompaj: *pompajul longitudinal, frontal* (engl. *face pumping*), *prin muchie* (engl. *edge pumping*) sau *transversal*.

În cazul în care pompajul este realizat longitudinal, radiația este direcționată în mediul activ laser în lungul axei cavității rezonante folosind diverse elemente optice aditionale (lentile sau fibre optice) sau direct de la dioda laser. Valorile tipice pentru diametrul fasciculului de pompaj focalizat într-un mediu activ sunt de ordinul 100 μ m÷1 mm. Dacă radiația provenită de la dioda laser este livrată folosind fibre optice, atunci distribuția spațială a fasciculului este îmbunătățită și acesta este transformat într-un fascicul cu formă circulară și de dimensiuni mai mici. Gradul de divergență al fasciculului este dat de apertura numerică a fibrei: $NA = sin\theta_{fibra}$. Valorile tipice pentru această mărime se încadrează între 0.05 si 0.4, iar radiația emisă prezintă direcționalitate. În acest caz, dimensiunile secțiunii transversale ale mediului amplificator pot fi de ordinul milimetrilor sau chiar mai puțin, fapt care a permis realizarea de sisteme laser foarte compacte.

Configurația în care pompajul este realizat longitudinal prezintă o serie de avantaje. Primul, și poate cel mai important, este faptul că fasciculul laser la ieșire are calitate optică ridicată, adică distribuția transversală a acestuia este de tip Gaussiană. Un alt avantaj major este acela că pot fi dezvoltate sisteme laser în diverse configurații (rezonator de tip liniar cu două oglinzi sau cu mai multe oglinzi). Există o multitudine de aplicații în care sunt utilizate sisteme laser de dimensiuni cât mai reduse. Această cerință este realizată dacă se aplică mai multe măsuri. De exemplu, pot fi eliminate elementele de focalizare ale pompajului în mediul activ sau poate fi realizată o cavitate rezonantă mai scurtă prin depunerea de straturi dielectrice pe suprafețele laterale ale mediului. Dezavantajul principal pe care îl prezintă configurația de pompaj longitudinală este faptul că nivelul de putere la ieșire este limitat deoarece distribuția pompajului în material este neuniformă și, astfel, se creează efecte termice.

Geometria mediilor utilizate în acest tip de configurație poate fi de formă cilindrică sau rectangulară. În ambele, procesul de extragere al căldurii generate este realizat prin suprafața mai mare a mediului generând astfel un gradient termic radial. În urma creșterii temperaturii, indicele de refracție al mediului variază după același profil. Această modificare se produce datorită a trei efecte, și anume: dependența de temperatură a indicelui de refracție $\frac{dn}{dT}$, tensiunile mecanice induse termic și deformarea termică a mediului amplificator. Prin urmare, mediul activ se comportă ca o lentilă sferică cu distanța focală variabilă. Acest efect se numește *efectul de lentilă termică*.

Dacă se presupune că fluxul de căldură este de formă radială și mediul este de formă cilindrică, atunci distanța focală a lentilei termice este [1.1]:

$$f = \frac{\pi K_c w_p^2}{P_{ph} \left(\frac{dn}{dT}\right)} \frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)}$$
(1.2)

unde K_c este conductivitatea termică a materialului laser, w_p este talia fasciculului de pompaj, P_{ph} puterea de pompaj care este transformată în căldură, $\frac{dn}{dT}$ dependența de temperatură a indicelui de refracție, α coeficientul de absorbție al lungimii de pompaj, l lungimea mediului activ. Se observă că distanța focală a lentilei termice este direct proporțională cu w_p^2 și este invers proporțională cu puterea de pompaj. Adică, la niveluri ridicate ale puterii de pompaj distanța focală este foarte scurtă, deci nivelul de căldură generată este foarte mare. Acesta este motivul principal care contribuie la limitarea puterii laser la ieșire.

În general, diametrul mediului activ este de ordinul milimetrilor, iar fasciculul de pompaj este cuplat pe aceeași direcție cu fasciculul laser, ceea ce înseamnă că distanța dintre sursa de căldură și elementul de răcire este mare. Ținând cont de faptul că densitatea de putere de pompaj este foarte ridicată, diferența de temperatură dintre regiunea centrală și suprafața de răcire poate fi mai mare de 100 °C și are efecte negative asupra fasciculului laser la ieșire. Aceste efecte pot fi contracarate prin reducerea uneia din dimensiunile mediului (lungimea sau diametrul) sau proiectarea unei configurații în care pompajul este transversal față de direcția în care este extrasă căldura.

Una dintre soluții ar fi micșorarea lungimii mediului activ astfel încât să rezulte un *disc subțire* care este răcit pe o direcție axială cu cea a fasciculului laser. În acest caz, grosimea unui astfel de disc este, în general, mai mică de 1 mm, iar diametrul este cu un ordin de măsură mai mare. Dacă discul este montat pe un sistem de răcire prin punerea în contact cu una din cele două suprafețe, gradientul de temperatură va fi coliniar cu fasciculul laser și fluxul de căldură va fi considerat unidimensional. Prin urmare, efectele termice precum lentila termică și fenomenul de birefringență indusă termic vor scădea.

Suprafața mediului care intră în contact cu sistemul de răcire este utilizată, de asemenea, ca oglindă de pompaj prin depunerea de straturi dielectrice astfel încât să prezinte reflectivitate

ridicată la lungimea de undă de pompaj și laser. În schimb, oglinda de extracție este poziționată în exterior pe aceeași axă cu mediul activ. Laserii de tip disc subțire pot fi pompați utilizând mai multe tipuri de configurații, cum ar fi: configurație de *pompaj frontal*, *prin muchie* sau *transversal*.

Calculele teoretice efectuate arată faptul că procesul de scalare al puterii laser de ieșire nu este influențat de gradienții termici asociați cu creșterea nivelului puterii de pompaj. În schimb, dacă cavitatea rezonantă este optimizată astfel încât radiația de pompaj să efectueze mai multe treceri, densitatea puterii de pompaj poate fi mărită semnificativ fără a afecta calitatea optică a fasciculului laser la ieșire. Acest lucru poate fi realizat prin proiectarea unor arhitecturi care includ mai multe oglinzi sferice pentru reflexia multiplă a radiației de pompaj sau prin utilizarea simultană a mai multor medii de tip disc subțire care să permită propagarea pe o traiectorie de tip zig-zag a fasciculului de pompaj în mediile active.

Pe lângă avantajele expuse, sistemele laser cu disc subțire prezintă și dezavantaje. Cel mai important este complexitatea sistemului optic realizat pentru a facilita trecerile multiple ale pompajului. O alternativă ar fi proiectarea unei configurații fără oglinzi adiționale dar în care să se producă fenomenul de reflexie totală internă pentru creșterea eficienței de absorbție. Această condiție poate fi îndeplinită dacă se utilizează un mediu activ laser compozit și dacă pompajul este realizat prin muchia acestuia.

O altă modalitate de transfer a radiației de pompaj este pompajul transversal, unde radiația de pompaj este direcționată către mediul activ pe o direcție perpendiculară față de direcția de emisie a fasciculului laser și fată de direcția în care este realizat procesul de răcire. Avantajul acestui tip de aranjament este că, permite utilizarea surselor de pompaj cu coerență spațială scăzută dar care pot furniza niveluri ridicate de putere, cum ar fi lămpile cu descărcare în gaz sau diodele laser sub formă de bară. Mai mult, este posibil pompajul simultan cu mai multe surse de radiație pe toată suprafața longitudinală a mediului activ. Rezultatul acestui aranjament este faptul că puterea de pompaj absorbită este distribuită uniform în mediul laser. Prin urmare, efectele termice care apar în timpul emisiei laser sunt reduse considerabil, iar nivelurile de putere la iesire pot fi crescute până la două ordine de mărime fată de cele obținute atunci când pompajul este longitudinal. Proiectarea și realizarea pompajului lateral sau transversal într-un sistem laser prezintă și provocări care pot limita performanțele laser, și anume: volumul ocupat de către fasciculul de pompaj este foarte mare, fapt care permite oscilația simultană a mai multor moduri laser și, astfel, distribuția transversală a fasciculului laser nu este de tip Gauss. De asemenea, procesul de răcire al unui mediu amplificator în care pompajul este transversal este mult mai complicat deoarece suprafața laterală a mediului este utilizată atât pentru răcire cât și pentru introducerea fasciculului de pompaj.

În cazul pompajului transversal, mediul activ poate avea diferite forme: cilindrică (de tip "bară"), placă rectangulară sau disc subțire. Fiecare dintre aceste trei geometrii prezintă caracteristici avantajoase și sunt întrebuințate în aplicații în funcție de performanțele laser obținute. După cum a fost precizat anterior, mediile active de formă cilindrică au avantajul faptului că pot fi pompate simultan cu mai multe sisteme de pompaj.

Ţinând cont de faptul că tendința la momentul actual este de miniaturizare a sistemelor laser fără a afecta performanțele obținute sau calitatea fasciculelor laser la ieșire, există foarte multe raportări în literatură care prezintă sisteme laser realizate în diverse configurații. De exemplu, a fost realizat un sistem laser în care mediul activ este un material compozit de Yb:YAG/YAG cu grosime de 400 μm [1.2].

Dacă mediul activ este pompat transversal, distribuția fasciculului la ieșire nu este Gaussiană datorită efectelor termice asociate. De aceea, pentru a reduce aceste efecte au fost dezvoltate sisteme laser cu medii active care au formă de placă rectangulară. În acest caz, suprafața de răcire este mai mare și gradientul de temperatură se produce transversal pe grosimea acesteia. Direcția în care este realizat pompajul este aceeași cu cea în care este extrasă căldura, adică pompajul este dirijat în mediul activ prin cele două suprafețe, superioară și inferioară, care sunt menținute la o temperatură constantă. Dacă se consideră că pompajul este realizat uniform și că gradienții termici sunt semnificativi doar de-a lungul grosimii atunci variația temperaturii are profil parabolic și distanța focală a lentilei termice este de două ori mai scurtă decât cea corespunzătoare pompajului unui mediu activ cilindric. Gradienții de temperatură și tensiunile create în mediu sunt proporționale cu d^2 , unde d este grosimea plăcii, după cum urmează:

$$\Delta T = \frac{d^2}{8K_c}Q\tag{1.3}$$

$$\sigma_{max} = \frac{2\alpha_T E}{3(1-\vartheta)} \Delta T = \frac{\alpha_T E d^2}{12(1-\vartheta)K_c} Q \tag{1.4}$$

Q este căldura generată per unitate de volum, K_c conductivitate termică, α_T coeficient de expansiune termică, E modulul lui Young, ϑ coeficientul lui Poisson. Prin urmare, o placă rectangulară pentru care raportul dintre lățimea și grosimea este cât mai mare prezintă avantaje din punct de vedere termic. Dar, există o limită inferioară a grosimii d pentru care radiația de pompaj nu mai este absorbită eficient la propagarea acesteia prin mediu. Pentru a depăși această limitare, mediul poate fi introdus într-o incintă reflectătoare de pompaj care permite trecerile multiple ale radiației de pompaj prin mediu. Efectul de lentilă termică care apare într-un mediu de forma unei plăci rectangulare poate fi diminuat dacă fasciculul laser s-ar propaga în zig-zag și nu coliniar pe direcția de propagare prin intermediul fenomenului de reflexie totală internă. Acest lucru poate fi realizat dacă pe suprafețele superioară și inferioară sunt realizate depuneri dielectrice care să permită un grad de reflectivitate ridicat al fasciculului laser iar suprafețele laterale sunt tăiate la unghi Brewster. Ținând cont de toate aceste măsuri, rezultă că sistemele laser în care mediul activ este de forma unei plăci rectangulare cu grosime foarte mică sunt foarte dificil de realizat din punct de vedere tehnologic, iar efectele termice nu sunt reduse până la un nivel astfel încât calitatea optică a fasciculului la ieșire să fie cea dorită.

Cea de-a doua măsură care poate fi luată pentru a reduce influența efectelor termice asupra performanțelor laser la ieșire al sistemelor laser este reducerea diametrului mediului activ. În acest fel fasciculul de pompaj va fi absorbit eficient în mediu datorită procesului de reflexie totală internă și, în același timp, pompajul poate fi realizat în configurație longitudinală pentru a permite realizarea de sisteme laser foarte compacte.

1.4 Sisteme laser în undă continuă

Laserul construit de Maiman genera emisie în pulsuri în domeniul vizibil [1.3]. Ulterior au fost dezvoltate și sisteme cu emisie în undă continuă. Un sistem laser funcționează în regim de undă continuă dacă rata de pompaj și emisia laser sunt independente în timp. În schimb, generarea de pulsuri laser implică modularea în timp a pierderilor în cavitate sau a câștigului. Acest lucru poate fi realizat, de exemplu, dacă se introduce un element neliniar în rezonatorul laser.

Modul în care funcționează un sistem laser poate fi descris utilizând *ecuațiile de rată laser*. Aceste ecuații arată variația temporală a numărului de atomi care suferă o tranziție și a numărului total de fotoni care sunt creați sau anihilați într-un rezonator laser. În ciuda unor aproximații realizate pentru a deduce ecuațiile de rată, informațiile conținute de acestea sunt suficient de precise pentru a putea fi implementate în aplicații practice. Informațiile ajută la determinarea puterii de ieșire a unui sistem laser în undă continuă sau pentru caracterizarea pulsurilor laser generate prin metoda Q-switch.

Ecuațiile de rată vor fi deduse pentru două modele: laserul cu patru niveluri și cel cu trei niveluri. Principiul fundamental care stă la baza deducției acestor ecuații este acela că trebuie să existe o stare de echilibru în rezonatorul laser între atomii care suferă o tranziție și fotonii din rezonator.

Laserul cu patru niveluri. Mediile amplificatoare utilizate în sistemele laser reale prezintă foarte multe niveluri de energie. Pentru simplificare, se consideră doar nivelurile care au legătură cu procesul de pompaj și cel de emisie stimulată. De exemplu, cele două procese pot fi realizate dacă sunt implicate patru sau trei niveluri de energie.

Înainte de a descrie modelul de analiză, presupunem că în rezonatorul laser oscilează doar un singur mod longitudinal, iar densitatea radiației de pompaj și cea laser sunt uniforme în mediul activ și introducem parametrul ϕ care reprezintă numărul total de fotoni în rezonator. Dacă, de exemplu, există *n* moduri longitudinale, atunci ar trebui să scriem 2*n* ecuații pentru amplitudinea și faza câmpului fiecăruia dintre acestea. Prin urmare, putem scrie două ecuații cuplate sub forma [1.21]:

$$\frac{dN_2}{dt} = R_p - B\phi N_3 - \frac{N_3}{\tau}$$
(1.5a)
$$\frac{d\phi}{dt} = V_a B\phi N_3 - \frac{\phi}{\tau_c}$$
(1.5b)

În ecuația (1.5a), R_p este rata de pompaj. $B\phi N_2$ reprezintă termenul responsabil pentru fenomenul de emisie stimulată de fotoni. Ultimul termen include mărimea τ care reprezintă timpul de viață al nivelului laser superior luându-se în considerare atât procesele radiative cât și cele neradiative.

În ecuația (1.5b), termenul $V_a B \phi N_3$ include V_a care reprezintă volumul modului laser în mediul activ și este egal cu rata de creștere a fotonilor. Al doilea termen din partea dreaptă a ecuației reprezintă numărul fotonilor care ies din cavitatea rezonantă, unde τ_c este timpul de viață al fotonului în cavitatea rezonantă.

Pentru a rezolva cele două ecuații diferențiale, este necesar ca toți termenii să fie cunoscuți, mai exact expresia pentru termenul *B*, care reprezintă coeficientul de emisie stimulată per foton, per mod și timpul de viață al fotonilor în cavitate τ_c [1.4].

Știind că numărul de fotoni din cavitatea rezonantă este proporțional cu intensitatea fasciculului laser, atunci expresiile pentru B și τ_c sunt:

$$B = \frac{\sigma lc}{V_a L_e} = \frac{\sigma c}{V} \tag{1.15}$$

$$\tau_c = \frac{L_e}{\gamma c} \tag{1.16}$$

și $V = \frac{L_e}{l} V_a$, volumul modului în cavitate.

În final, după ce au fost deduse expresiile pentru parametrii necunoscuți, poate fi realizată o descriere completă a unui sistem laser cu 4 niveluri cu aproximațiile realizate inițial. Cu ajutorul ecuațiilor de rată poate fi caracterizată funcționarea sistemelor laser atât în undă continuă cât și în regim pulsat.

Acest set de ecuații are o formă simplificată pentru că nu s-a ținut cont de câteva aspecte care pot influența considerabil comportamentul real al sistemului. În primul rând, se presupune că fasciculul de pompajul și modul laser prezintă o distribuție uniformă în mediul activ. Prin urmare, modelul propus este un model spațial-independent, dar, în cazul oscilației în undă continuă, rezultatele obținute în acest caz sunt similare cu cele obținute în cazul modelului spațial-dependent.

Trebuie luat în considerare faptul că setul de ecuații este valabil strict pentru oscilația unui singur mod longitudinal. Pentru oscilația a n-a, astfel de moduri ar trebui utilizate în 2n seturi de ecuații. Și în această situație, modelul poate fi readus la o formă simplificată prin considerarea intensității totale a fasciculului ca fiind suma intensităților tuturor modurilor.

De asemenea, în cadrul modelului s-a presupus că inversia de populație în timpul emisiei laser nu variază cu coordonata longitudinală z în cavitatea rezonantă. În cazul în care inversia de populație este dependentă de această coordonată, atunci intensitățile fasciculului laser variază la fiecare trecere. Acest comportament a fost analizat în detaliu în 1965 de către Rigrod [1.5].

Însă, cel mai important este faptul că modelul poate fi aplicat doar pentru sisteme laser unde linia atomică corespunzătoare tranziției laser este lărgită prin mecanisme omogene. În caz contrar, fasciculul interacționează doar cu o fracție din populație și, astfel, curba câștigului saturat va prezenta o variație corespunzătoare cu valoarea frecvenței în cauză. Acest model prezintă rezultate diferite față de cel simplificat și a fost tratat în detaliu de către Casperson [1.6].

Dacă fluxul de fotoni este determinat, atunci poate fi evaluată valoarea puterii de ieșire a sistemului laser:

$$P_{out} = \left(\frac{\gamma_2 c}{2L_e}\right) (h\nu)\phi \tag{1.19}$$

Pe lângă sistemele laser cu patru niveluri există și sisteme cu trei niveluri de energie. De exemplu, primul sistem laser realizat în 1960 de către Maiman, și anume laserul cu rubin, este un un astfel de sistem.

(1.17)

1.5 Sisteme laser în regim pulsat

Pulsurile laser pot fi generate folosind mai multe metode. Una dintre ele este metoda de comutare a factorului de calitate în rezonator (sau metoda Q-switch). Cu ajutorul acestei metode pot fi generate pulsuri cu durate de timp de ordinul ns sau ps.

<u>Metoda Q-Switch.</u> După cum spune și numele, metoda constă în comutarea factorului Q de calitate al rezonatorului laser. Factorul Q este $Q = 2\pi\Delta\nu\tau = \frac{\nu}{\delta\nu}$, adică este raportul dintre frecvențele de rezonanță în rezonator și lărgimea de bandă a acestora. Din ecuație se observă că, dacă timpul de viață al fotonului în rezonator τ este lung atunci factorul de calitate este mare. O altă definiție a factorului este legată de stocarea energiei în rezonator: factorul Q este egal cu raportul dintre cantitatea de energie stocată și energia pierdută pe un ciclu de oscilație. Prin urmare, dacă factorul Q al unei cavități laser este schimbat brusc de la o valoare scăzută la o valoare ridicată, laserul va emite un puls cu o putere de vârf mult mai mare decât nivelul de putere obținut atunci când laserul funcționează în undă continuă.

Cu alte cuvinte, pierderile în rezonator sunt menținute inițial la un nivel mai ridicat astfel încât oscilația laser este împiedicată să apară. În acest timp, energia furnizată de către procesul de pompaj este acumulată în mediul amplificator, adică nivelul laser superior este populat (inversia de populație este la nivel maxim) și factorul Q este menținut la un nivel scăzut. Procesul este realizat dacă se introduce în rezonator un element adițional care să mențină nivelul de pierderi mare (Figura 1.2a) și avem situația "Q-switch închis". Dacă elementul este scos din rezonator, nivelul de pierderi scade (Figura 1.2c), factorul de calitate Q revine la o valoare mare iar energia stocată este cuplată sub forma unui puls laser prin oglinda de extracție cu transmisie parțială (Figura 1.2b). În acest caz, avem situația "Q-switch deschis".

Perioada de timp în care energia poate fi stocată în mediu este dată de caracteristicile intrinseci ale mediului activ laser, mai exact, de timpul de viață al nivelului laser superior, τ_f . Durata unui puls Q-switch depinde de o serie de parametri: în primul rând de tipul mediului activ laser și cantitatea de energie ce poate fi stocată, transmisia oglinzii de extracție și natura elementului adițional, nivelul pompajului, etc.

Există două tipuri de metode prin care se poate comuta factorul de calitate: *metoda activă și cea pasivă*. În cazul *metodei active*, pierderile sunt modulate folosind un element activ de control, de obicei un modulator acusto-optic sau electro-optic. Rata de repetiție a pulsurilor laser poate fi controlată de către modulator. Dacă nivelul pompajului rămâne constant, rata de repetiție crește dar energia pulsurilor scade.

Pentru *metoda pasivă*, pierderile sunt modulate folosind un mediu ce prezintă absorbție saturabilă la lungimea de undă corespunzătoare oscilației laser.

Un absorbant saturabil (SA) este un material al cărui coeficient de absorbție scade în timp ce intensitatea unui fascicul de radiație incident pe el crește. În termeni practici, se plasează în rezonatorul laser un material ce prezintă absorbție ridicată la lungimea de undă de emisie care are rolul de a modula pierderile în rezonator. Pe măsură ce densitatea de fotoni crește, materialul prezintă transmisie ridicată la lungimea de undă laser și, în acest fel, este generat un puls laser.



Figura 1.2. Schema de funcționare pentru metoda de comutare a fasctorului de calitate în rezonator.

Selecția materialului cu absorbție saturabilă este realizată în funcție de lungimea de undă a emisiei laser. De exemplu, cel mai popular material utilizat pentru sistemele laser cu emisie la 1 μ m este cristalul de Cr⁴⁺:YAG. În cazul emisiei la 1.3 μ m este folosit mediul de V³⁺:YAG [1.7] iar pentru emisia la 1.5 μ m sunt utilizate mediile de Cr²⁺:ZnS si Cr²⁺:ZnSe [1.8].

Cristalul de Cr⁴⁺:YAG, sau mai recent materialul ceramic de Cr⁴⁺:YAG, este o alegere foarte des întâlnită pentru generarea pulsurilor laser prin metoda Q-switch. Acest cristal prezintă benzi de absorbție largi centrate la lungimile de undă 410, 480, 640 si 1050 nm. Secțiunea eficace de absorbție este $\sigma_{gs} = 7 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ și $\sigma_{es} = 2 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ [1.9]. iar timpul de viață al nivelului E_2 este 4.1 μs și cel al nivelului E_4 este 0.5 ns.

Sistemele laser care intră în a doua categorie sunt sistemele care generează pulsuri laser foarte scurte prin *metoda mode-locking*. Cu ajutorul metodei mode-locking sunt generate pulsuri laser de durată foarte scurtă. Sunt considerate pulsuri cu durată foarte scurtă cele care se încadrează în intervalul de 100 ps până la 5 fs (1 fs= 10^{-15} sec). După cum este sugerat și de nume, metoda mode-locking este o tehnică cu ajutorul căreia pot fi generate pulsuri laser ultrascurte prin blocarea în fază a modurilor longitudinale în rezonator. Rezultă că durata pulsului va fi invers proporțională cu lărgimea de bandă a emisiei laser.

În concluzie, această metodă este foarte potrivită pentru a genera pulsuri laser cu durata de timp de ordinul fs. Însă, configurația sistemului laser are un grad de complexitate destul de ridicat, ceea ce implică și costuri de producție ridicate. De asemenea, există aplicații în care este necesar ca dimensiunile laserului să fie cât mai mici.

De aceea, tehnica de generare a pulsurilor laser Q-switch poate fi considerată o soluție alternativă pentru a satisface cerințele impuse în diverse aplicații, precum cele din industrie, în domeniul telecomunicațiilor sau medicină. În aceste aplicații, pulsurile laser cu durata de timp de ordinul ps sau ns sunt utilizate la scală largă. Pentru îmbunătățirea performanțelor de la aceste sisteme laser au fost luate în considerare câteva soluții printre care: alegerea materialelor activ și realizarea configurației sistemului laser astfel încât să fie generate pulsuri laser cu durata cât mai

scurtă și niveluri de putere de vârf cât mai ridicate în timp ce dimensiunile sistemului sunt reduse cât de mult posibil.

Capitolul 2: Mediul amplificator. Configurația de tip compozit și ghid de undă

2.1 Materiale compozite

Sistemele laser care livrează pulsuri cu durată foarte scurtă (de ordinul ps sau ns) și, implicit putere de vârf mare, prezintă interes crescut pentru aplicațiile în medicină, în industrie sau în cadrul studiilor de cercetare fundamentală. De exemplu, prelucrarea materialelor cu pulsuri laser de putere mare este al doilea segment al aplicațiilor laser privind cifrele de afaceri globale (după domeniul comunicațiilor). În majoritatea cazurilor, sistemul laser trebuie să fie compact, ușor de manevrat iar costurile de fabricare să fie scăzute.

Laserii care funcționează în regim pulsat (metoda Q-switch) pot oferi o soluție pentru a îndeplini cerințele de mai sus. Acest tip de laseri livrează pulsuri laser cu durata foarte scurtă (ns, ps) și implicit puteri de vârf de ordinul kW sau MW. Mai mult, un avantaj important pe care acestia îl oferă este faptul că sunt de dimensiuni reduse. În plus, dacă sunt utilizate medii compozite a căror suprafețe laterale sunt acoperite cu straturi dielectrice atunci sistemul laser devine și mai compact. Iar pentru a simplifica și mai mult configurația sistemului, pompajul este realizat longitudinal cu diode laser.

Chiar dacă performanțele laser obținute prin această metodă sunt mai slabe decât în cazul tehnicilor acusto-optică sau electro-optică, tehnica Q-switch este utilizată foarte mult deoarece oferă design simplu. Ea constă în generarea de pulsuri scurte de la un sistem laser prin modularea pierderilor intracavitare, și implicit, a factorului de calitate din rezonator. Această tehnică este utilizată pentru laserii cu medii active în stare solidă.

Ca și mediu activ laser, mediile cristaline de granat dopate cu Nd (Nd:YAG) fabricate cu metoda Czochralski sunt utilizate cel mai intens datorită valorii ridicate a conductivitătii termice. Cristalul de Nd:YAG este cel mai popular material pentru emisie laser din categoria mediilor cu stare solidă datorită proprietăților și a caracteristicilor favorabile pe care le prezintă. De exemplu, laserii cu Nd:YAG prezintă performanțe ridicate pentru funcționarea în undă continuă la putere ridicată [2.1] sau pentru generarea de pulsuri Q-switch de intensitate mare [2.2]. Acest lucru este posibil datorită timpului de viată al fluorescenței adecvat și a proprietăților termice și mecanice corespunzătoare pentru aceste procese.

Ca și alternativă la mediile laser cristaline, materialele de tip ceramic YAG au fost întrebuințate pentru a obține emisie laser datorită unor caracteristici care le conferă avantaje clare, si anume: procesul de fabricație este mai simplu în comparație cu tehnica de obținere a cristalelor de YAG, costurile de producție sunt mai scăzute și, poate cel mai important lucru, gradul de transparență este comparabil cu cel al mediilor monocristaline. Cea mai promițătoare caracteristică a acestei clase de materiale este capacitatea de a fi scalabile la dimensiuni mai mari în timp ce costurile sunt menținute la un nivel redus [2.3].

În 1995 a fost raportată pentru prima dată fabricarea de materiale ceramici de Nd:YAG [2.4], dar eficiența de conversie laser era mult mai scăzută decât cea a sistemelor cu monocristale comerciale de calitate superioară, fapt datorat nivelurilor ridicate de pierderi prin împrăstiere. Dar acest obstacol a fost depăsit în momentul în care au fost fabricate materiale ceramici în stare solidă cu un grad foarte ridicat de transparență prin metoda de sinterizare în vid [2.5].

Motivul pentru care aceste materialele au fost considerate a fi potrivite ca și medii active laser este faptul că, în momentul de fată, performanțele laser a sistemelor cu astfel de medii sunt comparabile cu cele corespunzătoare mediilor cristaline.

O altă variantă ce poate fi luată în considerare pentru realizarea acestor laseri ar fi utilizarea materialelor compozite ca medii active laser. Acestea sunt materiale obținute prin combinarea (sau lipirea) de medii cu compoziție diferită. În funcție de scop (pentru eliminarea gradienților termici în mediul activ sau pentru generarea de pulsuri laser în ns), pot fi realizate mai multe combinații, și anume: cristalul de Nd:YAG și Yb:YAG poate fi combinat cu un cristal de YAG nedopat; sau cristalul de Nd:YAG se combină cu un material de absorbant saturabil de tip Cr⁴⁺:YAG, pentru a genera pulsuri laser ultrascurte prin metoda Q-switch. În plus, aceste combinații sunt disponibile atât pentru sticle cât și pentru materiale de tip ceramic.

Materialele laser compozite pot fi obținute prin diverse tehnici. Acestea se împart în două categorii: prima categorie se referă la metodele prin care pot fi puse în contact două materiale cu compoziție diferită pe când cea de-a doua cuprinde metodele directe prin care pot fi realizate materiale compozite. În cazul în care două medii sunt puse în contact, tehnica de lipire este foarte importantă deoarece calitatea optică a interfeței trebuie să fie foarte bună pentru a nu introduce pierderi adiționale. Metodele directe se aplică doar în cazul mediilor de tip ceramic, adică procesul tehnologic permite sinterizarea de materiale ceramici cu compoziție diferită în volumul lor, de exemplu: concentrația de dopant poate varia în volumul materialului [2.6] sau poate fi realizat codopajul cu doi ioni activi laser [2.7].

Prin urmare, putem spune că materialele de tip granat dopate cu ioni de Nd sunt potrivite pentru a fi folosite ca medii active laser și, mai mult, pentru generarea de pulsuri în domeniul ns sau ps folosind metoda de comutare a factorului de calitate în rezonator (Q-switch) (metoda descrisă în Capitolul 1). De asemenea, performanțele laser (durata pulsurilor sau puterea de vârf) pot fi îmbunătățite dacă există posibilitatea de a utiliza materialele laser compozite de tip monocristal sau ceramic.

2.2 Geometrii pentru ghidarea fasciculului de pompaj

Conform statisticilor realizate, se preconizează că sistemele laser vor fi în continuare un factor important pe piețele existente și emergente din întreaga lume. Motivul este faptul că tehnologiile legate de laseri sunt afaceri extrem de profitabile. Unul din segmentele în care sistemele laser sunt exploatate din ce în ce mai mult este cel al prelucrării materialelor și al litografiei, urmat îndeaproape de comunicații și stocarea optică, laserii pentru cercetare științifică și domeniul militar, aplicațiile medicale și estetice, etc.

În ceea ce privește prelucrarea materialelor, în prezent, laserii cu fibră cu niveluri de putere de ordinul kW reprezintă alegerea principală, urmați de laserii cu CO₂ și, în final, de laserii cu medii active în stare solidă. Motivul pentru aceste alegeri este faptul că laserii cu fibră oferă diverse beneficii în comparație cu alte surse laser convenționale care dezvoltă putere de același nivel și cu distribuție TEM₀₀ a fasciculului. Aceste beneficii includ: eficiența electrică ridicată, configurație compactă, tehnici versatile de livrare a fasciculului laser sau durata de viață foarte lungă (10000 h). În schimb, în cazul sistemelor laser cu medii active în stare solidă, nivelurile de putere sunt mai mici comparativ cu cele livrate de laserii cu fibră datorită efectelor termice foarte intense în mediul amplificator care apar ca și consecință a utilizării pompajului ridicat și care sunt un factor important atât pentru limitarea valorilor la ieșire cât și a calității fasciculului laser. Creșterea puterii laser ar fi posibilă, dacă sunt oferite soluții care să permită atenuarea sau eliminarea acestor efecte.

În general, procesul de pompaj al unui mediu activ în stare solidă este asociat cu apariția efectelor termice sau, mai exact, cu generarea de caldură. Există mai multe surse responsabile pentru aceste efecte, și anume: diferența de energie între fotonii de pompaj și fotonii laser, denumită defect cuantic, care este sursa principală de căldură în mediul activ; relaxarea neradiativă de pe nivelul laser superior pe cel inferior și de pe banda de pompaj pe nivelul fundamental, care are și ea un aport la aceste efecte. Gradienții de temperatură care sunt creați ca rezultat al generării de căldură pot produce daune ireversibile, cum ar fi distrugerea mediului. Punctul în care mediul este afectat permanent reprezintă limita superioară pentru generarea de putere laser maximă. Mai mult, chiar dacă sistemul laser este operat sub această limită, gradienții de temperatură pot duce la efecte, precum: lentila termică și birefringența, deoarece se produce o variație a indicelui de refracție în funcție de temperatura în volumul mediului amplificator.

Pentru a crea nișe noi în care laserii cu medii în stare solidă pot fi utilizați, soluția ar fi optimizarea performanțelor sistemelor deja existente sau designul unor configurații noi. Dacă se analizează datele statistice furnizate de companiile de specialitate, putem vedea că jumătate din totalul sistemelor laser cu medii în stare solidă utilizează pompajul cu diode laser. Unul dintre motive ar fi faptul că sunt foarte ușor de integrat, prezintă durată lungă de viață, iar costurile aferente sunt relativ scăzute.

Pompajul cu diode laser pentru sistemele laser cu stare solidă poate fi săvârșit prin intermediul a mai multor geometrii. Prima, și cea mai cunoscută, este pompajul longitudinal, în care fasciculul furnizat de dioda laser este focalizat în mediul activ laser paralel și pe aceeași direcție cu fasciculul laser. Folosind această schemă au fost obținute fascicule laser de calitate bună de la mediile active laser Nd:YAG [2.8, 2.9] sau Nd:YVO₄ [2.10] iar acest lucru se datorează faptului că există o suprapunere aproape perfectă între modul laser și fasciculul de pompaj în mediul activ. În schimb, nivelul de putere este scăzut sau mediu, deoarece puterea unei diode laser este limitată iar configurația nu permite decât pompajul prin suprafețele laterale ale mediului activ pe aceeași direcție cu fasciculul emis. În consecință, nivelurile de putere laser ridicate pot fi obținute de la sisteme realizate în configurații diferite de cea în care pompajul este longitudinal dacă efectele termice induse în mediul activ datorită nivelului mare de pompaj sunt atenuate. Pentru a rezolva acest aspect au fost propuse câteva soluții.

O modalitate ar fi întrebuințarea mediilor active laser compozite care prezintă regiuni cu concentrație diferită de ioni dopanți [2.11, 2.12], cu scopul de a stabili o valoare aproximativ uniformă pentru densitatea de energie în mediul activ care are legătură directă cu reducerea

gradientului de temperatură. Același lucru poate fi îndeplinit dacă se pompează direct pe nivelul laser superior deoarece valoarea defectului cuantic se reduce (diferența dintre energia fotonilor de pompaj și laser) iar parametrii precum puterea de pompaj absorbită la prag, panta eficienței sau eficiența optică depind și de această valoare [2.13, 2.14].

O altă variantă este așa numitul pompaj lateral în care radiația provenită de la dioda laser este focalizată în mediul activ perpendicular pe direcția fasciculului laser. Această schemă oferă posibilitatea utilizării mai multor surse de pompaj simultan, mediul activ are forma unui disc subțire deoarece secțiunea transversală este mult mai mare decât cea longitudinală, iar una dintre suprafete este în contact cu un sistem de răcire. Adică, datorită suprafetei mari de răcire, cantitatea de căldură extrasă din mediul activ este mai mare. Pe de altă parte, pompajul este realizat prin treceri multiple în mediu deoarece lungimea acestuia nu este adecvată pentru a obtine absorbtie maximă a fasciculului de pompaj prin doar două treceri. Această configuratie s-a dovedit a fi potrivită pentru emisia laser de la diverse medii active, cum ar fi Yb:YAG, Nd:YAG sau Nd:YVO₄ și multe altele [2.15-2.17]. Ea poate fi modificată pentru a introduce pompajul cu mai multe diode laser simultan astfel încât, fibrele care livrează radiația provenită de la diodele laser sunt poziționate în apropierea marginii laterale a mediului activ eliminând elementele optice de focalizare. În plus, dacă suprafețele transversale sunt depuse cu straturi dielectrice, procesul de absorbție este realizat prin fenomenul de reflexie totală internă. Conform literaturii, există mai multe studii experimentale în care a fost generată emisie laser în regim de undă continuă de la medii active compozite de Yb:YAG/YAG în acest aranjament [2.18, 2.19].

2.3 Geometrii pentru ghidarea fasciculului laser

Ghiduri de undă. Principiu de funcționare

Ghidurile de undă sunt structuri optice care restricționează expansiunea radiației electromagnetice pe distanțe lungi. Ghidurile realizate din medii izotrope sunt caracterizate specificând variația indicelui de refracție în secțiune transversală n(x, y). În funcție de această variație, acestea pot fi clasificate în două categorii: *ghiduri planare (in engl.* planar waveguides) și *neplanare (in engl.* nonplanar waveguides). În general, pentru ghidurile de undă neplanare, zona centrală, numită și "inimă" (*in engl.* core) este înconjurată de două straturi de material cu indici de refracție diferiți ce variază în ambele direcții, n(x, y). Din această categorie fac parte ghidurile de undă de tip "canal" (*in engl.* channel waveguides) sau fibrele optice. Ghidurile pot fi clasificate în funcție de geometrie, și anume: plane, rectangulare (ghiduri de undă tip canal "channel waveguides") sau cilindrice (fibre optice sau laseri tip ghid de undă "waveguide lasers").

Ghidarea undelor electromagnetice în aceste structuri este realizată cu ajutorul fenomenului de <u>reflexie totală internă</u>. Dacă o rază de lumină este supusă acestui fenomen, adică este incidentă la limita dintre două medii, aceasta va fi reflectată în totalitate [1.20]. Acest lucru se petrece dacă unghiul de incidență este mai mare decât *unghiul critic* $\alpha_{crit} = \arcsin\frac{n_1}{n_2}$ unde $n_1 > n_2$ (n_1 și n_2 indici de refracție).

Principiul de funcționare al ghidurilor de undă cilindrice (cum ar fi fibrele optice) are la bază același fenomen. Acest tip de ghid este realizat dintr-un mediu (sticlă, sticlă dopată sau materiale cristaline și ceramici), care este numit "inimă" ("core" în engl.). Regiunea este înconjurată de un mediu ("cladding" în engl.) cu indice de refracție mai mic în comparație cu cel al inimii.

Laseri de tip ghid de undă

Una dintre aplicațiile ghidurilor de undă care a fost implementată cu succes sunt laserii tip ghid de undă. Există mai multe tipuri de astfel de sisteme, și anume: laseri tip ghid de undă cu medii în stare solidă (în medii amorfe, cristaline sau ceramici), laseri cu fibră, toate tipurile de laseri cu semiconductori (diode laser) sau unele sisteme cu mediu activ gazos (laserul cu CO₂).

Caracteristica cea mai importantă a laserilor tip ghid de undă este faptul că poate fi menținut un nivel ridicat al intensității optice pe o lungime mai mare în mediul activ. Acesta permite obținerea unui câștig optic ridicat chiar și pentru tranziții laser pentru care nivelul de pompaj poate fi limitat datorită efectelor termice care apar. Cu toate acestea, avantajul poate fi parțial compensat de pierderile de propagare în ghidul de undă, care pot fi în unele cazuri substanțial mai mari decât cele corespunzătoare materialului de referință.

Tehnica de realizare a ghidurilor de undă folosind pulsuri laser în fs (tehnica de "scriere directă"). Generalități

Datorită intensităților foarte ridicate, pulsurile laser în fs sunt utilizate pentru procesarea suprafețelor (ablație), pentru procesarea în volum (în acest caz proprietățile fizice locale ale materialului se modifică și pot fi create diferite structuri-ghiduri optice, microcanale sau rețele de difracție, etc.), care pot fi integrate mai departe în sisteme fotonice pentru aplicații în domeniul optoelectronicii. Tehnica prin care pot fi realizate toate aceste tipuri de modificări în materiale se numește *tehnica de scriere directă cu pulsuri laser în fs*, iar procesul care stă la baza acesteia este foarte localizat. Din acest motiv dimensiunile structurilor pot fi controlate și sunt de ordinul micronilor deoarece fenomenul de absorbție neliniară se petrece doar în limitele volumului în care este focalizat fasciculului laser. Această limitare spațială împreună cu posibilitatea de a translata materialul face posibilă elaborarea de structuri cu geometrii complexe pe toate cele trei direcții.

Avantajul principal al acestei tehnici comparativ cu cele convenționale este faptul că nu necesită etape intermediare sau pregătitoare, cum este cazul metodei de contact termic în care este nevoie de o pregătire în prealabil a suprafețelor care vor intra în contact. De asemenea, nu sunt necesare tratamente termice sau de alte tipuri și condiții de lucru speciale (atmosfera gazoasă sau de vid, introducerea în baie de acid, etc.) sau utilizarea de instalații complexe. Mai mult, nu există riscul de contaminare al materialului în timpul procesului precum în cazul celorlalte tehnici, cum ar fi: depunerea cu vapori chimici, creștere epitaxială în fază lichidă, etc.; iar timpul de realizare este îmbunătățit considerabil. În plus, pot fi realizate structuri cu diferite geometrii: 2D sau 3D.

Principiul de funcționare al acestei tehnici este foarte simplu, și anume: fasciculul laser în fs este focalizat cu ajutorul unui obiectiv în volumul materialului și, în urma fenomenului de absorbție neliniară, apare o modificare locală a indicelui de refracție în material. Pentru a realiza această modificare în mai multe puncte în material, acesta este poziționat pe un suport care poate fi deplasat în orice direcție. În timpul în care poziția mediului variază, fasciculul laser "trasează o linie" în mod continuu pe toată lungimea lui. De exemplu, după cum se poate observa în Figura 2.1, fasciculul este focalizat cu ajutorul obiectivului în volumul materialului. Pentru a obține structura, materialul se deplasează într-un sens iar scrierea va fi realizată în sensul opus deplasării.

În ceea ce privește structurile create în materiale cristaline și de tip ceramic, metoda de scriere pas cu pas prezintă anumite dezavantaje. Unul este faptul că timpul necesar pentru a realiza o structură tip ghid de undă este foarte lung și depinde de complexitatea structurii și de lungimea materialului. În general, timpul de lucru este 90-120 minute. Un alt dezavantaj al acestei metode este faptul că valoarea pierderilor prin transmisie este destul de ridicată datorită zonelor care rămân nemodificate (a se vedea Figura 2.3).

Acest ultim dezavantaj poate fi depășit utilizând o altă tehnică de scriere, și anume *tehnica de* scriere cu pulsuri laser în fs prin mișcarea helicoidală a materialului.



Figura 2.1. Reprezentare schematică pentru tehnica de scriere cu laser în fs.

În cadrul acestei tehnici (Figura 2.2) scrierea structurilor este realizată pe axa paralelă cu direcția în care va fi obținută emisia laser. Astfel, materialul este supus unei mișcări circulare în planul Oxy și unei mișcări de translație realizată în direcția Oz. Cu ajutorul acestei metode pot fi obținute ghiduri de formă circulară. Timpul de realizare al unei structuri este diminuat drastic (de la aproximativ o oră până la câteva minute). Datorită faptului că materialul realizează această combinație de mișcări, zonele în care indicele de refracție rămâne nemodificat dispar și, în acest fel, pierderile prin transmisie scad considerabil.



Figura 2.2. Reprezentare schematică pentru tehnica de scriere prin mișcarea helicoidală a mediului.

Configurații pentru structurile tip ghid de undă în mediile cristaline. Clasificări și exemple

Structurile tip ghid de undă pot fi realizate în diverse configurații deoarece sunt realizate modificări ale indicilor de refracție folosind un fascicul laser în fs într-o gamă largă de materiale cristaline. Clasificarea acestor structuri poate fi efectuată în funcție de mai multe criterii. Un prim criteriu este reprezentat de felul în care se produce variația indicilor de refracție în zona afectată de radiația laser. Modalitatea în care indicele de refracție variază depinde dacă se lucrează sub pragul de distrugere optică al materialului iradiat (în general pentru materiale amorfe sau cristaline) sau deasupra acestuia. În consecință, există structuri de *Tipul I* și *Tipul II* [2.20].

Al doilea criteriu se referă la geometria structurilor [2.21, 2.22].



Figura 2.3. Reprezentare schematică pentru tipurile de ghiduri de undă: **a**). Structuri de Tipul I, în care procesul de reflexie totală internă este realizat în ghidul în sine; **b**). Structuri de Tipul II, cu doi pereți, în care ghidarea luminii este realizată între cei doi; **c**). Structuri de Tipul II, în configurație "cladding"-radiația este confinată în interiorul acesteia.

Astfel, în funcție de variațiile induse ale indicilor de refracție în interiorul structurilor iradiate și în funcție de strategia urmărită pentru fabricare, pot fi desemnate trei categorii de structuri tip ghid de undă. În Figurile 2.3a-c sunt reprezentate schematic cele trei tipuri de structuri tip ghid de undă (rândul de sus) și poziționarea spațială a modurilor laser pentru acestea (rândul de jos): *Tipul I* (valoarea indicelui de refracție din regiunea iradiată crește) (Figura 2.3a), *Tipul II* (valoarea indicelui de refracție din regiunea iradiată scade datorită valorilor ridicate de putere laser iar zonele adiacente prezintă valori mai mari ale indicelui de refracție) (Figura 2.3b) și geometrii în volum tip "*cladding*" (Figura 2.3c).

Configurații de *Tipul II* (doi pereți) au fost realizate în numeroase medii laser active, cum ar fi: Nd:Y₃Al₅O₁₂ (Nd:YAG) [2.23], Yb:KGd(WO₄)₂ [2.24], Yb:YAG [2.25, 2.26], Nd:YVO₄ [2.27], Nd:GdVO₄ [2.28] sau Pr:SrAl₁₂O₁₉. În cazul acestor structuri a fost generată emisie laser eficientă folosind laseri cu Ti:safir [2.23, 2.25–2.28] sau diode laser [2.26]. Structurile de tip *"cladding"* sunt mai versatile pentru că pot fi realizate cu diferite secțiuni transversale: cum ar fi forme rectangulare și eliptice care au fost realizate în materiale monocristaline de Nd:YAG [2.29]; forme circulare, hexagonale și trapezoidale realizate în materiale ceramici de Nd:YAG [2.30], forme circulare în ceramici de Tm:YAG [2.31] sau ZnS [2.32] sau forme cu pereți dubli în Nd:YAG [2.33].

Capitolul 3: Laseri. Rezultate experimentale pentru noi geometrii specifice

3.1 Laser compozit Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG de tip ceramic pentru generarea de radiație laser de mare putere în domeniul vizibil la 532 nm

În acest capitol este descris modul de realizare al unui sistem laser cu material compozit Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG de tip ceramic pentru generarea de radiație laser în domeniul vizibil la 532 nm. Metodele utilizate pentru generarea pulsurilor la această lungime de undă sunt: comutarea factorului de calitate în rezonator (Q-switch) și generarea armonicii a doua la 532 nm folosind cristalul neliniar de LBO. De asemenea, se studiază variația energiei pulsurilor laser la lungimea de undă 1.06 μ m în funcție de dimensiunea și poziția fasciculului de pompaj în mediul activ laser.

3.1.1 Configurația laser

În Figura 3.1.1 este reprezentat sistemul laser construit pentru efectuarea experimentelor necesare în cazul generării de radiație laser în regim pulsat Q-switch la 1.06 µm și la 532 nm.

Dimensiunile fasciculului de pompaj în mediul activ laser au fost variate cu scopul de a verifica influența pompajului asupra performanțelor laser. Astfel, au fost utilizate trei linii de focalizare iar diametrul fasciculului de pompaj în mediul laser a fost măsurat ca fiind: ϕ =0.37 mm (notat cu #A), 0.50 mm (#B) și 0.65 mm (#C).



Figura 3.1.1 Configurația laser: a). Montajul experimental utilizat pentru a genera radiație la 1064 nm de la un mediu ceramic compozit Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG prin metoda de comutare a factorului de calitate și pentru a obține radiație la 532 nm. b). Fotografia mediului ceramic de Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG cu 1.1-at. % Nd.

În experimentele laser au fost utilizate două materiale compozite Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG de tip ceramic (Baikowski Japan Co., Ltd.). Primul mediu a fost un material de Nd:YAG ceramic cu 1.1-at.% concentrație de Nd și lungime 7.2 mm care a fost lipit de un material de Cr⁴⁺:YAG ceramic cu transmisia inițială T₀=30%. Lungimea totală a acestora a fost măsurată ca fiind 9.5 mm. Lungimea totală a celui de-al doilea mediu de Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG ceramic a fost 7.5 mm.

Concentrația acestui mediu este mai mare, și anume: 1.5-at.% ioni de Nd iar lungimea sa este 5.2 mm.

Îmbunătățirea performanțelor laser necesită o serie de măsuri deoarece durata pulsurilor laser Q-switch variază cu lungimea rezonatorului laser. De aceea scopul principal este reducerea lungimii până la o valoare minimă permisă. Prima măsură ar fi utilizarea mediilor compozite de tip Nd:YAG/ Cr⁴⁺:YAG iar cea de-a doua este eliminarea oglinzilor rezonatorului ca element fizic separat prin depunerea pe suprafețele laterale ale sistemului laser a celor două oglinzi. Adică, suprafața de intrare, notată cu S₁ (ca în Figura 3.1.1), a mediului de Nd:YAG a fost depusă pentru reflectivitate ridicată, HR (reflectivitate R>0.998) la lungimea de undă laser λ_{em} și pentru transmisie ridicată HT (transmisie T> 0.98) la lungimea de undă de pompaj λ_p . Oglinda de extracție a fost depusă pe suprafața de ieșire, S₂, a mediului de absorbant saturabil (SA) având transmisia T=0.50 pentru emisia laser λ_{em} . Astfel că, folosind acest sistem laser putem obține pulsuri laser prin metoda Q-switch la lungimea de undă λ_{em} =1.06 µm.

Pulsurile laser la lungimea de undă $\lambda_{2\omega}$ = 532 nm au fost obținute prin generarea armonicii a doua într-un cristal neliniar LBO de tipul I (θ = 90°, ϕ = 11.4°) având lungimea de 10 mm.

3.1.2 Influența diametrului fasciculului de pompaj asupra performanțelor laser

În Figura 3.1.2a sunt reprezentate performanțele (E_p) laser în regim comutat pentru mediul ceramic de Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG cu concentrație de 1.1-at. % Nd iar în Figura 3.1.2b valorile corespunzătoare pentru energia pulsului de pompaj.



Figura 3.1.2. Variația pentru **a**) Energia pulsurilor laser E_p la 1.06 μm si **b**) Energia pulsurilor de pompaj E_{pump} în funcție de raza fasciculului de pompaj în cazul mediului ceramic de Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG cu concentrație 1.1-at. % Nd. Datele experimentale sunt redate cu ajutorul punctelor iar datele teoretice cu linii continue și întrerupte.

După cum se poate observa, raza fasciculului de pompaj are o influență majoră asupra valorilor energiei pulsului laser și, implicit, a puterii de vârf. De asemenea, a fost determinat factorul de calitate al fasciculului laser folosind tehnica "knife-edge" [3.1]. Factorul de calitate M² crește dacă raza fasciculului de pompaj crește (Tabelul 3.1). În urma interpretărilor datelor experimentale obținute, se poate observa că, într-adevăr, dimensiunea fasciculului de pompaj are o influență majoră asupra performanțelor laser la 1.06 µm.

Procesele din rezonatorul laser responsabile pentru generarea de pulsuri laser prin metoda Qswitch au fost descrise teoretic cu ajutorul unui model. Acesta este bazat pe un set de ecuații diferențiale ce descrie evoluția fluxului de fotoni în rezonator, inversia de populație în mediul laser activ și cea din absorbantul saturabil. În timp, modelul a fost modificat pentru a include influența pe care o are mărimea fasciculului de pompaj asupra performanțelor laser [3.2, 3.3, 3.4].

În acest caz, se presupune că distribuția intensității fasciculului laser în secțiune transversală este de tip "top-hat" cu rază w_p iar modul laser a fost considerat a fi de formă Gaussiană cu raza w_g . Se spune că un fascicul prezintă distribuție "top-hat" dacă densitatea de energie este aproximativ constantă într-un contur circular în secțiune transversală. Pentru ambele valori w_p si w_g se consideră că nu există variații pe toată lungimea mediului Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG.

Energia pulsului laser este dată de relatia, adică:

$$E = \frac{h v A_g}{2\sigma_g \gamma_g} ln(R) ln\left(\frac{n_{gf}}{n_{gi}}\right)$$
(3.1.1)

unde hv este energia fotonilor cu lungimea de undă λ_{em} , σ_g este secțiunea pentru emisia stimulată pentru Nd:YAG, γ_g -factorul de reducție al inversiei iar A_g -suprafața din mediul de Nd:YAG care corespunde fasciculului laser.

Densitatea de inversie inițială este dată de ecuația:

$$n_{gi} = \frac{-lnR + L - lnT_0^2}{2\sigma_g l_g [1 - exp(-2a^2)]}$$
(3.1.2)

unde $a = \frac{w_p}{w_g}$ reprezintă raportul dintre dimensiunea fasciculului de pompaj în mediul activ și cea a modului laser. *L* reprezintă pierderile totale în rezonatorul laser iar l_g este lungimea mediului Nd:YAG.

Relația dintre densitatea de inversie finală și cea inițială este dată de:

$$1 - \frac{n_{gf}}{n_{gi}} + \left[1 + \frac{(1-\delta)\ln T_0^2}{\beta}\right] \ln\left(\frac{n_{gf}}{n_{gi}}\right) + \frac{1}{\alpha} \frac{(1-\delta)\ln T_0^2}{\beta} \left(1 - \frac{n_{gf}^{\alpha}}{n_{gi}^{\alpha}}\right) = 0$$
(3.1.3)

unde $\beta = \frac{-lnR + L - lnT_0^2}{1 - exp(-2a^2)}$, $\alpha = \frac{\gamma_{SA}\sigma_{SA}}{\gamma_g\sigma_g}\frac{A_g}{A_{SA}}$, γ_{SA} este factorul de reducție pentru mediul Cr⁴⁺:YAG iar A_{SA} reprezintă suprafața în Cr⁴⁺:YAG corespunzătoare fasciculului laser.

În Figura 3.1.2a poate fi observată variația energiei laser și a energiei de pompaj (Figura 3.1.2b) în funcție de raza fasciculului de pompaj pentru diferite dimensiuni ale modului laser în rezonator. După cum se poate observa în Figura 3.1.2a, pentru valori mici ale dimensiunilor modului laser în rezonator w_g , este generată emisie laser pentru un nivel scăzut de pompaj, dar, în același timp, energia pulsului laser va fi scăzută. Dacă valoarea modului laser w_g este menținută constantă și pompajul w_p se măreste în mediul activ, atunci energia pulsului laser crește. Valoarea maximă corespunzătoare energiei laser poate fi atinsă pentru o valoare limită a fasciculului de pompaj, w_p . Dacă această valoare-limită este depăsită, atunci energia pulsurilor

laser ajunge la un nivel de saturație oricât ar fi de ridicată valoarea energiei de pompaj. Acest fenomen este datorat faptului că doar partea centrală a inversiei de populație interacționează cu modul laser [3.3], în timp ce inversia situată în părțile exterioare se va dezexcita prin emisie spontană. Acest proces are ca rezultat creșterea gradientului de temperatură în interiorul mediului activ.

Nd:YAG	Linia de focalizaro	E _p (mJ)	P _p (MW)	E _{pump} (mJ)	M^2	Р
(concentrație Nu)	Iocalizate	0.75	0.75		1.65	0.00
	#A	0.75	0.5	15.2	1.65	> 0.99
1.1-at.%	# B	1.55	1.0	21.4	2.9	0.95
	#C	2.5	1.9	32	3.15	0.95
	#A	0.64	0.45	16.5	2.6	0.98
1.5-at.%	#B	0.94	0.6	22.6	3.2	0.91
	#C	1.45	0.75	32.7	3.7	0.95

Tabel 3.1 Caracteristicile pulsurilor laser Q-switch generate de la cele două medii compozite de Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG de tip ceramic.

3.1.3 Generare de emisie laser la 532 nm

În final, pornind de la emisia laser la lungimea de undă la 1.06 μ m, a fost obținută emisie laser la $\lambda_{2\omega}$ =532 nm (prin fenomenul de dublare în frecvență) folosind montajul experimental din Figura 3.1.1a. Se știe că energia pulsului laser la $\lambda_{2\omega}$ =532 nm depinde de dimensiunea fasciculului laser la lungimea de undă fundamentală în mediul neliniar de LBO. În acest sens, a fost utilizată o lentilă L3 care focalizează fasciculul în mediul neliniar cu distanțe focale diferite (100, 125 și 150 mm). Iar pentru a evita distrugerea cristalului de LBO, energia fasciculului laser incident pe acesta a fost limitată la valoarea de 1.3 mJ.

Au fost generate pulsuri laser în vizibil cu energia de ~0.36 mJ atunci când emisia laser în infraroșu a fost focalizată în cristalul de LBO cu o rază de ~0.74 mm. Iar valoarea corespunzătoare pentru eficiența de conversie infraroșu-verde a fost determinată a fi ~0.27. Această valoare este comparabilă cu rezultatele obținute prin dublarea în frecvență la o singură trecere în mediul activ a emisiei laser de la un sistem microcip cu Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG. Procesul de dublare a fost realizat folosind un cristal neliniar de BiBO [3.9]. În schimb, energia pulsului laser și puterea de vârf prezintă valori mult mai ridicate pentru sistemul de față. În consecință, acest tip de mediu ceramic compozit este potrivit pentru a realiza sisteme laser compacte cu aplicații în industria motoarelor cu ardere internă [3.4]. Mai mult, o metodă foarte simplă de a produce radiație laser în regim pulsat de ordinul MW în domeniul vizibil este utilizarea unui sistem laser microcip în combinație cu un mediu neliniar [3.10]. În plus, poate fi generată radiație laser în domeniul ultraviolet la lungimile de undă 355 și 266 nm.

3.1.4 Concluzii

Au fost obținute rezultate privind performanțele laser la 1.06 µm de la un sistem laser de tip Q-switch folosind două medii compozite de Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG (1.1- și 1.5-at.% Nd) de tip ceramic. Pulsuri laser cu energie maximă de ieșire de 2.5 mJ și putere de vârf de 1.9 MW au fost

generate de la mediul de 1.1-at.% Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG cu lungime 9.5 mm. În urma experimentelor am observat că mediul laser cu concentrație de 1.1-at. % Nd prezintă performanțe laser mai bune decât cel cu 1.5-at.% Nd. De asemenea, valorile energiei laser au fost optimizate în urma variației dimensiunii fasciculului de pompaj (raza și poziția în mediul activ laser Nd:YAG). Rezultatele astfel obținute au fost validate teoretic cu ajutorul unui model. În plus, au fost generate pulsuri laser la lungimea de undă 532 nm, energie de 0.36 mJ și putere de vârf de 0.3 MW prin dublarea în frecvență a lungimii de undă laser 1.06 μ m cu ajutorul unui cristal neliniar de LBO. Experimentele au fost realizate la temperatura camerei.

Aceasta este o primă demonstrație a unui astfel de sistem ce livrează pulsuri laser cu putere de vârf de ordinul MW în domeniul vizibil utilizând metoda conversiei neliniare printr-o singură trecere. Următorul pas ar fi realizarea unui sistem laser compact care să includă și mediul neliniar de LBO.

3.2 Laser Nd:YAG pompat lateral prin prismă YAG cu funcționare în regim de pulsuri

În acest subcapitol sunt expuse rezultatele obținute de la laserul cu Nd:YAG pompat lateral printr-o prismă de YAG nedopat [3.11, 3.12]. Mediul activ de la care a fost generată emisie laser este un cristal de Nd:YAG de formă rectangulară. Geometria de pompaj propusă constă în utilizarea unei prisme triunghiulare (triunghi isoscel) de YAG pentru cuplarea fasciculului de pompaj direct de la fibra optică în mediul laser. Prisma este atașată la una dintre cele patru suprafețe ale mediului, în timp ce fibra optică este poziționată foarte aproape de ipotenuza acesteia. Fasciculul de pompaj se va propaga în cristal prin fenomenul de reflexie totală internă. Folosind această configurație a fost generată emisie laser atât în regim relaxat cât și în regim de pulsuri prin metoda pasivă de comutare a factorului de calitate în rezonator.

3.2.1 Configurația laser

Această configurație a fost propusă cu scopul de a realiza un sistem laser cât mai compact pentru care pompajul să fie longitudinal [3.13]. În Figura 3.2.1 este descris montajul experimental.



Figura 3.2.1. a). Schema de principiu a unui laser Nd:YAG pompat lateral cu diodă laser printr-o prismă; b). Poza montajului experimental [3.12].

Mediul activ laser este de tipul Nd:YAG cu concentrația ionilor activi de 1.0- at.% Nd și secțiune transversală de forma unui pătrat cu latura t = 1.5 mm și lungime l = 10 mm. Prisma utilizată este o prismă triunghiulară realizată din material de YAG nedopat. Pentru a pune în contact prisma cu suprafața mediului a fost utilizată o substanță adezivă care prezintă caracteristici corespunzătoare pentru a nu introduce pierderi prin împrăștiere sau fenomene de încălzire locală la limita dintre cele două elemente.

3.2.2 Performanțele emisiei laser în regim relaxat

În continuare vor fi prezentate rezultatele obținute în urma experimentelor efectuate pentru a caracteriza emisia laser la 1.06 μm.

Pentru a obține emisie laser la 1.06 μ m în regim relaxat au fost concepute trei configurații ale rezonatorului laser. Ca mediu activ a fost utilizat un material cristalin de Nd:YAG (1.0-at.% ioni de Nd) cu secțiune transversală 1.5x1.5 mm² și lungime 10 mm.

În prima configurație (notată cu simbolul "A"), pompajul este focalizat longitudinal cu ajutorul a două lentile (raport 1:1) în cristalul de Nd:YAG. În cea de-a doua configurație, fibra este poziționată în vecinătatea oglinzii cu reflectivitate ridicată pentru 1.06 μ m și, astfel, pompajul este realizat longitudinal dar fără a utiliza vreun element optic de focalizare (configurația "B"). În cea de-a treia configurație (configurația "C"), prisma triunghiulară de YAG a fost lipită de mediul de Nd:YAG în zona laterală suprafeței S₁ iar pompajul a fost realizat direct de la fibră prin fenomenul de reflexie totală internă. Lipiciul folosit în acest scop este transparent la lungimea de undă λ_p , adică prezintă transmisie T>0.97. În plus, suprafața prismei de YAG pe care este incidentă radiația provenită de la fibră a fost depusă pentru transmisie ridicată (T>0.99) la λ_p .

În configurația "C" a fost generată emisie laser cu energia maximă de $E_p=22.1$ mJ atunci când se pompează cu $E_{pump}= 44.5$ mJ (eficiența optică $\eta_o \sim 0.50$) cu panta eficienței $\eta_s=0.51$. În acest caz, eficiența de absorbție a pompajului în cristal a fost de ~0.95. Calitatea fasciculului laser a fost determinată folosind tehnica knife-edge, astfel $M^2(x,y)$ a fost (11.8, 11.9). Forma distribuției fasciculului laser nu a fost simetrică, ci eliptică. În concluzie, rezonatorul laser în configurația "C" produce rezultate aproximativ mai slabe decât cel în configurația "A", atât în ceea ce privește performanțele laser cât și calitatea fasciculului. În configurațiie de mai sus, mediul activ este un material de Nd:YAG depus cu scopul de minimiza pierderile optice în rezonator. În continuare, vom utiliza un mediu de Nd:YAG (1.0-at.% Nd) cu prisma de YAG nedopat iar ambele componente sunt nedepuse. În prima configurație, pompajul este realizat folosind o linie de focalizare (configurația "D") iar cavitatea rezonantă constă în două oglinzi plane, de pompaj și de extracție. A doua configurație (configurația "E") constă în același tip de rezonator dar, pompajul este realizat prin suprafața prismei de YAG direct de la fibra optică.

În configurația "D", energia pulsului laser are valoarea maximă E_p = 26.6 mJ pentru o energie de pompaj E_{pump} = 43.3 mJ (eficiența optică η_0 =0.61) iar panta eficienței a fost determinată ca fiind η_s =0.60. În cazul configurației "E", a fost măsurată o energie maximă de E_p = 17.8 mJ pentru E_{pump} = 45.4 mJ (η_0 =0.39) cu η_s =0.40.

3.2.3 Funcționare în regim comutat

Experimentele care implică procesul de generare a pulsurilor laser la 1.06 μ m sunt mai complexe. Adică, mediul activ este un material compozit Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG de tip ceramic (Baikowski Co., Japan) fără depuneri dielectrice adiționale, cu aceeași secțiune transversală și lungime egale cu cele corespunzătoare materialelor utilizate anterior. Mediul de Nd:YAG a fost pus în contact prin procese de difuzie optică cu un material ceramic de Cr⁴⁺:YAG (cu lungime 0.6 mm și transmisie inițială T₀₁=0.85).

Mediul compozit Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG este plasat într-o cavitate rezonantă compusă din două oglinzi plane paralele iar pompajul a fost realizat în trei configurații diferite. În primul montaj, radiația livrată de fibra optică este focalizată cu ajutorul a două lentile, iar mediul este plasat în rezonator astfel încat mediul de Cr⁴⁺:YAG să fie poziționat aproape de oglinda de extracție, OCM. Scopul este de a evita interacția directă între mediul de SA și fasciculul de pompaj care ar putea modifica valoarea transmisiei ințiale T₀₁ [3.14].

Cea de-a doua configurație are la bază pe cea anterioară cu diferența că pompajul este realizat direct de la fibra optică prin prisma de YAG. În cadrul ultimei geometrii, prisma de YAG a fost fixată pe mediul de Nd:YAG, dar acesta a fost poziționat în rezonator astfel încât mediul de Cr^{4+} :YAG să fie poziționat imediat după oglinda de pompaj, HRM. Acest aranjament nu permite ca mediul de SA să fie saturat din pricina pompajului.

Tabelul 3.2 conține valorile numerice privind rezultatele măsurate pentru cele două configurații.

În continuare, pentru a crește valoarea energiei pulsurilor laser Q-switch, a fost adăugat un al doilea mediu de Cr^{4+} :YAG (transmisia inițială $T_{02}=0.70$) în cavitatea rezonantă în diferite poziții față de mediul compozit de Nd:YAG/ Cr^{4+} :YAG (transmisia inițială $T_{01}=0.85$). A fost obținută emisie laser cu energie maximă pentru oglinda de extracție T=0.40.

	Pompaj lo	ongitudinal	Pompaj prin	prisma YAG
	T=0.10	T=0.60	T=0.10	T=0.60
$\mathbf{E}_{\mathbf{p}}(\mathbf{mJ})$ 0.12		0.23	0.18	0.29
E _{th} (mJ)	1.9	4.9	4.5	16.7
Durata pulsului (ns)	15	11	15	11

Tabelul 3.2. Performanțele laser ale mediului compozit Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG cu emisie în regim comutat.

3.1.4 Concluzii

A fost propus un tip nou de sistem laser, numit "laser Nd:YAG pompat lateral printr-o prismă" cu scopul de a fi considerat ca o alternativă la configurația utilizată în prezent pentru dispozitivul laser în fenomenul de igniție pentru aprinderea motoarelor cu combustie internă. Avantajele acestui sistem în comparație cu laserii în care pompajul este realizat longitudinal sunt următoarele: aranjamentul este mai simplu, este foarte compact, ușor de aliniat și oferă

posibilitatea poziționării unui element optic (element neliniar sau absorbant saturabil) între oglinda de pompaj și cristalul de Nd:YAG.

În primul rând au fost făcute modelări teoretice privind absorbția fasciculului de pompaj în mediul activ laser pentru a stabili condițiile de proiectare ale unui astfel de sistem.

Apoi au fost realizate experimente pentru a măsura performanțele laserului în regim relaxat. Adică, laserul a emis pulsuri cu energia maximă de $E_p=22.1$ mJ atunci când se pompează cu $E_{pump}=44.5$ mJ (eficiența optică $\eta_o \sim 0.50$) cu panta eficienței $\eta_s=0.51$.

În final, au fost obținute date experimentale cu privire la caracteristicile emisiei laser în regim de pulsuri prin metoda comutării factorului de calitate în rezonator. Au fost măsurate pulsuri cu energia maximă de $E_p=0.27$ mJ, valoare corespunzătoare unei energii de pompaj la prag $E_{th}=10.8$ mJ.

3.3 Laser Nd:YAG de tip "lentilă disc subțire" pompat lateral

3.3.1 Configurația laser

În acest subcapitol este descrisă o configurație nouă de laser tip "disc subțire" cu mediu compozit de Nd:YAG/YAG [3.15]. Mediul este compus dintr-o regiune centrală circulară de Nd:YAG înconjurată de o regiune de YAG nedopat (Figura 3.3.1). Cele două medii au fost puse în contact prin procedeul de difuzie optică. Acest aranjament permite ca pompajul să fie realizat prin porțiunea laterală a regiunii de YAG nedopat, deoarece fibra optică este plasată foarte aproape de aceasta, fără alte elemente optice adiționale. În acest caz, materialul de YAG nedopat are rolul de a reduce efectele termice în mediul activ care apar ca și consecință a utilizării nivelurilor ridicate de pompaj. În Figura 3.3.1b se observă, în secțiune transversală, mersul razelor de pompaj în mediul compozit de Nd:YAG/YAG.



Figura 3.3.1. a). Reprezentare grafică a configurației laser tip "lentila disc subțire". În medalion este poza mediului compozit Nd:YAG/YAG. b). Secțiune transversală a mediului și mersul razelor de pompaj în interiorul acestuia [3.16].

Pompajul este furnizat simultan de către trei diode laser care emit radiație la lungimea de undă 807 nm. Radiația livrată de fiecare diodă este cuplată în trei fibre optice care, apoi, sunt

poziționate foarte aproape de marginea mediului compozit. Pentru a direcționa fasciculul de pompaj în mediul de Nd:YAG, mediul compozit a fost proiectat astfel încât să aibă forma de lentilă plano-concavă.

3.3.2 Performanțele emisiei laser în regim relaxat

În primul rând, pentru a asigura un proces de răcire cât mai eficient, mediul a fost atașat de un element din cupru folosind pastă termo-conductoare. Montura din cupru a fost construită astfel încât să existe un sistem de circulare al apei. Răcirea este realizată prin suprafața plană, S₁, a mediului compozit care intră în contact cu montura din cupru.

Pompajul a fost realizat de trei diode laser (JOLD-120-QPXP-2P, Jenoptik, Germania) care au fost poziționate astfel încât distanțele dintre ele să fie egale. Ele au fost operate în regim de pulsuri, unde durata unui puls de pompaj a fost fixată la 250 μ s iar rata de repetiție a pulsurilor a fost variată până la o valoare maximă de 60 Hz. În Figura 3.3.2 este reprezentată variația energiei pulsului laser, E_p, în funcție de energia totală de pompaj, E_{pump}. Rata de repetiție a pulsurilor de pompaj a fost setată la 2 Hz iar lungimea rezonatorului laser a fost măsurată ca fiind 15 mm.



Figura 3.3.2. Energia laser de ieșire în funcție de energia totală de pompaj. În medalion: distribuția fasciculului laser corespunzătoare energiei maxime E_p [3.16].

Următorul pas este de a obține valori mai mari de putere, corespunzătoare nivelului maxim de energie laser (Figura 3.3.3). Pentru a realiza acest lucru, a fost mărită frecvența de repetiție a pulsurilor de pompaj până la o valoare de 60 Hz, dar nivelul energiei a fost păstrat constant, $E_{pump}=93$ mJ. Se observă că, energia pulsului laser scade de la o valoare $E_p=24.1$ mJ până la 21.4 mJ, adică cu aproximativ 11%. Această variație se datorează efectelor termice introduse în mediul compozit de Nd:YAG/YAG.

A fost măsurată temperatura suprafeței S₂ folosind o cameră termică în infraroșu FLIR T620 (de la -40°C până la +150°C, \pm 2°C precizie) și, astfel, am observat că, la frecvențe mici temperatura mediului este egală cu cea a ambientului. În schimb, la frecvențe mari (60 Hz) temperatura crește până la o valoare de 82°C în timpul emisiei laser și ajunge până la 127°C

atunci când emisia laser este suprimată dar energia de pompaj absorbită de mediu are aceeași valoare.



Figura 3.3.3. Energia laser de ieșire și nivelul de temperatura în mediul de Nd:YAG/YAG în funcție de rata de repetiție a pulsului de pompaj [3.16].

3.3.3 Concluzii

A fost proiectat și realizat un sistem laser în configurație de disc subțire care permite utilizarea unui nivel mai ridicat de energie de pompaj și, deci, generarea de emisie laser cu energie mare la ieșire. În cadrul acestei configurații a fost folosit un mediu compozit Nd:YAG/YAG de tip ceramic ca și mediu activ laser. Regiunea marginală de YAG nedopat care înconjoară mediul de Nd:YAG are rolul de a diminua efectele termice ce apar în mediu în timpul emisiei laser. Particularitatea acestei configurații este faptul că mediul are o formă de lentilă concavă, adică o suprafață este plană iar pentru cealaltă suprafață grosimea mediului la margine este mai mare și cea la centru este mai mică. Caracteristicile mediului compozit au fost stabilite în urma unor simulări privind absorbția optimă a pompajului în mediu. Pompajul este realizat cu trei diode laser, radiația livrată de acestea este focalizată în trei fibre optice care sunt poziționate în trei puncte perpendicular pe marginea mediului activ fără a fi nevoie de elemente optice adiționale. Performanțele laser au fost măsurate, adică valoarea maximă a energiei laser la ieșire a fost $E_p=31.8$ mJ corespunzătoare unei valori totale de $E_{pump}=114.6$ mJ (energie măsurată de la toate cele trei diode laser). Eficiența optică a fost determinată ca fiind $\eta_o~0.28$ iar panta eficienței $\eta_s~0.31$.

Folosind acest tip de configurație a fost obținut un sistem compact și robust care este foarte puțin sensibil la dezalinieri. În ceea ce privește perfomanțele laser ale sistemului, acestea pot fi îmbunătățite dacă schimbul de temperatură între sistemul de răcire și mediul activ este eficientizat.

3.4 Laseri de tip ghid de undă realizați prin scriere directă cu fascicul laser cu durată de ordinul femtosecundelor

3.4.1 Tehnica de scriere "pas cu pas"

Montajul experimental utilizat pentru realizarea ghidurilor de undă este prezentat în Figura 3.4.1a. În cazul acestei tehnici, scrierea ghidurilor este realizată pe direcția perpendiculară pe cea

în care se va obține emisie laser. Structurile sunt realizate scriind linii consecutive la diferite adâncimi astfel încât acestea să încadreze o regiune cu indice de refracție nemodificat, emisia fiind obținută în această regiune.



Figura 3.4.1. Montajul experimental folosit pentru a) tehnica de scriere "pas cu pas" a ghidurilor de undă în mediile laser: λ/2- lama"jumătate de undă", P- polarizor, F- filtru neutru; b). tehnica care utilizează deplasarea mediului laser pe o traiectorie helicoidală.

Sistemul laser utilizat pentru a produce variații în material este un laser de tip Ti:safir. Acesta generează pulsuri cu durată de 200 fs, cu rata de repetiție de 2 kHz și energie maximă de 1 mJ, la lungimea de undă de 775 nm iar calitatea fasciculului a fost măsurată ca fiind M²=1.5.

3.4.2 Tehnica de scriere "helical movement"

Tehnica de scriere a structurilor tip ghid de undă prin deplasarea mediului laser pe o traiectorie de tip helicoidal este descrisă în Figura 3.4.1b. Pierderile prin propagare în cazul stucturilor realizate folosind tehnica de scriere" pas cu pas" pot fi destul de ridicate, de aceea a fost dezvoltată o tehnică care să permită realizarea de structuri cu un nivel mai scăzut de pierderi. În acest caz, mediul laser este rotit cu 90°C pe sistemul de translație Oxyz iar scrierea structurilor este realizată pe direcția paralelă cu cea în care se va obține emisie laser, după cum se vede în Figura 3.4.1b. Poziția mediului laser se modifică în planul Oxy printr-o mișcare de rotație și, în același timp, se efectuează și o mișcare de translație în planul Oz. În cazul acestei tehnici pierderile în structuri sunt micșorate.

În cadrul acestui subcapitol va fi descris modul de fabricare al structurilor tip ghid de undă folosind cele două tehnici, tehnica "pas cu pas" și tehnica "mișcarea helicoidală a materialului", în mai multe tipuri de materiale cu stare solidă: medii cristaline de Nd:YAG, medii de Nd:YAG de tip ceramic, medii cristaline de Nd:YVO₄ și medii compozite de Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG de tip ceramic. De asemenea, aceste structuri vor fi caracterizate pentru a determina pierderile prin propagare și pentru a evalua performanțele laser la diferite lungimi de undă (0.9, 1.06 și 1.3 µm) și în diferite regimuri de funcționare (undă continuă, quasi-continuă și Q-switch).

3.4.3 Laseri de tip ghid de undă realizați în Nd:YAG cristal

Inițial, au fost realizate structurile într-un mediu cristalin de Nd:YAG cu concentrație de ioni dopanți de Nd:0.7-at.% Nd (t=3 mm si l=8 mm). Apoi mediul a fost șlefuit pe suprafețele

exterioare și investigat cu ajutorul unui microscop. Pentru focalizarea fasciculului laser în fs în mediile au fost utilizate trei obiective optice, cu mărirea 100x (NA= 0.5), 40x (NA= 0.65) și 20x (NA= 0.40). Viteza de scriere a fost setată ca fiind 50 μ m/s.

Distanța de lucru a obiectivului 100x este foarte scurtă, de aceea pentru realizarea de structuri mai complexe în volumul materialului a fost utilizat obiectivul de 20x.

Astfel, au fost obținute ghiduri de undă de tipul II, formate din două linii paralele situate la distanța de 40 μ m (Figura 3.4.2a, b); ghiduri de tipul II cu forma alungită ca în Figura 3.4.2c: modificarea indicelui de refracție a fost realizată astfel încât să se obțină, în secțiune, două linii paralele la o anumită adâncime și două linii în aceeași poziție dar la adâncime mai mare (pe direcția Oz) pentru a obține efectul de alungire, apoi a fost trasată o pereche de linii deplasate la 4 μ m (pe direcția Oy) pentru a îmbunătăți calitatea optică a structurilor.



Figura 3.4.2. Structuri realizate în mediul Nd: YAG: a) linii paralele la suprafața mediului (distanța între ele: 40 μm); b) structura de tipul II, distanța A= 40 μm (WG-1); c) ghid de undă de tipul II cu structura alungită pe axa Oy (WG-2); d) structura de tip "cladding" de formă dreptunghiulară (B= 40 μm, C= 50 μm), DWG-3; e) structura de tip "cladding" de formă circulară (D= 80 μm), DWG-4 si f) structura de tip "cladding" de formă eliptică (E= 120 μm, F= 165 μm), DWG-5.

Au fost realizate structuri complexe de tip "cladding" cu formă dreptunghiulară (Figura 3.4.5d), de tip cilindru cu secțiune circulară (Figura 3.4.2e) sau eliptică (Figura 3.4.2f). Adâncimea corespunzătoare a fost ~300 µm în volumul mediului de Nd:YAG pe direcția Oz.

Pentru a măsura pierderile acestor structuri a fost construit montajul prezentat în Figura 3.4.3. Fasciculul (polarizat) al unui laser HeNe (632.8 nm) a fost focalizat (cu lentila L1) în fiecare structură de tip ghid de undă. Puterea radiației laser a fost măsurată înainte și după fiecare structură. Pierderile au fost determinate ca fiind: 0.4 dB/cm pentru propagarea în mediul de Nd:YAG (fără a fi realizate structuri în volum sau pe suprafață: "bulk"), 1.1 dB/cm pentru WG-1, 1.4 dB/cm pentru WG-2, 2.2 dB/cm pentru DWG-3, 1.6 dB/cm pentru DWG-4 și 1.0 dB/cm pentru DWG-5.

Performanțele laser ale structurilor realizate în cristalul de Nd:YAG au fost investigate întrun montaj experimental similar cu cel prezentat în Figura 3.4.4. Pompajul a fost realizat cu o diodă laser cu emisie la λ_p = 807 nm. Radiația provenită de la diodă a fost livrată cu o fibră optică cu diametrul de 100 µm și apertură numerică NA= 0.22.

Scopul final în ceea ce privește structurile tip ghid de undă realizate în medii active laser este de a genera emisie laser la diverse lungimi de undă, în mai multe regimuri de funcționare. În

ceea ce privește performanțele emisiei laser pentru tranziția ${}^{4}F_{3/2}$ -> ${}^{4}I_{11/2}$ la lungimea de undă corespunzătoare de 1.06 µm, în Figura 3.4.5 sunt prezentate rezultatele pentru funcționarea laserului în regim de undă quasi-continuă. Acest regim de funcționare a fost selectat pentru a evita efectele termice ce apar în mediul activ datorită nivelurilor ridicate de pompaj, deoarece mediul a fost plasat într-o montură de aluminiu fără un sistem de răcire. Perntru a evalua emisia laser la 1.06 µm am utilizat o oglindă plană de pompaj care prezintă reflectivitate ridicată la lungimea de undă laser (R>0.998) și mai multe oglinzi de extracție cu diverse valori ale transmisiei la această lungime de undă.



Figura 3.4.3. Montaj experimental utilizat pentru caracterizarea ghidurilor de undă: laser cu HeNe, L1: lentilă de focalizare, L2: lentilă de colimare, PM: aparat de măsură a puterii.



Figura 3.4.4. Montaj experimental utilizat pentru caracterizarea performanțelor laser ale structurilor tip ghid de undă: FO- fibră optică, λ_p- lungimea de undă a radiației de pompaj, L1 şi L2- lentile asferice, HRM- oglindă de pompaj, OCM- oglindă de extracție, λ_{em}- lungimea de undă a radiației laser.

Inițial, am măsurat energia laser la ieșire pentru cristalul 0.7-at.% Nd:YAG în volum ("bulk"). Energia maximă măsurată la 1.06 μ m a fost E_p=2.96 mJ pentru pompaj maxim de E_{pump}=9.1 mJ (eficiența optică $\eta_0 \sim 0.33$) iar panta eficienței η_s a fost 0.34 (Figura 3.4.5).

Următorul pas a fost acela de a obține emisie laser corespunzătoare tranziției ${}^{4}F_{3/2}$ -> ${}^{4}I_{13/2}$ a ionului de Nd³⁺ cu lungimea de undă 1.32 µm în materialul-gazdă de YAG. Pentru a obține emisie laser la 1.3 µm, rezonatorul a fost realizat în configurație plană, astfel încât oglinda de pompaj să prezinte reflectivitate ridicată la această lungime de undă iar cea de extracție să prezinte transmisie (prestabilită) la 1.3 µm și, în același timp, transmisie ridicată (T>0.95) la lungimea de undă 1.06 µm.

A fost făcută o investigație sistematică a performanțelor emisiei laser la 1.06 și 1.32 µm, în regim de pompaj de undă quasi-continuă și undă continuă iar datele obținute sunt prezentate în Tabelul 3.3.

A fost generată emisie laser și la 946 nm (corespunzătoare tranziției de tip quasi-3 niveluri, ${}^{4}F_{3/2} \rightarrow {}^{4}I_{9/2}$), pentru ghidurile de undă DWG-5 și WG-1. Energia pulsului de pompaj la prag a fost de 7.5 și 3.2 mJ, respectiv, energia pulsului laser fiind de 0.12 și 0.36 mJ. În acest caz am utilizat o oglindă de pompaj care prezintă reflectivitate ridicată la lungimea de undă 946 nm și o oglindă de extracție cu transmisie T=0.015 la această lungime de undă.

În concluzie, au fost realizate structuri tip ghid de undă în mai multe configurații folosind metoda optică, de scriere directă cu un fascicul laser în fs, într-un mediu cristalin de Nd:YAG cu concentrație de ioni dopanți de Nd 0.7-at.% Nd (t=3 mm şi l=8 mm).



Figura 3.4.5. Energia pulsului laser la 1.06 μm în funcție de energia pulsului de pompaj la 807 nm, transmisia oglinzii de ieșire T=0.10. În medalion este prezentată distribuția (2D) a fasciculului laser obținut de la ghidul de undă DWG-5.

Scopul final a fost acela de a genera emisie laser în infraroșu, la 1.06 și 1.32 µm cu eficiența cât mai ridicată de la un sistem laser într-o configurație simplă. Prin urmare, ca sursa de pompaj, a fost utilizată o diodă laser cu emisie la 807 nm, pe când în studiile anterioare pompajul era furnizat de către un sistem laser cu Ti:safir. Utilizarea diodelor laser permite realizarea unui sistem laser mult mai compact comparativ cu cele dezvoltate până în prezent.

Nivelul de prag al emisiei laser la cele două lungimi de undă, 1.06 și 1.32 µm, este mai ridicat pentru structurile tip ghid de undă decât cel coprespunzător emisiei în materialul "bulk" datorită valorilor mai ridicate ale pierderilor optice. Pentru a putea realiza o comparație între performanțele laser ale structurilor și ale mediului, nivelul de pierderi ar trebui să fie același.

1 ()	Mod de	Configuratio	Nivel de pompaj	Laser	Panta
λ_{em} (µm)	operare	Configurație	(mJ)	(mJ)	eficienței, η _s
		Bulk	9.0	2.96	0.34
	anosi on	DWG-5	9.0	1.80	0.22
	quasi-cw	DWG-3	9.0	0.40	0.09
1.06 µm		WG-1	4.6	0.92	0.28
	cw	Bulk	3.8	1.30	0.39
		DWG-5	3.8	0.54	0.17
		WG-1	3.2	0.49	0.20
		Bulk	9.1	2.10	0.25
		DWG-5	9.1	0.40	0.10
1.22 um	quasi-cw	DWG-3	9.1	0.17	0.05
1.52 μm		WG-1	4.6	0.40	0.17
	OW	Bulk	3.2	0.55	0.20
	Cw	WG-1	3.2	0.11	0.05

Tabelul 3.3. Energia maximă a pulsului laser și nivelul maxim al puterii laser la 1.06 și 1.32 μm obținute în cristalul 0.7 at.% Nd:YAG.

3.4.4 Laseri de tip ghid de undă realizați în medii Nd: YAG ceramic

În continuare, am realizat structuri tip ghid de undă în medii ceramici de Nd:YAG cu diferite concentrații de ioni dopanți: 0.7-at.% Nd:YAG (R12077-1, l=5 mm), 0.7-at.% Nd:YAG, (R12077-4, l=8 mm); 1.1-at.% Nd:YAG (R12078-2, l=5 mm) și 1.1-at.% Nd:YAG, (R12078-4, l=8 mm), folosind cele două metode: tehnica de scriere "pas cu pas" și tehnica de scriere "helical movement".

<u>Tehnica de scriere "pas cu pas".</u> Pentru realizarea structurilor am folosit montajul prezentat în Figura 3.4.1. Însă, în cazul acestor materiale am utilizat pentru focalizarea fasciculului laser în fs o lentilă asferică cu distanța focală f=7.5 mm. De asemenea, valoarea energiei pulsului laser necesară pentru a realiza modificări ale indicelui de refracție a fost determinată pentru fiecare dintre cele patru medii.

În fiecare mediu Nd:YAG ceramic au fost realizate ghiduri de undă de tipul II, cu distanțele între linii de 50 μ m la 500 μ m în volum față de suprafața de intrare a Nd:YAG. Dimensiunea liniilor pe direcția Oz a fost de aproximativ 45 μ m. Pentru a mări dimensiunile liniilor pe această direcție au fost realizate structuri alungite formate din șase linii cu distanța totală între ele de $w=50 \mu$ m (Figura 3.4.6, WG2) sau $2w=100 \mu$ m (Figura 3.4.6, WG3). În cazul fabricării acestor structuri, energia fasciculului laser a fost setată la valoarea 2.0 μ J. Apoi, au fost realizate două structuri circulare, unul cu diametrul $\phi=50 \mu$ m (Figura 3.4.6, DWG-1) și al doilea cu $\phi=100 \mu$ m (Figura 3.4.6, DWG-2).

Pentru a evalua nivelul de pierderi atât în volumul ("bulk") mediilor de Nd:YAG cât și în toate structurile realizate în acestea am utilizat montajul experimental reprezentat anterior în Figura 3.4.3: pentru ghidurile de tipul II, pierderile au fost între 0.50 și 1.35 dB/cm. În cazul structurilor circulare, pierderile au fost în intervalul 1.14-2.96 dB/cm. De asemenea, am măsurat pierderile pentru propagarea în volumul mediilor de Nd:YAG ca fiind de 0.21-0.45 dB/cm.



Figura 3.4.6. Exemple de ghiduri de undă realizate în diferite medii Nd:YAG ceramice: Ghiduri de tipul II, cu distanța de 50 μm (WG2-d) şi 100 μm (WG3-d) şi de tip circular, cu diametrul de 50 μm (DWG1b) sau de 100 μm (DWG2-a).

Performanțele laser ale structurilor realizate în materialele ceramici de Nd:YAG au fost investigate într-un montaj experimental similar cu cel prezentat în Figura 3.4.4. Pompajul a fost realizat cu aceeași diodă laser ca în cazul mediului cristalin de Nd:YAG, cu emisie la λ_p = 807 nm, în aceeași configurație. Am obținut emisie laser la 1.06 µm și apoi am măsurat performanțele emisiei în toate ghidurile de undă. De exemplu, în Figura 3.4.7 este reprezentată energia pulsurilor laser emise de ghidurile de undă circulare cu diametrul de 100 µm, în regim de pompaj quasi-cw (rată de repetiție de 2 Hz, durata pulsului de pompaj de 1 ms) și oglinda de extracție plană cu transmisie la lungimea de undă laser T=0.05.

În Tabelul 3.4 sunt prezentate toate rezultatele privind emisia laser la 1.06 μ m în regim de funcționare de quasi-cw de la structurile de Tipul II și cele circulare, cu diametru de ϕ =50 μ m și 2ϕ =100 μ m.



Figura 3.4.7. Energia pulsului laser la 1.06 μm în funcție de energia pulsului de pompaj la 807 nm pentru ghidurile de undă circulare cu diametrul de 100 μm realizate în mediile laser Nd:YAG ceramici, oglinda de extracție T=0.05. În dreapta sunt prezentate distribuțiile 2D și 3D ale fasciculelor laser.

Rezultatele obținute pentru cele patru medii ceramici sunt asemănătoare chiar dacă absorbția în mediile cu concentrația de ioni dopanți de 1.1-at.% Nd este mai mare decât pentru mediile cu 0.7-at.% Nd. Dar, pe măsură ce concentrația de ioni crește, crește și nivelul de pierderi reziduale în rezonatorul laser.

Mediul laser	Configurația	Nivel de pompaj (mJ)	Laser (mJ)	Panta eficienței, η _s
	Bulk	12.5	5.1	0.41
	DWG1-a (φ=50 μm)	12.5	2.7	0.24
R12077-1 (0.7-at.% Nd:YAG. 5 mm)	DWG2-a (φ=100 μm)	12.5	1.5	0.16
	WG2-a (d=50 µm)	4.7	0.59	0.16
	WG3-a (d=100 µm)	4.7	0.57	0.15
	Bulk	13.2	5.95	0.46
	DWG1-b (φ=50 μm)	13.2	2.6	0.24
R12077-4	DWG3-b2 (φ=50 μm)	13.2	3.9	0.36
(0.7-at.% Nd:YAG, 8 mm)	DWG4-b2 (\$=100 \mum)	13.2	2.5	0.23
	WG2-b (d=50 µm)	4.9	0.8	0.22
	WG3-b (d=100 µm)	4.9	0.55	0.16
	Bulk	13.2	5.5	0.43
R12078-2	DWG2-c1 (elipsa)	13.2	2.5	0.23
(1.1-at.% Nd: YAG, 5 mm)	DWG2-c2 (\$=100 \mumber)	13.2	2.2	0.19
	WG2-c (d=50 µm)	4.9	1.0	0.19
	Bulk	13.2	5.5	0.43
D12070 4	DWG2-d (\$=100 \mumber)	13.2	2.2	0.20
(1.1 of % Nd; VAC mm)	DWG4-d (\$=100 \mumber)	13.2	2.7	0.25
(1.1-al. 70 INU; 1 AG, 8 IIIII)	WG2-d (d=50 µm)	4.9	1.1	0.27
	WG3-d (d=100 µm)	4.9	0.7	0.18

Tabelul 3.4. Energia maximă a pulsului laser la 1.06 μm obținute în experimentele cu materialele ceramici de Nd:YAG.

Nivelul de pierderi a fost determinat experimental cu ajutorul metodei Findlay-Clay. Metoda presupune reprezentarea grafică a valorilor pentru puterea de pompaj la pragul laser pentru mai multe oglinzi de extracție utilizate (transmisie de la 0.01 până la 0.10). Astfel, pierderile reziduale L_i sunt mai mari în cazul mediilor de Nd:YAG cu nivel de dopaj mai ridicat. Deci absorbția crește dar pierderile L_i cresc și ele, ceea ce explică faptul că performanțele laser sunt similare pentru mediile cu concentrație diferită de ioni dopanți pentru emisia la 1.06 µm.

De asemenea, am obținut emisie laser și în regim de undă continuă. În Figura 3.4.8 este reprezentat nivelul maxim de putere de ieșire la 1.06 μ m măsurat pentru structurile circulare în volum: DWG4-b2 si DWG2-d (2 ϕ =100 μ m), realizate în mediile de Nd:YAG ceramic de lungime 8 mm și concentrații 0.7-at.% și 1.1-at.% Nd. În cazul mediului de 0.7-at.% Nd:YAG, a fost măsurată o valoare maximă de 0.49 W pentru 3.7 W putere de pompaj la lungimea de undă 807 nm ($\eta_0 \sim 0.13$) și panta eficienței $\eta_s \sim 0.25$. Distribuția fasciculului laser este simetrică (după cum se poate vedea în Figura 3.4.8) iar factorul de calitate a fost determinat ca fiind M²~3.2.



Figura 3.4.8. Puterea de ieșire la 1.06 μ m măsurată în ghidurile DWG4-b2 și DWG2-d realizate în mediile de Nd:YAG ceramici de lungime 8 mm, cu oglinda de extracție cu 0.05. În medalion este reprezentată distribuția 2D a fasciculului laser, P_{max}= 0.49W.

Rezultatele obținute în toate mediile Nd:YAG ceramici, pentru emisie în regim de undă continuă sunt prezentate sistematic în Tabelul 3.5. Pentru emisia laser la 1.32 µm, am construit un rezonator laser compus dintr-o oglindă de pompaj depusă care prezintă straturi subțiri dielectrice depuse pe una din suprafețe pentru a obține reflectivitate ridicată la această lungime de undă și oglinda de extracție care a fost depusă pentru a transmite lungimea de undă 1.32 µm cât și pentru transmisie ridicată (HT~0.995) la 1.06 µm cu scopul a evita oscilația laser la această lungime de undă. În Figura 3.4.9 sunt reprezentate caracteristicile emisiei laser în cazul în care radiația de pompaj a fost utilizată în regim de undă quasi-continuă (durata pulsurilor 1 ms și rata de repetiție 5Hz) iar transmisia oglinzii de extracție a fost T=0.03. În cazul structurii circulare DWG4-b2 realizate în mediul de 0.7-at.% Nd:YAG de lungime 8 mm a fost măsurat un nivel maxim de energie $E_p=1.2$ mJ ($E_{pump}=13.0$ mJ, $\eta_o=0.09$). Pentru structura DWG2-d realizată în mediul de 1.1-at.% Nd:YAG de aceeași lungime, a fost măsurată o valoare maximă a energiei de $E_p=0.75$ mJ și panta eficienței $\eta_s=0.11$.



Figura 3.4.9. Energia de ieșire laser la 1.3 μm măsurată pentru structura DWG4-b2 în mediul de 0.7-at.% Nd:YAG ceramic și DWG2-d în mediul de 1.1-at.% Nd:YAG ceramic, transmisia oglinzii de extracție T=0.03.

Mediul laser	Configurația	Nivel de pompaj (W)	Laser (W)	Panta eficienței, ηs
	Bulk	3.6	1.4	0.40
	DWG1-a (φ=50 μm)	3.6	0.6	0.26
R12077-1 (0.7-at.% Nd: YAG, 5 mm)	DWG2-a (φ=100 μm)	-	-	-
(WG2-a (d=50 µm)	1.8	1.8	0.18
	WG3-a (d=100 µm)	2.3	2.3	0.17
	Bulk	3.7	1.54	0.45
	DWG1-b (φ=50 μm)	3.7	0.57	0.29
R12077-4	DWG3-b2 (φ=50 μm)	3.7	0.9	0.32
(0.7-at.% Nd: YAG, 8 mm)	DWG4-b2 (\$=100 \mumber)	3.7	0.49	0.24
	WG2-b (d=50 µm)	2.2	0.3	0.21
	WG3-b (d=100 µm)	2.2	0.17	0.16
	Bulk	3.7	1.4	0.41
R12078-2	DWG2-c1 (elipsa)	3.7	0.37	0.19
(1.1-at.% Nd: YAG, 5 mm)	DWG2-c2 (\$=100 \mumber)	3.7	0.27	0.13
	WG2-c (d=50 µm)	2.2	0.35	0.23
	Bulk	3.7	1.3	0.38
D12079 4	DWG2-d (\$=100 \mumber m)	3.5	0.26	0.21
K120/8-4 (1 1-st % Nd: VAC 8 mm)	DWG4-d (φ=100 μm)	3.7	0.4	0.22
(1.1-al. /0 INU. 1 A.G, 0 IIIII)	WG2-d (d=50 µm)	2.2	0.4	0.26
	WG3-d (d=100 µm)	2.2	0.25	0.18

Tabelul 3.5. Nivelul maxim de putere la ieșire la $1.06 \mu m$ obținute în experimentele cu materialele ceramici de Nd:YAG.

<u>Tehnica de scriere "helical movement"</u>. După cum am precizat anterior, structurile realizate prin metoda de scriere "pas cu pas" pot prezenta pierderi prin transmisie de nivel ridicat. De aceea a fost dezvoltată tehnica de scriere prin mișcarea mediului activ pe o traiectorie de tip helicoidal. În cazul primei metode, modificarea locală a indicelui de refracție este realizată pe direcția perpendiculară față de cea corespunzătoare emisiei laser. Aici, structurile sunt realizate deplasând mediul pe această direcție astfel încât să fie obținută o modificare sub formă de linie în mediul activ. Structurile sunt realizate scriind linii la distanțe de ordinul micronilor și la diferite adâncimi astfel încât, împreună, să încadreze o regiune a mediului cu indice de refracție nemodificat. Emisia laser va fi generată în această zonă iar fenomenul de ghidare al radiației va fi datorat diferenței de indice de refracție între această zonă și liniile create (Figura 3.4.1a). Ghidurile de undă scrise prin metoda "helical movement" urmează același principiu dar, în acest caz, pierderile prin transmisie ale acestor ghiduri sunt mai mici deoarece nu mai apar acele zone nemodificate. Tehnica de scriere a structurilor tip ghid de undă prin mișcarea mediului laser pe o

traiectorie de tip helicoidal este descrisă în Figura 3.4.1b. În acest caz, mediul laser este rotit cu 90°C pe sistemul de translație Oxyz pe care a fost poziționat iar scrierea structurilor este realizată pe direcția paralelă cu cea în care se va obține emisie laser. Poziția mediului laser este variată în planul Oxy printr-o mișcare de rotație și, în același timp, se efectuează și o mișcare de translație în planul Oz.

Montajul experimental utilizat pentru realizarea de structuri tip ghid de undă este similar cu cel folosit în experimentele anterioare.

În cadrul experimentelor am folosit un mediu de 1.1-at.% Nd:YAG de tip ceramic cu 5 mm lungime. Am realizat trei structuri circulare cu diametre diferite (50, 80 si 100 μ m). Unul dintre avantajele pe care le prezintă această metodă este faptul că durata de lucru pentru realizarea unei structuri este redusă drastic. De exemplu, pentru obținerea structurii cu diametrul de 100 μ m au fost necesare 105 sec. În schimb, pentru o structură circulară cu același diametru realizată cu tehnica de scriere "pas cu pas" au fost realizate 38 de linii paralele pe direcția O_x cu viteza de 50 μ m/s iar timpul de lucru a fost de o oră. Dar, această tehnică prezintă și o limitare majoră: pot fi realizate structuri tip ghid de undă în medii active laser cu o lungime maximă în funcție de distanța de lucru a obiectivului utilizat pentru a focaliza fasciculul laser în fs.

În Figura 3.4.10 pot fi observate imaginile la microscop ale structurilor circulare (în secțiune) tip ghid de undă. Cele trei structuri vor fi denumite folosind simbolurile DWG-1 (cu diametru ϕ =100 µm, Figura 3.4.10a), DWG-2 (ϕ =80 µm) și DWG-3 (ϕ =50 µm, Figura 3.4.10b).



Figura 3.4.10. Imagini ale ghidurilor de undă circulare realizate în mediul 1.1-at.% Nd:YAG ceramic prin mișcarea helicoidală: **a**) DWG-1, diametrul ϕ = 100 µm; **b**) DWG-3, ϕ = 50 µm. Ghidul **c**) DWG-4, ϕ = 100 µm a fost obținut prin tehnica de translație. Sunt prezentate imagini ale pereților ghidurilor de undă **d**) DWG-1 și **e**) DWG-4.

În Figura 3.4.11a este ilustrată o imagine la microscop a suprafeței S2 a ghidului DWG-4. Se observă că în cazul scrierii cu metoda clasică pereții ghidului sunt formați din suma urmelor lasate în Nd:YAG de laserul cu fs; zonele în care indicele de refracție rămâne nemodificat acționează ca pierderi, atât pentru radiația de pompaj cât și pentru ghidarea emisiei laser. În cazul ghidului realizat prin metoda helicoidală (Figura 3.4.11b) peretele este continuu și uniform. Imagini ale suprafeței S2 în cazul pompajului, arătate în Figura 3.4.11c pentru ghidul DWG-4 și în Figura 3.4.11d pentru ghidul DWG-1, ilustrează clar diferențele dintre ghidurile obținute prin cele două metode. În Figura 3.4.11e se observă felul în care fasciculul laser HeNe se propagă în

ghidul DWG-4 iar în Figura 3.4.11f propagarea în ghidul DWG-1, pe o lungime de 2.5 mm (aproape de suprafața S2).



Figura 3.4.11. Fotografii la microscop ale suprafeței S2 pentru ghidurile de undă a) DWG- 4 și b) DWG-1. Imagini ale suprafeței S2 înregistrate în timpul pompajului optic, pentru ghidurile c) DWG-4 și d) DWG-1. Se poate observa modul de propagare al unui fascicul laser He-Ne pe o lungime de 2.5 mm în ghidurile e) DWG-4 f) DWG-1.

În continuare, au fost analizate performanțele laser ale celor trei structuri. Montajul experimental utilizat pentru a genera emisie laser este similar cu cel folosit în experimentele anterioare. Pompajul a fost realizat folosind o diodă laser care a funcționat atât în regim pulsat (durata pulsurilor de pompaj 1 ms și rata de repetiție 5 Hz) cât și în regim de undă continuă. Fasciculul de pompaj a fost focalizat în mediul laser folosind o lentilă de colimare cu distanța focală 50 mm și o lentilă de focalizare cu distanța focală 30 mm. Mediul de Nd:YAG a fost amplasat pe un suport din aluminiu fără răcire adițională.



Figura 3.4.12. a) Energia laser la 1.06 μm în funcție de energia de pompaj în cazul structurii de tip ghid de undă DWG-1. În partea dreaptă sunt reprezentate distribuțiile 2D şi 3D ale fasciculelor laser corespunzătoare valorii maxime ale energiei (OCM cu T= 0.10) pentru emisie în b) DWG-1 (E_p= 3.4 mJ) şi c) în volumul Nd: YAG (E_p= 5.5 mJ).

În Figura 3.4.12 sunt reprezentate caracteristicile laser ale structurii DWG-1 pentru emisia la lungimea de undă 1.06 μ m. În cadrul experimentelor am utilizat oglinzi de ieșire cu valori diferite ale transmisiei (T=0.01 până la T=0.10). Pentru oglinda de extracție cu transmisie T=0.01 a fost generată emisie laser de la această structură cu energie maximă E_p=1.1 mJ pentru o energie de pompaj E_{pump}=13.1 mJ, cu panta eficienței η_s =0.09. În cazul emisiei laser în volumul

mediului de Nd:YAG am măsurat o valoare maximă de $E_p=5.5$ mJ ($\eta_0=0.42$) cu panta eficienței de $\eta_s=0.45$. Distribuția transversală este reprezentată în Figura 3.4.12c.

Nu poate fi realizată o comparație între performanțele laser în volum și cele ale structurilor tip ghid de undă, deoarece fenomenul de absorbție al pompajului este diferit în ghid în urma fenomenului de reflexie totală internă și, în plus, pierderile prin propagare nu pot fi determinate cu exactitate. Cu toate acestea, eficiența de cuplare a fasciculului de pompaj în ghid a fost determinată a fi aproximativ egală cu 1. În concluzie, performanțele scăzute ale emisiei laser în structura DWG-1 se datorează nivelului mai ridicat de pierderi decât cel corespunzător mediului de Nd:YAG (în volum). Se presupune că aceste pierderi au o influență semnificativă atât asupra absorbției fasciculului de pompaj în ghidul de undă, cât și asupra emisiei laser.

În Figura 3.4.13 sunt reprezentate caracteristicile emisiei laser pentru cele trei structuri, realizate în mediul de 1.1-at.% Nd:YAG ceramic, la cele două lungimi de undă, λ_{em} = 1.06 și 1.32 µm, pentru pompaj la λ_p = 807 nm în regim de undă quasi-continuă. Transmisia oglinzii de ieșire a fost aleasă ca T=0.10. În cazul emisiei la 1.06 µm (Figura 3.4.13a) a fost măsurată o energie E_p maximă de 3.5 mJ (η_0 ~0.27) cu panta eficienței η_s =0.31 pentru structura DWG-2 iar pentru structura DWG-3 energia maximă a fost E_p= 4.1 mJ (η_0 ~0.31) și panta eficienței η_s =0.36.



Figura 3.4.13. Performanțele laser în regim de pompaj quasi-cw de la ghidurile realizate în 1.1-at.% Nd:YAG ceramic prin deplasare helicoidală (DWG-1, 2, 3) și ghidul DWG-4 obținut prin metoda de scriere prin translație, emisie la **a**) 1.06 μm, OCM cu T= 0.10 și **b**) 1.32 μm, OCM cu T= 0.03.

A fost obținută emisie la 1.3 µm pentru toate cele trei structuri, dar cu performanțe foarte scăzute. Acest comportament se datorează efectelor termice și poate fi îmbunătățit dacă mediul laser va fi integrat într-un sistem de răcire.

Emisie laser de putere mare în sisteme tip ghid de undă realizate în Nd:YAG de tip policristalin (ceramici). În experimentele anterioare am utilizat pompajul cu diodă laser, în regim quasi-continuu, pentru a obține emisie laser eficientă la lungimile de undă (λ_{em}) de 1.06 µm și 1.32 µm de la ghiduri de undă scrise cu fascicul laser cu durata de ordinul fs în Nd:YAG. Totuși, în cazul emisiei în regim continuu (cw), la λ_{em} = 1.06 µm, puterea de ieșire laser a fost limitată la 0.51 W (cu eficiența optică η_{oa} = 0.13, pompaj la λ_p = 807 nm) în Nd:YAG (structura DWG-2). Mai mult, pentru λ_{em} = 1.32 µm puterea laser a avut valori mici (de 0.15 W). Scopul final este acela de a îmbunătăți cât mai mult performanțele laser ale structurilor tip ghid de undă realizate în medii active laser. În continuare vor fi prezentate rezultatele privind emisia laser la 1.06 și 1.32 μ m în diferite structuri tip ghid de undă realizate în medii de Nd:YAG ceramic.

Au fost realizate ghiduri de undă cu raza de 100 µm în diferite medii Nd:YAG, astfel: DWG-1 în 0.7-at.% Nd:YAG cu lungimea de 4.8 mm; DWG-2, în 0.7-at.% Nd:YAG, 7.8 mm; DWG-3, în 1.1-at.% Nd:YAG, 7.7 mm şi DWG-4, în 1.1-at.% Nd:YAG, 4.5 mm, acestea fiind fabricate prin tehnica de scriere "pas cu pas" prin translația mediului. În plus, am folosit metoda de mişcare pe o tractorie helicoidală a mediului pentru a realiza un ghid de undă cu același diametru (ϕ = 100 µm) în 1.1-at.% Nd:YAG, cu lungime de 4.5 mm. După ce procesul de realizare a structurilor a fost finalizat, suprafețele de intrare și ieșire în ghiduri au fost prelucrate optic (paralelism 10"; planeitate $\lambda/10$ la 633 nm) și au fost depuse cu straturi dielectrice. Astfel, suprafața S1 a fost depusă antireflex AR (R< 0.5%) la λ_{em} = 1.06 și 1.32 µm și pentru transmisie ridicată HT (R< 2.5%) la lungimea de undă de pompaj λ_p = 807 nm. De asemenea, suprafața laterală S2 a fost depusă antireflex AR la lungimile de undă laser λ_{em} .

Emisia laser a fost obținută pentru o configurație a rezonatorului de tip plană, oglinda de pompaj (HRM) cât și oglinda de extracție (OCM) fiind plasate foarte aproape de suprafețele S1, respectiv S2 ale fiecărui mediu de Nd:YAG. În plus, mediile au fost plasate într-un sistem de răcire din cupru a cărui temperatură a fost menținută la 20°C. Pompajul a fost realizat la λ_p = 807 nm cu diodă laser. Radiația emisă de dioda laser a fost cuplată într-o fibră cu diametrul ϕ =100 µm și NA=0.22. Fasciculul de pompaj a fost focalizat în mediul laser folosind o lentilă de colimare cu distanța focală 40 mm și o lentilă de focalizare cu distanța focală 30 mm.

Rezultatele principale obținute în aceste experimente, de la toate ghidurile de undă, sunt sistematizate în Tabelul 3.6.

Metoda	Ghid	Nd:YAG	λ _{em} (μm)	Puterea P _{out} (W)	Eficiența optică, η _{0a}	Panta eficienței, ŋ _{sa}	Eficiența de absorbție, η _a
De translație pas cu pas	DWG-1	0.7-at.% Nd, 4.8 mm		1.6	0.21	0.32	0.82
	DWG-2	0.7-at.% Nd, 7.8 mm		2.0	0.24	0.33	0.90
	DWG-3	1.1-at.% Nd, 7.7 mm	1.06	2.5	0.29	0.38	0.93
	DWG-4	1.1. ot % Nd		1.7	0.19	0.29	
Helical	DWC 5	4.5 mm		3.1	0.32	0.43	0.89
movement	DWG-5	ч. 5 ШШ	1.3	1.6	0.17	0.19	

Tabelul 3.6. Performanțele emisiei laser la 1.06 μ m and 1.32 μ m obținute în ghidurile realizate în Nd:YAG.

3.4.5 Laseri de tip ghid de undă realizați în medii Nd: YVO₄

Pe lângă structurile tip ghid de undă realizate în mediile cristaline și policristaline (de tip ceramic) de Nd:YAG au fost realizate structuri tip ghid de undă în mediul uniaxial Nd:YVO₄ folosind pulsuri laser cu durata de ordinul fs. Pentru fabricarea lor am utilizat un montaj experimental similar cu cele prezentate în Figurile 3.4.1a care permite mișcarea de translație a mediului laser. În acest proces am folosit un obiectiv cu mărire 20x și apertură numerică NA=0.30, diametrul fasciculului laser provenit de la sistemul Clark CPA-2101 fiind de aproximativ 5 µm în aer.

În cadrul experimentelor am utilizat trei cristale de Nd:YVO₄ cu nivelul de dopaj de Nd de 0.5, 0.7 și 1.0-at.%, grosimea cristalelor *t* (axa Oz) și înalțimea *w* (axa Ox) au fost 3.0 mm și, respectiv, 6.0 mm. Au fost realizate structuri circulare cu diametrul de 100 μ m (Figura 3.4.14a) și o structură având secțiune transversală de formă pătrată (Figura 3.4.14b) cu latura de ~80 μ m. Aceasta din urmă a fost realizată în cristalul de 0.5-at.% Nd:YVO₄.



Figura 3.4.14. Ghiduri de undă realizate în mediul 0.5-at.% Nd:YVO₄: **a**) CWG-1, circular cu diametrul ϕ = 100 µm şi b) SWG, pătrat (80 µm × 80 µm). Imagini ale emisiei spontane înregistrate de la ghidurile **c**) CWG-1, **d**) CWG-2, mediul 0.7-at.% Nd:YVO₄, **e**) CWG-3, mediul 1.0-at.% Nd:YVO₄ şi **f**) SWG.

Se va face referire la ghiduri folosind simbolurile CWG-1 (pentru cristalul de 0.5-at.% Nd:YVO₄), CWG-2 (0.7-at.% Nd:YVO₄), CWG-3 (1.0-at.% Nd:YVO₄) și SWG (0.7-at.% Nd:YVO₄) pentru structura pătrată. În Figura 3.4.14c poate fi observată o imagine a fluorescenței pentru structura CWG-1, în Figura 3.4.14d pentru CWG-2, în Figura 3.4.14e pentru structura CWG-3 iar ultima imagine este corespunzătoare structurii pătrate SWG. Aceste imagini au fost înregistrate folosind o cameră CCD.

În Figura 3.4.15 sunt prezentate performanțele laser la lungimea de undă 1.06 μm ale structurii CWG-2 folosindu-se un pompaj în regim de undă quasi-continuă (rata de repetiție 10 Hz). Se menționează că eficiența de absorbție a pompajului a fost determinată măsurând energia incidentă și cea transmisă de fiecare structură.



Figura 3.4.15. Energia pulsurilor laser la 1.06 μ m obținute de la ghidul de undă CWG-2 (ϕ = 100 μ m, 0.7at.% Nd:YVO₄) folosind pompajul la 808 nm și la 880 nm; T este transmisia oglinzii de extracție OCM. În medalioane sunt reprezentate distribuțiile fasciculului laser.

Am obținut emisie laser și la 1.34 µm corespunzătoare tranziției ${}^{4}F_{3/2} ->{}^{4}I_{13/2}$ pentru structura CWG-1 (0.5-at.% Nd:YVO₄), după cum se poate observa în Figura 3.4.16. Pentru pompajul la 808 nm energia maximă măsurată a fost E_p = 1.5 mJ (η_{oa} ~0.14 și η_{sa} ~0.19), iar pentru pompajul la 880 nm energia a fost E_p = 1.8 mJ (η_{oa} ~0.18 și η_{sa} ~0.23).



Figura 3.4.16. Energia pulsurilor laser la 1.34 μm obținute de la ghidul de undă CWG-1 (φ= 100 μm, 0.5at.% Nd:YVO₄) folosind pompajul la 808 nm și la 880 nm; oglinda OCM cu T= 0.03.

Toate rezultatele, atât pentru pompajul la 808 cât și 880 nm, sunt prezentate în Tabelul 3.7. Se poate oberva că modificarea lungimii de undă a pompajului a dus la o creștere atât a energiei laser cât și a pantei eficienței (emisie la 1.06 µm). De asemenea, performanțele structurii pătrate SWG sunt mai scăzute, probabil, datorită suprapunerii mai slabe dintre modul de pompaj și modul laser în structură. De asemenea, se poate observa că energia laser la lungimea de undă 1.34 µm crește pentru pompajul la 880 nm.

Este bine cunoscut faptul că, pentru emisia laser la 1.06 µm, modificarea pompajului de la 808 nm la 880 nm duce la o creștere a valorii defectului cuantic ($\eta_{qd}=\lambda_p/\lambda_{em}$) cu 8.8% (de la 0.76 pentru $\lambda_p=808$ nm până la 0.827 pentru $\lambda_p=880$ nm). În aceste condiții, căldura generată în cristal în timpul emisiei laser scade cu ~28%. Pentru a verifica această afirmație, temperatura suprafeței cristalelor de Nd:YVO₄ a fost măsurată în timpul emisiei laser pentru ambele lungimi de undă de

pompaj. Măsurătorile au fost realizate cu ajutorul unei camere termice FLIR (zona de lucru de la -40° C până la $+150^{\circ}$ C).

Nd·VVO	Ghidul de) (nm)	Puterea laser,	Eficiența	Panta eficienței,
110.1 104	undă	κ _p (mm)	Pout (W)	optică, η _{oa}	η_{sa}
	CWC 1	808	1.25	0.23	0.25
0.5-at.% Nd,	SWG	880	1.44	0.28	0.31
7.2 mm		808	0.54	0.09	0.10
		880	0.63	0.11	0.13
0.7-at.% Nd,	CWC 2	808	0.9	0.17	0.20
4.8 mm	CwG-2	880	1.5	0.27	0.28
1.0-at.% Nd,	CWG 2	808	1.13	0.27	0.30
3.6 mm	CWG-2	880	1.21	0.30	0.38

Tabelul 3.7. Caracteristici ale emisiei laser la 1.06 μ m în regim de operare de undă continuă; oglinda OCM cu transmisia T= 0.05.

3.4.6 Laser hibrid de tip ghid de undă inscripționat în mediu compozit Nd: YAG/Cr⁴⁺:YAG

Toate structurile fabricate în mediile de Nd:YAG și Nd:YVO₄ au fost utilizate pentru a genera emisie laser în regim de undă continuă. Scopul principal este acela de a genera pulsuri laser în domeniul ns de la structurile de tip ghid de undă folosind metoda pasivă de comutare a factorului de calitate în rezonator. De aceea, am realizat astfel de structuri în medii compozite Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG de tip cristal. Pentru experimente am folosit trei medii compozite de Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG. În toate cele trei cazuri, cristalul de Nd:YAG are concentrație de ioni dopanti de 1.0-at.% Nd și lungime 7 mm, în schimb mediul de Cr⁴⁺:YAG prezintă trei valori diferite pentru transmisia inițială T_i. Primul dintre ele (notat NYAG-1) are transmisia inițială T₀= 0.85, al doilea T₀= 0.80 (NYAG-2) și cel de-al treilea cu T₀=0.70 (NYAG-3). Deci, lungimea totală a mediului NYAG-1 este 8.5 mm, pentru NYAG-2 este 9.0 mm și 10.3 pentru NYAG-3.

Structurile tip ghid de undă au fost realizate în aceste medii folosind tehnica de translație a mediului (tehnica "pas cu pas"). Am fabricat structuri circulare cu diametrul (ϕ) de 100 și 150 μ m în toate cele trei medii compozite Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG. În continuare vor fi prezentate rezultatele pentru trei dintre aceste structuri. Deci, în Figura 3.4.17a se observă imaginea în secțiune la microscop a structurii cu diametrul ϕ =150 μ m realizată în mediul NdYAG-1 (T₀= 0.85). Se va face referire la această structură cu simbolul DWG-Q1. O structură cu același diametru este realizată și în mediul NdYAG-3 (T₀= 0.70) și este denumită DWG-Q3. Imaginea la microscop a structurii realizate în mediul NdYAG-2 (T₀= 0.80) este prezentată în Figura 3.4.17c, aceasta prezintă o valoare mai mică a diametrului ϕ =100 μ m. În Figura 3.4.17b și Figura 3.4.17d se observă propagarea fasciculului de pompaj în cele două ghiduri (imagine în secțiune a suprafeței de ieșire) iar în Figura 3.4.17e este prezentată o imagine cu vedere de sus a structurii DWG-Q1.



Figura 3.4.17. Imagini ale structurilor circulare realizate în mediile compozite Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG. DWG-Q1 (ϕ = 150 µm): **a**) vedere în secțiune la microscop, **b**) vedere în secțiune a pompajului focalizat în structură; DWG-Q2 (ϕ = 100 µm): **c**) vedere în secțiune la microscop, **d**) vedere în secțiune a pompajului focalizat în structură. **e**) Poză realizată pe axa Oz de-a lungul mediului compozit Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG.

Pompajul a fost realizat cu o diodă laser la lungimea de undă λ_p =807 nm iar radiația provenită de la aceasta a fost livrată cu o fibră optică cu diametrul de 100 µm și NA=0.22. Fasciculul a fost apoi colimat cu o lentilă asferică cu distanța focală de 50 mm și focalizat în mediul laser cu o lentilă de 40 mm distanță focală pentru structura cu diametrul ϕ =100 µm și una cu distanța focală de 60 mm pentru structurile cu diametru ϕ =150 µm. Pentru a genera emisie laser a fost construit rezonatorul optic în configurație liniară folosind două oglinzi plane poziționate foarte aproape de cele două suprafețe laterale ale mediilor de Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG.

Pentru a caracteriza complet emisia laser în regim pulsat sunt necesari a fi determinați mai mulți parametri decât în cazul emisiei în regim de undă continuă. Aceștia sunt: puterea de ieșire medie (P_{ave}), rata de repetiție a pulsurilor laser (f_p) și durata de puls (t_p). În Figura 3.4.18 este reprezentată variația puterii medii de ieșire în funcție de puterea de pompaj absorbită P_{abs} la λ_p =807 nm pentru emisia laser de la structura DWG-Q1.



Figura 3.4.18. Puterea medie de ieșire, P_{ave} la1.06 µm în funcție de puterea de pompaj absorbită, P_{abs} la 807 nm corespunzătoare structurii DWG-Q1 (Nd: YAG/Cr⁴⁺:YAG unde T₀= 0.85). T este transmisia oglinzii de ieșire.

Performantele laser pentru toate cele trei ghiduri de unda sunt prezentate în Tabelul 3.8.

Nd:YAG/Cr ⁴⁺ :YAG ceramic / T ₀	Ghid, φ(μm)	Putere medie, P _{ave} (W)	Putere absorbită, P _{abs} (W)	Energia pulsului laser, E _p (µJ)	Putere de vârf, P _p (kW)
NYAG-1, $T_0 = 0.85$	DWG-Q1, φ= 150 μm	1.27	6.80	9.1	1.99
NYAG-2, $T_0 = 0.80$	DWG-Q2, φ= 100 μm	0.72	5.75	10.3	2.4
NYAG-3, $T_0 = 0.70$	DWG-Q3, φ= 150 μm	1.13	6.80	15.7	4.0

Tabelul 3.8. Performanțele laser la 1.06 μm pentru structurile tip ghid de undă circulare, transmisia oglinzii de ieșire T=0.40.

3.4.7 Concluzii

În cadrul acestui subcapitol au fost realizate structuri tip ghid de undă în mai multe tipuri de medii active prin modificarea locală a valorii indicelui de refracție. Această modificare a fost indusă focalizând un fascicul laser cu durată foarte scurtă (fs) în volumul materialului prin intermediul a două metode: tehnica de scriere "pas cu pas" și tehnica de scriere "helical movement".

Tehnica de scriere "pas cu pas" a fost implementată pentru a realiza structuri liniare sau de tip "cladding" în mai multe tipuri de medii active laser: material monocristalin Nd:YAG, material de tip ceramic Nd:YAG, cristal Nd:YVO₄ și material compozit N:YAG/Cr⁴⁺:YAG de tip ceramic. Apoi structurile au fost analizate la microscop și au fost măsurate pierderile optice asociate. Ulterior, a fost generată emisie laser la mai multe lungimi de undă: 1.06 μm și 1.3 μm , atunci când laserul funcționează în regim de undă continuă sau în regim de pulsuri (metoda Q-switch).

Datorită faptului că nivelul pierderilor optice pentru structurile realizate cu această metodă este mai mare decât cele măsurate pentru materialul "bulk", a fost dezvoltată o tehnică de scriere prin deplasarea pe o traiectorie helicoidală a materialului. Această tehnică a fost utilizată pentru a realiza structuri tip ghid de undă doar în mediile de tip ceramic Nd:YAG deoarece absorbția în cazul cristalelor Nd:YVO₄ variază în funcție de starea de polarizare. De asemenea, a fost generată emisie laser la ambele cele două lungimi de undă menționate mai sus în regim de undă continuă. Nivelul de pierderi corespunzător structurilor realizate cu acestă metodă este mai mic decât celor realizate folosind tehnica de scriere "pas cu pas".

Au fost realizate ghiduri și în materiale compozite Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG cu scopul de a genera pulsuri laser cu durate de ordinul și puteri de vârf de ordinul kW.

Datorită nivelului de pierderi mai ridicat, nu poate fi realizată o comparație între performanțele laser ale structurilor tip ghid de undă și performanțele pentru materialele "bulk". Din acest motiv, sunt necesare unele îmbunătățiri ale tehnicii de scriere directă cu un fascicul laser în fs pentru ca pierderile optice aferente structurilor realizate să fie la același nivel cu cele măsurate pentru materialele "bulk".

Capitolul 4: Concluzii generale

În lucrarea de față sunt propuse mai multe solutii cu privire la configurarea sistemului laser ideal cu scopul de a fi implementat ulterior în aplicații în domeniul industrial care necesită condiții de lucru speciale (niveluri de putere ridicate, vibrații, temperatură). Soluțiile oferite implică identificarea și optimizarea parametrilor cu rol definitoriu în acest tip de sisteme (tipul pompajului optic, tipul și geometria mediului amplificator, tipul cavității rezonante, etc.). Prin urmare, au fost proiectate și realizate mai multe arhitecturi laser cu medii în stare solidă în configurații miniaturale sau compacte care livrează radiație laser cu niveluri de putere de ordinul W, kW sau MW în domeniul infraroșu apropiat și vizibil al spectrului electromagnetic.

Prima arhitectură a fost realizată pentru generarea de radiație laser cu niveluri de putere de 1.9 MW (2.5 mJ energie per puls) la lungimea de undă fundamentală 1064 nm și 0.3 MW (0.36 mJ energie per puls) în domeniul vizibil la 532 nm (prin intermediul procesului neliniar de generare a armonicii a doua). În cadrul acestei geometrii, am utilizat ca sursă de pompaj o diodă laser cu emisie la 807 nm pentru un mediu activ compozit Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG de tip ceramic. Modul de livrare al pompajul și tipul cavității rezonante au fost stabilite astfel încât dimensiunile sistemului laser să fie reduse la minim și pentru a elimina pierderile introduse prin dezalinierea elementelor optice. Aceasta este o primă demonstrație a unui astfel de sistem ce livrează pulsuri laser cu putere de vârf de 0.3 MW în domeniul vizibil utilizând metoda conversiei neliniare printr-o singură trecere. Următorul pas ar fi realizarea unui sistem laser compact care să includă și mediul neliniar de LBO.

Cea de-a doua arhitectură a fost proiectată pentru a elimina elementele optice utilizate pentru transferul pompajului într-un mediu activ laser Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG de tip ceramic de formă paralelipipedică. În acest scop a fost atașată o prismă YAG pe suprafața mediului activ. Datorită fenomenului de reflexie totală internă, fasciculul de pompaj livrat de o fibră optică este direcționat în mediu. Folosind această arhitectură au fost generate pulsuri laser la 1064 nm, cu energia maximă de $E_p=22.1$ mJ atunci când se pompează cu $E_{pump}=44.5$ mJ (eficiența optică n₀~0.50) cu panta eficienței $\eta_s=0.51$. Acest laser a fost realizat cu scopul de a fi considerat ca o alternativă la configurația utilizată în prezent pentru dispozitivul laser în fenomenul de igniție pentru aprinderea motoarelor cu combustie internă. Avantajele acestui sistem în comparație cu laserii în care pompajul este realizat longitudinal sunt urmatoarele: aranjamentul este mai simplu, este foarte compact, ușor de aliniat și oferă posibilitatea poziționării unui element optic (element neliniar sau absorbant saturabil) între oglinda de pompaj și cristalul de Nd:YAG.

A treia arhitectură este o variație laserului tip disc subțire. Diferența notabilă între cele două configurații este faptul că cea propusă aici permite pompajul cu niveluri de putere ridicate fără a utiliza elemente optice care au rolul de a crește eficiența absorbției pentru radiația de pompaj prin realizarea de treceri multiple în cavitatea rezonantă. În cadrul acestei configurații a fost folosit un mediu compozit Nd: YAG/ YAG de tip ceramic ca și mediu activ laser. Regiunea marginală de YAG nedopat care înconjoară mediul de Nd: YAG are rolul de a diminua efectele termice ce apar în mediu în timpul emisiei laser. Acesta are forma unei lentile plan-concave iar grosimea a fost stabilită astfel încât pompajul să poată fi realizat direct de la mai multe surse de

pompaj fără a fi necesare alte elemente optice. Performanțele laser au fost măsurate, adică valoarea maximă a energiei laser la ieșire a fost $E_p=31.8$ mJ corespunzătoare unei valori totale de $E_{pump}=114.6$ mJ (energie măsurată de la toate cele trei diode laser). Eficiența optică a fost determinată ca fiind $\eta_o \sim 0.28$ iar panta eficienței $\eta_s \sim 0.31$. Folosind acest tip de configurație a fost obținut un sistem compact și robust care este foarte puțin sensibil la dezalinieri. În ceea ce privește perfomanțele laser ale sistemului, acestea pot fi îmbunatațite dacă schimbul de temperatură între sistemul de răcire și mediul activ este eficientizat.

În ultima configurație, emisia laser este generată în structuri tip ghid de undă realizate în mediul activ. Aceste structuri sunt create în urma interacției dintre un fascicul laser în fs și mediul activ datorită modificării locale a indicelui de refracție. Metoda optică detine un avantaj evident față de celelalte metode: este foarte simplă, nu necesită condiții speciale de lucru, etape pregătitoare și, cu ajutorul ei, pot fi realizate structuri cu diferite forme: structuri cu doi pereți, structuri cu formă circulară ($\phi = 100 \mu m$), eliptică sau pătrată. În cazul mediilor active în care nu au fost induse variații ale indicelui de refracție, modul laser este stabilit în funcție de proprietățile optice ale cavității rezonante și de proprietățile termice ale mediului. Pentru laserii tip ghid de undă, modul de pompaj și emisia laser depind de forma și dimensiunile structurii respective. Acest tip de laseri a fost construit cu scopul pentru aplicații în domeniul optoelectronicii ca sisteme amplificatoare foarte compacte pentru radiația în infraroșu.

Aceste structuri au fost realizate folosind două metode pentru modificarea indicelui de refracție cu pulsuri laser în fs: metoda de scriere "pas cu pas" și cea prin mișcarea helicoidală a materialului.

Structurile tip ghid de undă au fost integrate în cavități rezonante pentru a obține emisie laser în infraroșu, la 1064 nm sau 1.3 µm, apoi au fost studiate performanțele laser în comparație cu emisia laser de la mediile active convenționale ("bulk"). Ca sursă de pompaj, a fost utilizată o dioda laser cu emisie la 807 nm, pe când în studiile anterioare pompajul era furnizat de către un sistem laser cu Ti:safir. Utilizarea diodelor laser permite realizarea unui sistem laser mult mai compact comparativ cu cele dezvoltate până în prezent.

Performanțele laser ale mediului cristalin de Nd: YAG cu 0.7 at.% Nd au fost măsurate pentru pompajul în pulsuri cu un nivel de energie de 9.0 mJ. Astfel, a fost generată emisie laser la lungimea de undă 1.06 µm în structura DWG-5 având energia de 1.4 mJ și panta eficienței laser η_s = 0.22, în cazul structurii DWG-5. Ghidul de undă de tip II, WG-1, a livrat pulsuri laser cu energia de 0.92 mJ și panta eficienței η_s = 0.28. În cazul emisiei laser la 1.32 µm a fost obținut un nivel maxim de energie laser E_p =0.4 mJ de la ghidul WG-1 pentru energie de pompaj E_{pump} =4.6 mJ, panta eficienței fiind η_s =0.17. În schimb, pentru ghidul DWG-5 am măsurat energia laser ca fiind E_p =0.4 mJ (E_{pump} =9.1 mJ, η_s =0.10).

Nivelul de prag al emisiei laser la cele două lungimi de undă, 1.06 si 1.32 µm, este mai ridicat pentru structurile tip ghid de undă decât cel corespunzător emisiei în materialul "bulk" datorită valorilor mai ridicate ale pierderilor optice. Pentru a putea realiza o comparație între performanțele laser corespunzătoare structurilor și ale mediului, nivelul de pierderi ar trebui să fie același.

A fost generată emisie laser și în cw, astfel: în cazul mediului de 0.7-at.% Nd:YAG, a fost măsurată o valoare maximă de 0.49 W pentru 3.7 W putere de pompaj la lungimea de undă 807 nm ($\eta_0 \sim 0.13$) și panta eficienței $\eta_s \sim 0.25$.

Ïn mediile de tip ceramic Nd:YAG au fost realizate structuri tip ghid de undă folosind metodele de scriere "pas cu pas" și "helical movement". În cazul structurilor realizate folosind prima metodă, au fost caracterizate performanțele laser la 1.06 si 1.32 μm, astfel, ghidul de undă DWG4-d (realizat în mediul 1.1-at.% Nd:YAG, lungime 8 mm) a emis pulsuri laser cu energia de 2.74 mJ, pulsurile de pompaj având energia de 13.1 mJ iar panta emisiei laser a fost η_s = 0.25. Pentru acest mediu, eficiența de absorbție a radiației de pompaj în volum a fost de η_a = 0.78. Pe de altă parte, ghidul de undă DWG2-a (realizat în mediul 0.7-at.% Nd: YAG, *l*= 5 mm) a furnizat pulsuri laser cu energia de 1.5 mJ pentru pompaj cu pulsuri cu energia de 12.5 mJ, cu panta emisiei η_s = 0.16; în acest caz eficiența de absorbție în Nd:YAG "bulk" a fost η_a = 0.61. Rezultatele obținute pentru toate mediile caracterizate sunt asemănătoare chiar dacă absorbția în mediile cu concentrația de ioni dopanti de 1.1-at.% Nd este mai mare decât pentru mediile cu 0.7-at.% Nd. Dar, pe măsură ce concentrația de ioni crește, crește și nivelul de pierderi reziduale în rezonatorul laser.

În ceea ce privește metoda "helical movement", există o serie de avantaje comparativ cu metoda "pas cu pas", unul dintre ele este faptul că durata de lucru pentru realizarea unei structuri este redusă drastic. De exemplu, pentru obținerea structurii cu diametrul de 100 μ m au fost necesare 105 sec. În schimb, pentru o structură circulară cu același diametru realizată cu tehnica de scriere "pas cu pas" au fost realizate 38 de linii paralele pe directia O_x cu viteza de 50 μ m/s iar timpul de lucru a fost de o oră. Mai mult, pierderile optice asociate acestor structuri sunt mai mici în comparație cu cele realizate cu prima metodă. Dar, această tehnică prezintă și o limitare majoră: pot fi realizate structuri tip ghid de undă în medii active laser cu o lungime maximă in funcție de distanța de lucru a obiectivului utilizat pentru focalizarea fasciculul laser.

Emisia laser la 1.06 µm a fost măsurată iar energia maximă a fost de 3.5 mJ ($\eta_0 \sim 0.27$) cu panta eficienței $\eta_s=0.31$ pentru structura DWG-2 iar pentru structura DWG-3 energia maximă a fost $E_p=4.1$ mJ ($\eta_0 \sim 0.31$) și panta eficienței $\eta_s=0.36$. Chiar dacă eficiența de cuplare a fasciculului de pompaj este mai scăzută ($\eta_c \sim 0.70$), în cazul structurii DWG-3, suprapunerea modului de pompaj cu modul laser compensează această scădere. Pentru structura DWG-4 (metoda "pas cu pas"), energia maximă la 1.06 µm a fost măsurată ca fiind $E_p=2.2$ mJ ($\eta_0 \sim 0.17$) cu panta eficienței $\eta_s=0.20$. În ceea ce privește performanțele emisiei laser la 1.32 µm, pentru structura DWG-1 a fost măsurată o valoare maximă de 1.2 mJ ($\eta_0 \sim 0.09$) cu panta eficienței $\eta_s=0.12$. Din nou, pentru structura DWG-4 a fost măsurată o valoare mai mică a energiei $E_p=$ 0.82 mJ ($\eta_0 \sim 0.06$) iar panta eficienței a scăzut până la $\eta_s=0.10$.

Pe lângă structurile tip ghid de undă realizate în mediile cristaline și policristaline (de tip ceramic) de Nd: YAG au fost realizate structuri tip ghid de undă în mediul uniaxial Nd: YVO₄ folosind pulsuri laser în fs. În acest caz, pompajul a fost realizat cu diodă laser la două lungimi de undă, 808 și 880 nm, pentru a îmbunătăți performanțele laser obținute de la aceste structuri. În cazul în care pompajul este realizat la λ_p =808 nm, puterea maximă emisă de ghidul DWG-YV-1

este 3.4 W, eficiența optică a fost η_{oa} = 0.33 și panta eficienței η_{sa} = 0.36. Totuși aceste performanțe pot fi îmbunătățite dacă se realizează pompajul direct pe nivelul laser superior la λ_p = 880 nm: ghidul a generat emisie laser cu putere P_{out}= 4.4 W pentru P_{abs}= 9.8 W, eficiența optică a fost η_{oa} ~0.45 iar panta eficienței η_{sa} = 0.47. Eficiența de absorbție a fost η_a = 0.86 pentru pompajul la lungimea de undă λ_p = 808 nm iar pentru λ_p = 880 nm a fost 0.59.

Unul dintre obiectivele în ceea ce privește generarea emisiei laser de la structurile tip ghid de undă realizate a fost acela de a obține putere laser la ieșire de ordinul kW. Acest lucru a fost posibil datorită faptului că au fost realizate ghiduri în materiale compozite de tip Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG (prima demonstrație de acest gen). Astfel, a fost generată emisie laser în pulsuri prin metoda Q-switch: puterea măsurată a fost $P_{ave}=1.27$ W, rata de repetiție a fost $f_p=138.8$ kHz și energia pulsurilor laser $E_p=9.15$ µJ. Prin urmare, puterea de vârf a fost determinată ca fiind $P_p=1.99$ kW.

ANEXA 1. Lista de lucrări a autoarei

Lucrări publicate în reviste cotate ISI relevante pentru teză

13. <u>G. Croitoru (Salamu)</u>, F. Jipa, and N. Pavel, "Passive Q-switch laser operation of circular, buried depressed-cladding waveguides realized by direct fs-laser beam writing in Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG composite media," Opt. Mat. Express 7(7), 2496-2504 (2017).

12. O. V. Grigore, <u>G. Croitoru</u>, T. Dascalu, N. Pavel, "Diode-laser edge-pumped Nd:YAG/YAG lenss haped composite laser," Opt. & Laser Techn. 94, 86-89 (2017).

11. <u>G. Salamu</u> and N. Pavel, "Power scaling from buried depressed-cladding waveguides realized in Nd:YVO₄ by femtosecond-laser beam writing," Opt. & Laser Techn. 84, 149-154 (2016).

10. <u>G. Salamu</u>, F. Jipa, M. Zamfirescu, and N. Pavel, "Watt-Level Output Power Operation from Diode-Laser Pumped Circular Buried Depressed-Cladding Waveguides Inscribed in Nd:YAG by Direct Femtosecond-Laser Writing," IEEE Photonics Journal 8(1), art. 1500209 (2016).

9. T. Dascalu, <u>G. Salamu</u>, O. Sandu, M. Dinca, and N. Pavel, "Scaling and passively Q-switch operation of a Nd:YAG laser pumped laterally through a YAG prism," Opt. & Laser Techn. 67, 164-168 (2015).

8. N. Pavel, <u>G. Salamu</u>, F. Jipa, and M. Zamfirescu, "Diode-laser pumping into the emitting level for efficient lasing of depressed cladding waveguides realized in Nd:YVO₄ by the direct femtosecond laser writing technique," Opt. Express 22 (19), 23057-23065 (2014).

7. N. Pavel, <u>G. Salamu</u>, F. Voicu, F. Jipa, and M. Zamfirescu, "Cladding waveguides realized in Nd:YAG laser media by direct writing with a femtosecond-laser beam," Proceedings of the Romanian Academy Series A - Mathematics Physics Technical Sciences Information Science 15 (2), 151-158 (2014).

6. <u>G. Salamu</u>, F. Jipa, M. Zamfirescu, and N. Pavel, "Cladding waveguides realized in Nd:YAG ceramic by direct femtosecond-laser writing with a helical movement technique," Opt. Mater. Express 4 (4), 790-797 (2014).

5. <u>G. Salamu</u>, F. Jipa, M. Zamfirescu, and N. Pavel, "Laser emission from diode-pumped Nd:YAG ceramic waveguide lasers realized by direct femtosecond-laser writing technique," Opt. Express 22 (5), 5177-5182 (2014).

4. <u>G. Salamu</u>, F. Voicu, N. Pavel, T. Dascalu, F. Jipa, and M. Zamfirescu, "Laser emission in diode-pumped Nd:YAG single-crystal waveguides realized by direct femtosecond-laser writing technique," Rom. Reports in Physics 65 (3), 943-953 (2013).

3. N. Pavel, <u>G. Salamu</u>, F. Voicu, F. Jipa, M. Zamfirescu, and T. Dascalu, "Efficient laser emission in diode-pumped Nd:YAG buried waveguides realized by direct femtosecond-laser writing," Laser Physics Letters 10 (9), 095802 (2013).

2. T. Dascalu, <u>G. Salamu</u>, O. Sandu, F. Voicu, and N. Pavel, "Novel laterally pumped by prism laser configuration for compact solid-state lasers," Laser Physics Letters 10 (5), 05580 (2013).

1. <u>G. Salamu</u>, A. Ionescu, C. A. Brandus, O. Sandu, N. Pavel, and T. Dascalu, "High-Peak Power, Passively Q-switched, Composite, All-Poly-Crystalline Ceramics Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG Laser and Generation of 532-nm Green Light," Laser Physics 22 (1), 68-73 (2012).

Lucrări prezentate la conferințe internaționale și publicate în proceedings

3. A. Birtas, N. Boicea, F. Draghici, R. Chiriac, <u>G. Croitoru</u>, M. Dinca, T. Dascalu and N. Pavel, "On the assessment of performance and emissions characteristics of a SI engine provided with a laser ignition system," IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 252, art. 012071 (2017); doi:10.1088/1757-899X/252/1/012071

2. <u>G. Salamu</u>, F. Voicu, F. Jipa, M. Zamfirescu, T. Dascalu, and N. Pavel, "Laser emission from diode-pumped Nd:YAG cladding waveguides obtained by direct writing with a femtosecond-laser beam," Proc. SPIE 9135, Laser Sources and Applications II, 91351F (May 1, 2014); doi:10.1117/12.2052250; http://dx.doi.org/10.1117/12.2052250

1. <u>G. Salamu</u>, A. Ionescu, C. Brandus, O. Grigore, N. Pavel and T. Dascalu, "Generation of highpeak power 532-nm green pulses from composite, all-ceramics, passively Q-switched Nd:YAG/Cr4+:YAG laser," Proc. SPIE 8882, ROMOPTO 2012: Tenth Conference on Optics: Micro- to Nanophotonics III, 888206 (June 10, 2013); doi:10.1117/12.2032267; http://dx.doi.org/10.1117/12.2032267

Lucrări prezentate la conferințe internationale

51. <u>G. Croitoru</u> and N. Pavel, "Passive Q-switch by Cr⁴⁺:YAG saturable absorber laser operation of circular, buried depressed-cladding waveguides inscribed by fs-laser beam in Nd:YAG and Nd:YVO4," 8th EPS-QEOD EUROPHOTON CONFERENCE, Solid State, Fibre, and Waveguide Coherent Light Sources, 02-07 September, 2018, Barcelona, Spain, presentation 17.16 (poster presentation).

50. G. Dearden, N. Pavel, M. Bärwinkel, P. Heinz, D. Brüggemann, <u>G. Croitoru</u>, and O. V. Grigore, "Laser spark plug developments for engine ignition," The 6th Laser Ignition Conference, 23-27 April 2018, Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, presentation LIC3-1 (invited talk).

49. A. Birtas, N. Boicea, F. Draghici, R. Chiriac, <u>G. Croitoru</u>, M. Dinca, and N. Pavel, "On the performances of a 4-cylinder automobile engine with classical spark plug and laser ignition systems," The 6th Laser Ignition Conference, 23-27 April 2018, Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, presentation LIC3-5 (oral presentation).

48. N. Pavel, O. V. Grigore, <u>G. Croitoru</u>, and M. Dinca, "A high-peak power passively Q-switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG compact laser with multiple-beam output," The 6th Laser Ignition Conference, 23-27 April 2018, Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, presentation LICp6-1 (poster presentation).

47. L. Gheorghe, F. Voicu, M. Greculeasa, A. Achim, F. Khaled, P. Loiseau, G. Aka, S. Hau, C. Gheorghe, <u>G. Croitoru</u>, "Pure and Yb-doped LaxGdySc₄-x-y(BO₃)₄ incongruent borates type crystal: Czochralski growth, NLO properties and laser performances," TIM 17 Physics Conference, 25 - 27 May 2017, Timisoara, Romania; invited talk CM-I01.

46. A. Birtas, N. Boicea, F. Draghici, R. Chiriac, <u>G. Croitoru</u>, M. Dinca, T. Dascalu and N. Pavel, "On the assessment of performance and emissions characteristics of a SI engine provided with a laser ignition system," CAR 2017, The 11th Edition of The International Congress of Automotive and Transport Engineering, November 8-11 2017, University of Pitesti, Pitesti, Romania; presentation CAR 2017_090.

45. N. Pavel, A. Birtas, M. Dinca, <u>G. Croitoru</u>, T. Dascalu, and N. Boicea, "Ignition by Laser Sparks of a Gasoline Automobile Engine," IONS Balvanyos 2017, International OSA Network of Student, 25-28 July 2017, Balvanyos, Romania (invited talk).

44. I. O. Vorona, R. P. Yavetskiy, A. Doroshenko, S. Parkhomenko, A. Tolmachev, L. Gheorghe, M. Greculeasa, C. Gheorghe, S. Hau, C. A. Brandus, and <u>G. Croitoru</u>, "Nd³⁺:YAG Ceramic Materials with Efficient Laser Emission under Diode-Laser Pumping," The 5th Laser Ignition Conference, 20-23 June 2017, Bucharest, Romania; OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2017), paper LWA5.4 (poster presentation); ISBN: 978-1-943580-32-3 (https://doi.org/10.1364/LIC.2017.LWA5.4).

43. A. Birtas, N. Boicea, <u>G. Croitoru</u>, M. Dinca, T. Dascalu, N. Pavel, "Combustion Characteristics of a Gasoline-Air Mixture Laser Ignition," The 5th Laser Ignition Conference, 20-23 June 2017, Bucharest, Romania; OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2017), paper LFA3.4 (oral presentation).; ISBN: 978-1-943580-32-3 (https://doi.org/10.1364/LIC.2017.LFA3.4).

42. N. Pavel, A. Birtas, <u>G. Croitoru</u>, M. Dinca, N. Boicea, T. Dascalu, "Laser Ignition of a Gasoline Engine Automobile," The 5th Laser Ignition Conference, 20-23 June 2017, Bucharest, Romania; OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2017), paper LWA4.3 (oral presentation); ISBN: 978-1-943580-32-3 (<u>https://doi.org/10.1364/LIC.2017.LWA4.3</u>).

41. <u>G. Croitoru</u>, O. V. Grigore, M. Dinca, N. Pavel, M. Bärwinkel, P. Heinz, D. Brüggemann, "Aspects of Air-Breakdown with a High-Peak Power Passively Q-Switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG Laser," The 5th Laser Ignition Conference, 20-23 June 2017, Bucharest, Romania; OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2017), paper LWA5.9 (poster); ISBN: 978-1-943580-32-3 (https://doi.org/10.1364/LIC.2017.LWA5.9).

40. T. Dascalu, <u>G. Croitoru</u>, O. V. Grigore, and N. Pavel, "Multiple-Beam Output High-Peak Power Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG Laser for Laser Ignition," International Conference on Space Optics, ICSO 2016, 18-21 Oct. 2016, Biarritz, France (presentation 254, poster presentation).

39. <u>G. Croitoru</u>, T. Dascalu, F. Jipa, M. Zamfirescu, N. Pavel, "High-power operation in circular buried depressed-cladding waveguides inscribed in Nd:YAG and Nd:YVO₄ by femtosecond-laser beam," 7th EPS-QEOD EUROPHOTON CONFERENCE, Solid State, Fibre, and Waveguide Coherent Light Sources, 21-26 August, 2016, Vienna, Austria; presentation FWG-4.4 (oral presentation).

38. O. V. Grigore, <u>G. Croitoru</u>, T. Dascalu, M. Dinca, N. Pavel, "Edge-pumped Nd:YAG/YAG lens shaped composite laser," 7th EPS-QEOD EUROPHOTON CONFERENCE, Solid State, Fibre, and Waveguide Coherent Light Sources, 21-26 August, 2016, Vienna; Austria, PO-2.1 (poster presentation).

37. <u>G. Croitoru (Salamu)</u>, N. Pavel, T. Dascalu, F. Jipa, M. Zamfirescu, "Power-scaling from burried depressed-cladding waveguides realized in Nd:YAG and Nd:YVO₄ by direct writing with a femtosecond-laser beam," The 16th International Balkan Workshop on Applied Physics, 7-9 July, 2016, Constanta, Romania; Book of Abstracts, pp. 77-78 (S2 L3, invited presentation).

36. A. Birtas, <u>G. Croitoru (Salamu)</u>, M. Dinca, T. Dascalu, N. Boicea, and N. Pavel, "The effect of laser ignition on a homogenous lean mixture of an automotive gasoline engine," The 4th Laser Ignition Conference, 17-20 May 2016, Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, presentation LIC6- 2 (oral presentation). (page 78 of <u>http://opicon.jp/wp-content/uploads/2016/05/OPIC2016FinalProgram.pdf</u>)

35. <u>G. Croitoru (Salamu)</u>, O. V. Grigore, T. Dascalu, and N. Pavel, "Passively Q-switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG laser with multiple-beam output," The 4th Laser Ignition Conference, 17-20 May 2016, Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, presentation LICp-1(poster presentation). (pg 101 <u>http://opicon.jp/wpcontent/uploads/2016/05/OPIC2016FinalProgram.pdf</u>)

34. P. Loiseau, F. Khaled, G. Aka, L. Gheorghe, F. Voicu, <u>G. Salamu</u>, A. Achim, and N. Pavel, "Nonlinear optical borates suitable for crystal growth by Czochralski method frequency doubling and self-frequency doubling in the visible range," 7th International Symposium on Optical Materials, 29 Feb. - 04 March 2016, Lyon, France; invited talk I-7.

33. J. Nikkinen, A. Härkönen, I. Leino, V.-M. Korpijärvi, <u>G. Salamu</u>, and M. Guina, "Q-switched microchip MOPA generating 100 ps pulses at 532 nm," SPIE Photonics West 2016, Solid State Lasers XXV: Technology and Devices, Conference 9726, Paper 9726-75, 13-18 February 2016, San Francisco, USA; (poster presentation).

32. N. Pavel, T. Dascalu, M. Dinca, <u>G. Salamu</u>, N. Boicea, A. Birtas, "Laser Ignition of an Automobile Engine by a High-Peak Power Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG Laser," Advanced Solid State Lasers Conference and Exhibition (ASSL), 04 - 09 October 2015, WISTA-Technology Park, Adlershof Berlin, Germany; presentation ATh2A.2 (poster presentation).

31. N. Pavel, <u>G. Salamu</u>, F. Voicu, O. Grigore, T. Dascalu, F. Jipa, and M. Zamfirescu, "Depressedcladding waveguides inscribed in Nd:YAG and Nd:YVO₄ by femtosecond-laser writing technique. Realization and laser emission," ROMOPTO 2015, 11th International Conference on Optics "Micro- to Nano-Photonics IV", September 1-4, 2015, Bucharest, Romania; presentation I.I.7 (invited presentation).

30. <u>G. Salamu</u>, O. Grigore, T. Dascalu, and N. Pavel, "High energy, high-peak power passively Qswitched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG composite ceramic laser," ROMOPTO 2015, 11th International Conference on Optics "Micro- to Nano-Photonics IV", September 1-4, 2015, Bucharest, Romania; presentation I.P.1 (poster presentation).

29. N. Pavel, <u>G. Salamu</u>, O. V. Grigore, M. Dinca, T. Dascalu, N. Boicea, and A. Birtas, "High-Peak Power Passively Q-switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG Lasers for Successful Ignition of an

Automobile Engine," The 15th International Balkan Workshop on Applied Physics, July 2-4, 2015, Constanta, Romania, presentation S2-L3, Book of Abstracts, pgs. 80-81 (invited presentation).

28. N. Pavel, T. Dascalu, M. Dinca, <u>G. Salamu</u>, N. Boicea, and A. Birtas, "Automobile Engine Ignition by a Passively Q-switched Nd:YAG/Cr4+:YAG Laser," CLEO Europe - EQEC 2015 Conference, 21-25 June 2015, Münich, Germany, presentation CA-5b.2 (oral presentation).

27. T. Dascalu, A. Ionescu, <u>G. Salamu</u>, O. Grigore, M. Dinca, F. Voicu, C. Brandus, and N. Pavel, "Novel Thin Disk Lens Shaped Composite Nd:YAG/YAG Ceramic Laser," CLEO Europe - EQEC 2015 Conference, 21-25 June 2015, Münich, Germany, presentation CA-10.4 (oral presentation).

26. <u>G. Salamu</u>, N. Pavel, T. Dascalu, F. Jipa, and M. Zamfirescu, "Diode-Pumped Laser Emission from Depressed Cladding Waveguides Inscribed in Nd-doped Media by Femtosecond Laser Writing Technique," CLEO Europe - EQEC 2015 Conference, 21-25 June 2015, Münich, Germany, presentation CA-5b.2 (oral presentation).

25. N. Pavel, <u>G. Salamu</u>, F. Jipa, and M. Zamfirescu, "Efficient Laser Emission under 880-nm Diode Laser Pumping of Cladding Waveguides Inscribed in Nd:YVO₄ by Femtosecond-Laser Writing Technique," Advanced Solid State Lasers (ASSL) Congress, 16-21 November 2014, Shanghai, China, presentation ATu2A.26 (poster presentation).

24. <u>G. Salamu</u>, F. Voicu, A. Achim, L. Gheorghe, N. Pavel and T. Dascalu, "Efficient laser emission from a disordered Yb:CLNGG crystal," 5th International Student Conference on Photonics, Orastie, Romania, 23-26 September 2014; presentation P.07 (poster presentation). Note: <u>This work received the "Best Poster Award - Third Place" diploma award at the conference.</u>

23. <u>G. Salamu</u>, F. Jipa, M. Zamfirescu, F. Voicu, and N. Pavel, "Laser emission from diodepumped Nd:YAG waveguide lasers realized by femtosecond-writing technique," 5th International Student Conference on Photonics, Orastie, Romania, 23-26 September 2014; presentation O.02 (oral presentation). Note: <u>This work was awarded with the "Best Oral</u> <u>Presentation - Second Place" diploma at the conference</u>.

22. N. Pavel, <u>G. Salamu</u>, F. Jipa, M. Zamfirescu, F. Voicu, and T. Dascalu, "Efficient laser emission in diode-pumped Nd:YAG cladding waveguides fabricated by direct writing with a helical movement technique," 6th EPS-QEOD EUROPHOTON CONFERENCE, Solid State, Fibre, and Waveguide Coherent Light Sources, 24-29 August, 2014, Neuchâtel, Switzerland, presentation TuP-T2-P-02 (poster presentation); Europhysics Conference Abstract Vol. 38 E; ISBN 2-914771-89-4.

21. N. Pavel, <u>G. Salamu</u>, F. Voicu, T. Dascalu, F. Jipa, and M. Zamfirescu, "Waveguides Fabricated in Nd:YAG by Direct fs-Laser Writing - Realization and Laser Emission under Diode-Laser Pumping," The 14th International Balkan Workshop on Applied Physics, July 2-4, 2014, Constanta, Romania, presentation S2-L07, Book of Abstracts p. 106 (invited presentation). 20. N. Pavel, <u>G. Salamu</u>, and T. Dascalu, "Passively Q-switched, composite Nd:YAG/Cr4+:YAG laser pumped laterally through a prism," The 2nd Laser Ignition Conference, 22 - 25 April 2014, Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, presentation LIC5-2 (oral presentation).

19. <u>G. Salamu</u>, F. Jipa, M. Zamfirescu, and N. Pavel, "Laser Emission from Nd:YAG Laser Waveguides Realized by Femtosecond-Laser Writing Techniques," 2014 Photonics Europe SPIE Conference, 14-17 April 2014, Brussels, Belgium; paper number: 9135-52.

18. N. Pavel, <u>G. Salamu</u>, F. Jipa, and M. Zamfirescu, "Laser emission from diode-pumped Nd:YAG waveguides, realized by direct femtosecond-laser writing technique," Advanced Solid State Lasers (ASSL) Congress, 27 October - 1 November 2013, Paris, France, presentation ATu2A.6 (oral presentation).

17. N. Pavel, <u>G. Salamu</u>, F. Voicu, F. Jipa, and M. Zamfirescu, "Femtosecond-laser inscribed Nd:YAG waveguides. Realization and laser emission," LPHYS'13: 22nd International Laser Physics Workshop, Prague, 15-19 July, 2013, presentation 4.1.3 (oral presentation).

16. N. Pavel, <u>G. Salamu</u>, and O. Grigore, "Passively Q-switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG lasers with high peak power," LPHYS'13: 22nd International Laser Physics Workshop, Prague, 15-19 July, 2013, presentation 4.1.2 (oral presentation).

15. N. Pavel, <u>G. Salamu</u>, and T. Dascalu, "Passively Q-switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG lasers for ignition of an automobile engine," The 13th International Balkan Workshop on Applied Physics, 4-6 July 2013, Constanta, Romania, presentation S5-L01, Book of Abstracts p. 116 (invited presentation).

14. <u>G. Salamu</u>, F. Voicu, N. Pavel, T. Dascalu, F. Jipa, and M. Zamfirescu, "Diode-pumped laser emission in femtosecond-laser inscribed Nd:YAG waveguides," International Conference "Modern Laser Applications" Third Edition, INDLAS 2013, 20-24 May 2013, Bran, Romania, presentation O1 (oral presentation).

13. T. Dascalu, <u>G. Salamu</u>, N. Pavel, O. Grigore, and F. Voicu, "Compact 'prism-by sidepumped' solid-state laser," CLEO Europe - EQEC 2013 Conference, 12-16 May 2013, Münich, Germany, presentation CA-9.5 (oral presentation).

12. N. Pavel, T. Dascalu, <u>G. Salamu</u>, and O. Grigore, "Novel geometry for compact, diodepumped solid-state lasers," Laser Ignition Conference '13, 23-25 April 2013, Yokohama, Japan, presentation LIC4-2 (oral presentation).

11. <u>G. Salamu</u>, A. Ionescu, C. Brandus, O. Sandu, N. Pavel, and T. Dascalu, "Generation of highpeak power 532-nm green pulses from passively Q-switched, all-poly-crystalline Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG ceramics laser," Micro- to Nano-Photonics III, ROMOPTO 2012, 10th International Conference on Optics, 3-6 September, Bucharest, Romania, presentation I.P. 5; Poster presentation. Note: This work was awarded with the Certificate of Excellence for First Place Student Presentation (Best Poster SPIE Award) at the ROMOPTO 2012 conference.

10. <u>G. Salamu</u>, F. Voicu, F. Jipa, M. Zamfirescu, and N. Pavel, "Direct femtosecond laser written waveguides in Nd:YAG," Micro- to Nano-Photonics III, ROMOPTO 2012, 10th International Conference on Optics, 3-6 September, Bucharest, Romania, presentation II.P. 1; Poster presentation.

9. N. Pavel, <u>G. Salamu</u>, O. Sandu, A. Ionescu, C. Brandus, F. Voicu, and T. Dascalu, "Efficient, simultaneous dual-wavelength emission at 1.06 and 1.34 μm in Nd:GdVO4 laser crystal," 5th EPS-QEOD EUROPHOTON CONFERENCE, Solid State, Fibre, and Waveguide Coherent Light Sources, Stockholm, Sweden, presentation TuP.11; Poster presentation.

8. <u>G. Salamu</u>, O. Sandu, M. Dejanu, F. Voicu, C. Ticos, D. Popa, S. Parlac, N. Pavel, and T. Dascalu, "Study of combustion process for a methane-air mixture using a microlaser system," International Student Conference on Photonics 2012, SPIE Student Chapter, 8-11 May 2012, Sinaia, Romania; Book of abstracts, ISSN 2284-9750, p. 17; Oral presentation.

7. <u>G. Salamu</u>, O. Sandu, M. Dejanu, F. Voicu, C. Ticos, D. Popa, S. Parlac, N. Pavel, and T. Dascalu, "Investigation of laser ignition for methane-air mixture and development of a microlaser system," Physics Conference TIM-11, 24-27 November 2011, Timisoara, Romania; Abstract Book, ISBN 978-973-125-354-1, presentation API-O06 (pg. 125).

6. <u>G. Salamu</u>, O. Sandu, N. Pavel, T. Dascalu, D. Chuchumishev, A. Gaydardzhiev, and I Buchvarov, "Passively Q-switched, Composite, All-Poly-Crystalline Ceramics Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG Laser," 19th International Conference on Advanced Laser Technologies, 03 - 08 September 2011, Golden Sands, Bulgaria; in Book of Abstract, presentation O-6-LN, page 92.

5. D. Chuchumishev, I. Buchvarov, A. Gaydardzhiev, A. Trifonov, O. Sandu, and <u>G. Salamu</u>, "Subnanosecond, tunable between 3 μ m and 3.5 μ m OPO based on PPSLT, pumped by 0.5 kHz Nd:YAG laser," International Student Workshop on Laser Applications ISWLA 2011, 31 May 31 - 04 June, 2011, Bran, Romania.

4. <u>G. Salamu</u>, O. Sandu, M. Dejanu, F. Voicu, C. Ticos, D. Popa, S. Parlac, N. Pavel, and T. Dascalu, "Study of laser ignition and flame kernel development in methane-air mixture," International Student Workshop on Laser Applications, 2nd ISWLA 2011, May 31- June 04, 2011, Bran, Romania.

3. <u>G. Salamu</u>, F. Voicu, A. Leca, O. Sandu, N. Pavel, T. Dascalu, M. Dejanu, D. Popa, and S. Parlac, "Characteristics of methane-air combustion measured by Schlieren method," International Student Workshop on Laser Applications ISWLA 2010, May 25-28, 2010, Bran, Romania, presentation P24.

2. T. Dascalu, N. Pavel, N. Vasile, A. Leca, <u>G. Salamu</u>, and O. Sandu, "Passively Q-switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG Laser Operated at High Temperature," Micro- to Nano-Photonics II - ROMOPTO 2009 Conference, August 31 - Sept. 03, 2009, Sibiu, Romania, presentation I.O.3.

1. N. Pavel, <u>G. Salamu</u>, O. Sandu, and T. Dascalu, "Passively Q-switched Cr⁴⁺:YAG/Nd-Lasers Pumped Directly into the Emitting Level," 10th International Balkan Workshop on Applied Physics (IBWAP), July 6-8, 2009, Constanta, Romania, presentation S5-P60; Book of Abstracts, ISBN 978-973-614-507-0, pp. 199-200 (2009).

Patente

3. A. Birtas, N. Boicea, T. Dascalu, N. Pavel, <u>G. Salamu</u>, O.-V. Grigore, "Bujie cu laser pentru un motor cu ardere," OSIM application number A/10028/2016/ 18.05.2016, Romania; "A laser

spark plug for a combustion engine," INPI - Institut National de la Propriété Industrielle, Numéro de soumission: 000347665 / 18.05.2016, France.

2. T. Dascalu, N. Pavel, <u>G. Salamu</u>, O. Grigore, F. Voicu, M. Dinca, "Sistem laser monolitic, compozit si compact cu livrare simultana a două fascicule laser / Compact, composite, monolithic laser system with simultaneous emission of two laser beams," Romanian patent, No. RO129307- A0, Publication date 28.03.2014; OSIM application number A-100417 / 03.05.2013. International Patent Classification: A61M-005/31; B65B-003/04.

1. T. Dascalu, O. Sandu, F. Voicu, N. Pavel, <u>G. Salamu</u>, M. Dinca, "Sistem Laser pentru Ignitia Motoarelor cu Ardere Interna / Laser System for Igniting the Internal Combustion Engines," Romanian patent, No. RO126373-A0 / 30 Jun. 2011, published in BOPI 6 2011. Application number: RO126373-A0 / 13 Dec. 2010; International Patent Classification: A61M-005/31; B65B003/04

Bibliografie

Capitolul 1

[1.1]. M. E. Innocenzi, H. T. Yura, C. L. Fincher, and R. A. Fields, "Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers" App. Phys. Lett. 56, 1831 (1990).

[1.2]. T. Dascalu, "Edge- pump high power microchip Yb:YAG laser", Rom. Reports in Physics 60 (4), 977- 994 (2008).

[1.3]. T. H. Maiman, "Stimulated optical radiation in ruby", Nature 187, 194 (1960).

[1.4]. C. Dascalu, T. Dascalu, "Fizica laserelor" Editura Printech Bucuresti ISBN 978-973-718-599-0 (2006).

[1.5]. W. W. Rigrod, "Saturation Effects in High- Gain Lasers" J. Appl. Phys. 36, 2487 (1965).

[1.6]. L. W. Casperson, "Laser power calculations: sources of error" Appl. Optics 19 (3), 422-434 (1980).

[1.7]. A. M. Malyarevich, I. A. Denisov, K. V. Yumashev, V. P. Mikhailov, R. S. Conroy, B. D. Sinclair, "V: YAG – a new passive Q-switch for diode-pumped solid-state lasers" Appl. Phys. B, 67 (5), 555-558 (1998).

[1.8]. E. Sorokin, N. Tolstik, K. I. Schaffers, and I. T. Sorokina, "Femtosecond SESAM-modelocked Cr: ZnS laser," Opt. Express 20(27), 28947–28952 (2012).

[1.9]. Z. Burshtein, P. Blau, Y. Kalisky, Y. Shimony, M. R. Kokta "Excited- state absorption studies of Cr^{4+} ions in several garnet host crystals" IEEE J. Quantum. Electron. QE- 34, 292 (1998).

Capitolul 2

[2.1]. S. Konno, S. Fujikawa, K. Yasui, "80 W cw TEM_{00} 1064 nm beam generation by use of a laser-diode-side-pumped Nd: YAG rod laser" Appl. Phys. Lett. 70 (20) 2650 (1997).

[2.2]. J. J. Zayhowski, "Q-switched operation of microchip lasers" Opt. Lett. 16 (8), 575 (1991).

[2.3]. J.-F. Bisson, J. Lu, K. Takaichi, Y. Feng, M. Tokuragawa, A. Shirakawa, A.A. Kaminskii,H. Yagi, Y. Yanagitani, K. Ueda, Nanotechnology is stirring up solid-state laser fabrication technology, Recent Res. Devel. Applied Phys., vol.7, 475-496, 2004.

[2.4]. A. Ikesue, T. Kinoshita, K. Yashida, "Fabrication and Optical Properties of High-Performance Polycristalline Nd: YAG Ceramics for Solid- State Lasers" J. Am. Ceram. Soc., 78 (4), 1033-1040 (1995).

[2.5]. T. Yanagitani, H. Yagi, Japanese Patent 10-101411, 1998.

[2.6]. A. Ikesue, Y. L. Aung, "Ceramic laser materials" Nature Photonics 2, 721 (2008).

[2.7]. H. Yagi, T. Yanagitani, H. Yoshida, M. Nakatsuka, K. Ueda, "The optical properties and laser characteristics of Cr^{3+} and Nd^{3+} co- doped $Y_3Al_5O_{12}$ ceramics" Opt. and Las. Techn. 39, 1295 (2007).

[2.8]. L. J. Rosenkrantz, "GaAs diode- pumped Nd: YAG laser" J. Appl. Phys. 43, 4603 4605 (1972).

[2.9]. D. L. Sipes, Highly efficient neodymium: yttrium aluminum garnet laser end pumped by a semiconductor laser array" Appl. Phys. Lett. 47, 74-76 (1985).

[2.10]. R. A. Fields, R. Birnbaum, C. L. Fincher, "Highly efficient Nd: YVO₄ diode- laser end-pumped laser" Appl. Phys. Lett. 51, 1885-1886 (1987).

[2.11]. D. Kracht, R. Wilhelm, M. Frede, K. Dupre, L. Ackermann, "407 W end- pumped multi-segmented Nd: YAG laser" Opt. Express 13, 10140- 10144 (2005).

[2.12]. R. Wilhelm, M. Frede, D. Kracht, "Power scaling of end- pumped solid- state rod lasers by longitudinal dopant concentration gradients" IEEE J. Quantum Electron. 44, 232- 244 (2008).

[2.17]. R. Lavi, S. Jackel, A. Tal, E. Lebiush, Y. Tzuk, S. Goldring, "885 nm high- power diodes end- pumped Nd: YAG laser" Opt. Commun. 195, 427-430 (2001).

[2.18]. M. Frede, R. Wilhelm, D. Kracht, "250 W end- pumped Nd: YAG laser with direct pumping into the upper laser level" Opt. Lett. 31, 3618-3619 (2006).

[2.19]. Y. H. Peng, Y. X Lim, J. Cheng, Y. Guo, Y. Y. Cheah, K. S. Lai, "Near fundamental mode 1.1 kW Yb: YAG thin- disk laser" Opt. Lett 38, 1709-1711 (2013).

[2.20]. F. Chen, J. R. Vasquez de Aldana, "Three- dimensional femtosecond laser micromachining of dielectric crystals for photonic waveguiding applications" Proc. Of SPIE Vol. 9532 9532M-1 (2015).

[2.21]. J. Thomas, M. Heinrich, P. Zeil, V. Hilbert, K. Rademaker, R. Riedel, S. Ringleb, C. Dubs, J. P. Ruske, S. Nolte, A. Tunnermann, "Laser direct writing: Enabling monolithic and hybrid integrated solutions on the lithium niobate platform" Phys. Stat. Sol. A 208 (2), 276-283 (2011).

[2.22]. S. Gross, M. Dubov, M. J. Withford, "On the use of Type I and II scheme for classifying ultrafast laser direct- write photonics" Opt. Express 23 (6), 7767-7770 (2015).

[2.23]. G. A. Torchia, A. Rodenas, A. Benayas, E. Cantelar, L. Roso, and D. Jaque, "Highly efficient laser action in femtosecond-written Nd:yttrium aluminum garnet ceramic waveguides," Appl. Phys. Lett. 92 (11), 111103 (2008).

[2.24]. F. M. Bain, A. A. Lagatsky, R. R. Thomson, N. D. Psaila, N. V. Kuleshov, A. K. Kar, W. Sibbett, and C. T. A. Brown, "Ultrafast laser inscribed Yb:KGd(WO₄)₂ and Yb:KY(WO₄)₂ channel waveguide lasers," Opt. Express 17 (25), 22417–22422 (2009).

[2.25]. J. Siebenmorgen, T. Calmano, K. Petermann, and G. Huber, "Highly efficient Yb:YAG channel waveguide laser written with a femtosecond-laser," Opt. Express 18 (15), 16035–16041 (2010).

[2.26]. T. Calmano, J. Siebenmorgen, A.-G. Paschke, C. Fiebig, K. Paschke, G. Erbert, K. Petermann, and G. Huber, "Diode pumped high power operation of a femtosecond laser inscribed Yb:YAG waveguide laser," Opt. Mater. Express 1 (3), 428–433 (2011).

[2.27]. Y. Tan, F. Chen, J. R. Vázquez de Aldana, G. A. Torchia, A. Benayas, and D. Jaque, "Continuous wave laser generation at 1064 nm in femtosecond laser inscribed Nd:YVO4 channel waveguides," Appl. Phys. Lett. 97 (3), 031119 (2010). [2.28]. Y. Tan, A. Rodenas, F. Chen, R. R. Thomson, A. K. Kar, D. Jaque, and Q. M. Lu, "70% slope efficiency from an ultrafast laser-written Nd:GdVO4 channel waveguide laser," Opt. Express 18 (24), 24994–24999 (2010).

[2.29]. A. Okhrimchuk, V. Mezentsev, A. Shestakov, and I. Bennion, "Low loss depressed cladding waveguide inscribed in YAG:Nd single crystal by femtosecond laser pulses," Opt. Express 20 (4), 3832–3843 (2012).

[2.30]. H. Liu, Y. Jia, J. R. Vázquez de Aldana, D. Jaque, and F. Chen, "Femtosecond laser inscribed cladding waveguides in Nd: YAG ceramics: Fabrication, fluorescence imaging and laser performance," Opt. Express 20 (17), 18620–18629 (2012).

[2.31]. Y. Ren, G. Brown, A. Ródenas, S. Beecher, F. Chen, and A. K. Kar, "Mid-infrared waveguide lasers in rare earth- doped YAG," Opt. Lett. 37 (16), 3339–3341 (2012).

[2.32]. Q. An, Y. Ren, Y. Jia, J. R. V. de Aldana, and F. Chen, "Mid-infrared waveguides in zinc sulfide crystal," Opt. Mater. Express 3 (4), 466–471 (2013).

[2.33]. H. Liu, F. Chen, J. R. Vázquez de Aldana, and D. Jaque, "Femtosecond-laser inscribed double-cladding waveguides in Nd:YAG crystal: a promising prototype for integrated lasers," Opt. Lett. 38 (17), 3294–3297 (2013).

Capitolul 3

[3.1]. D. Wright, P. Greve, J. Fleischer, L. Austin. "Laser beam width, divergence and beam propagation factor: An international standardization approach" Opt. and Quantum Electron. 24 (9), 993 (1992).

[3.2]. N. Pavel, J. Saikawa, S. Kurimura, T. Taira, "High Average Power Diode End- Pumped Composite Nd: YAG Laser Passively Q- switched by Cr⁴⁺: YAG Saturable Absorber" Jpn. J. Appl. Phys. 40, 1253 (2001).

[3.3]. S. T. Li, X. Y. Zhang, Q. P. Wang, P. Li, J. Chang, X. L. Zhang, Z. H. Cong, "Modeling of Q-switched lasers with top- hat pump beam distribution" Appl. Phys. B 88 (2), 221 (2007).

[3.4]. N. Pavel, M. Tsunekane, T. Taira, "Composite, all- ceramics, high- peak power Nd: YAG/ Cr⁴⁺: YAG monolithic micro- laser with multiple- beam output for engine ignition" Opt. Expr. 19 (10), 9378 (2011).

[3.9]. A. Major, K. Sukhoy, H. Zhao, I. T. Lima, Jr., "Green sub-nanosecond microchip laser based on BiBO crystals" Laser Phys. 21 (1), 57 (2011).

[3.10]. R. Bhandari, T. Taira, "R. Bhandari and T. Taira, "6MW peak power at 532 nm by using linearly polarized passively Q-switched microchip laser," CLEO/Europe 2011, Munich, Germany, May 22-26, CA7.6 MON (2011).

[3.11]. T. Dascalu, G. Salamu, O. Sandu, F. Voicu, N. Pavel, "Novel laterally pumped by prism laser configuration for compact solid- state lasers" Laser Phys. Lett. 10, 055804-055809 (2013).

[3.12]. T. Dascalu, G. Salamu, O. Sandu, M. Dinca, N. Pavel, "Scaling and passively Q-switch operation of a Nd: YAG laser pumped laterally through a Yag prism" Opt. & Laser Techn. 67, 164-168 (2015).

[3.13]. T. Dascalu, O. Sandu, F. Voicu, N. Pavel, G. Salamu, M. Dinca, "Sistem Laser pentru Ignitia Motoarelor cu Ardere Interna / Laser System for Igniting the Internal Combustion Engines," Romanian patent, No. RO126373-A0 / 30 Jun. 2011, published in BOPI 6 2011. Application number: RO126373-A0 / 13 Dec. 2010; International Patent Classification: A61M-005/31; B65B-003/04.

[3.14]. M. A. Jaspan, D. Welford, J. A. Russell, "Passively Q-switched microlaser performance in the presence of pump- induced bleaching of the saturable absorber" Appl. Opt. 43, 2555-2560 (2004).

[3.15]. T. Dascalu, A. Ionescu, G. Salamu, O. Grigore, M. Dinca, F. Voicu, C. Brandus, N. Pavel, "Novel thin disk lens shaped composite Nd: YAG/ YAG ceramic laser" in Digest of CLEO Europe- EQEC 2015 Conference, 21- 25 June 2015, Munich, Germany, presentation CA-10.4.

[3.16]. O. Grigore, G. Croitoru, T. Dascalu, N. Pavel, "Diode- laser edge- pumped Nd: YAG/ YAG lens- shaped composite laser" Optics & Laser Techn. 94, 86- 89 (2017).