

RAPORT STIINTIFIC SINTETIC

Octombrie 2011 - Decembrie 2016

O aplicatie importanta a laserilor cu emisie in pulsuri avand durata de ordinul femtosecundelor (fs) o constituie realizarea, prin inscriptionare directa, de laseri miniaturali de tip 'ghid de unda'. Intr-o astfel de structura laser se poate obtine o suprapunere ridicata (aproape unitara) intre volumul pompat si modul laser, rezultand, in principiu, o configuratie laser de dimensiuni reduse, cu putere de operare la prag mica si eficiența optica ridicata. Mai mult, puterea de iesire (in regim de operare continuu) sau energia pulsului laser (pentru operarea in regim quasi-continuu) poate fi destul de ridicata (de ordinul watilor sau a zecilor de mJ).

Obiectivele principale ale acestui proiect au fost stabilite astfel:

- A. Realizarea de laseri de tip ghid de unda, prin inscriptionare (sau scriere) directa cu laser cu durata pulsului de ordinul fs;
- B. Obtinerea de emisie laser de la astfel de laseri de tip ghid de unda;
- C. Intelegerarea unor fenomene cu aspect fundamental, cum ar fi localizarea spatiala, natura si marimea schimbatorilor de natura structurala si a indicelui de refractie, sau modificarile unor proprietati spectroscopice ale mediilor in care se obtin astfel de laseri.

Prezentam, in continuare principalele rezultate obtinute in cadrul acestui proiect.

1. Laseri de Tip Ghid de Unda Obtinuti prin Inscriptiune cu Pulsuri cu Durata de Ordinul fs in Mediile Nd:YAG de Tip Cristalin ('single crystal'). Emisie Laser la 1.06 μ m and 1.3 μ m.

Pentru scrierea ghidurilor de unda am folosit montajul experimental in Fig. 1. Laserul de tip Ti:safir emite pulsuri cu durata de 200 fs, repetitie de 2 kHz si energie maxima pe puls de 600 μ J, la lungimea de unda de 775 nm; fasciculul laser a avut factorul $M^2 = 1.5$. Fasciculul a fost focalizat in cristalul laser in care se realizeaza ghidurile de unda cu ajutorul unui obiectiv optic, iar energia pulsurilor laser a fost modificata folosind un sistem optic format dintr-o lama de unda ($\lambda/2$), un polarizer (P) si un filtru neutru (N). Mediul activ a fost pozitionat pe un sistem Oxyz motorizat, cu miscare controlabila pe cele trei directii. Trei obiective optice, cu marirea 100x (NA= 0.5), 40x (NA= 0.65) si 20x (NA= 0.40) au fost utilizate; diametrul fasciculului laser (ϕ) si parametru confocal (b) dupa aceste obiective au fost ($\phi= 3 \mu$ m, b= 12 μ m), ($\phi= 2.1 \mu$ m, b= 18.3 μ m) si ($\phi= 7 \mu$ m, b= 65 μ m), respectiv. Viteza de scriere a fost de 50 μ m/s.

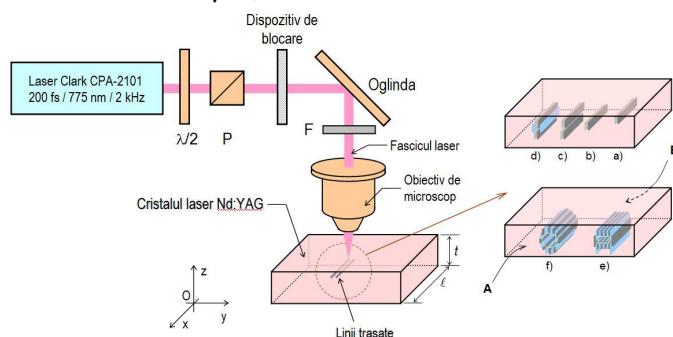


Fig. 1 Montaj experimental folosit pentru scrierea ghidurilor de unda in mediile laser Nd:YAG.
P: polarizor; $\lambda/2$ = lama 'jumata de unda', F: filtru neutru.

Ghidurile de unda au fost realizate in doua cristale Nd:YAG, primul cu 0.7-at.% Nd (grosime de 3 mm si lungime de 8 mm) iar al doilea cu 1.1-at.% (3 mm grosime, 5 mm lungime). Dupa scriere, mediile au fost slefuite pe suprafetele exterioare (A si B in Fig. 1) si observate cu ajutorul unui microscop. Astfel, au fost obtinute trase simple (paralele) situate la distanta de 40 μ m [Fig. 2(a), 2(b)], ghiduri alungite ca in Fig. 2(c) (schimbarea de indice de refractie s-a facut prin trasarea a cate doua perechi de linii suprapuse si a unei perechi de linii deplasate la 4 μ m, precum si de structuri complexe de tip dreptunghi [Fig. 2(d)], de tip cilindru cu sectiune circulara [Fig 2(e)] sau eliptica [Fig. 2(f)]. Aceste structuri au fost scrise la o adancime de ~300 μ m in Nd:YAG. Pentru fluenta laser utilizata in experimente (de ~11 mJ/cm²), liniile au avut o lungime (pe axa Oz) de ~47 μ m.

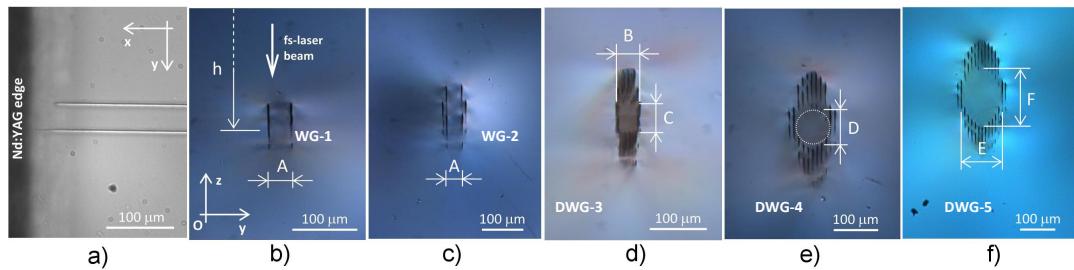


Fig. 2 Inscriptiunile realizate in mediul 0.7-at.% Nd:YAG: a) linii paralele la suprafata mediului, distantele la 40 μm ; b) structura ghid de unda de tip ‘doi pereti’, distanta A= 40 μm (WG-1); c) ghid de unda cu structura alungita pe axa Oy (WG-2); d) structura de tip dreptunghi (B= 40 μm , C= 50 μm), DWG-3; e) structura circulara (D= 80 μm), DWG-4 si f) structura eliptica (E= 120 μm , F= 165 μm), DWG-5.

Pierderile acestor structuri au fost evaluate cu ajutorul unui laser HeNe (632.8 nm); fasciculul laser HeNe a fost focalizat in fiecare ghid de unda, iar puterea radiatiei laser a fost masurata inainte si dupa ghid. Pierderile au fost de 0.4 dB/cm pentru propagarea in Nd:YAG, 1.1 dB/cm pentru WG-1, 1.4 dB/cm pentru WG-2, 2.2 dB/cm pentru ghidul dreptunghiular DWG-3, 1.6 dB/cm pentru ghidul circular DWG-4 si 1.0 dB/cm pentru ghidul eliptic DWG-5.

Performantele emisie laser au fost masurate intr-un montaj experimental similar cu cel prezentat in Fig. 3. Pompajul s-a facut cu o dioda laser cu emisie la $\lambda_p = 807 \text{ nm}$ (fibra optica cu diametrul de 100 μm si apertura numerica NA= 0.22). Rezonatorul optic a fost unul plan-plan, cu oglinziile HRM si OCM plasate cat mai aproape de suprafetele mediului Nd:YAG.

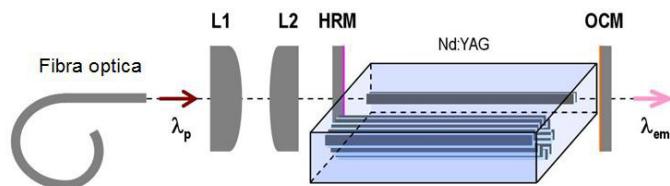


Fig. 3 Montaj experimental utilizat pentru caracterizarea ghidurilor de unda. M: oglinda; P: polarizor; L: lentila.

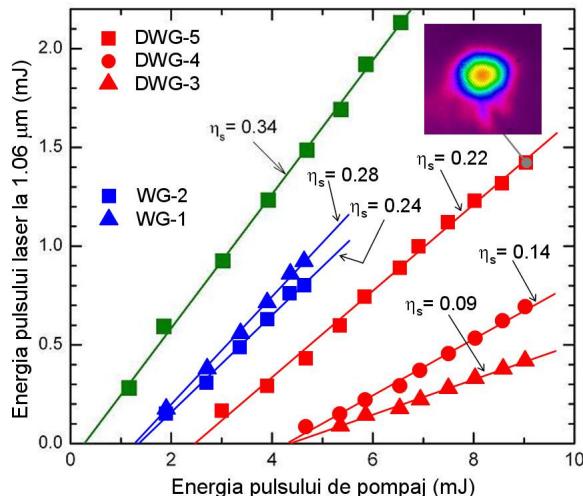


Fig. 4 Energia pulsului laser la 1.06 μm in functie de energia pulsului de pompaj la 807 nm pentru diferite ghiduri de unda. Imaginea interioara prezinta o distributie (2D) a fasciculului laser obtinut de la ghidul eliptic DWG-5. Sunt prezentate si caracteristicile emisiei laser in bulk Nd:YAG.

Caracteristici ale emisiei laser la 1.06 μm , in regim de pompaj quasi-cw, sunt prezentate in Fig. 4. Ghidul de unda DWG-5 a emis pulsuri laser cu energia $E_p = 1.4 \text{ mJ}$ (pentru pulsuri de pompaj cu energia $E_{\text{pump}} = 9.0 \text{ mJ}$), panta eficientei laser fiind $\eta_s = 0.22$. Ghidul de unda de tip ‘doi pereti’ WG-1 a livrat pulsuri laser cu energia $E_p = 0.92 \text{ mJ}$ si panta a eficientei $\eta_s = 0.28$. In cazul operarii la 1.3 μm , ghidul eliptic DWG-5 a emis pulsuri cu energia de 0.4 mJ (pentru $E_{\text{pump}} = 9.1 \text{ mJ}$), iar panta eficientei a fost $\eta_s \sim 0.10$. In plus, au fost facute incercari de a obtine emisie laser la 946 nm (pe

tranzitie de tip quasi-4 nivele, $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$, aceasta fiind realizata pentru ghidurile de unda DWG-5 si WG-1. Energia pulsului de pompaj la prag a fost de 7.5 si 3.2 mJ, respectiv, iar energia pulsului laser a fost de 0.12 mJ si 0.36 mJ, respectiv.

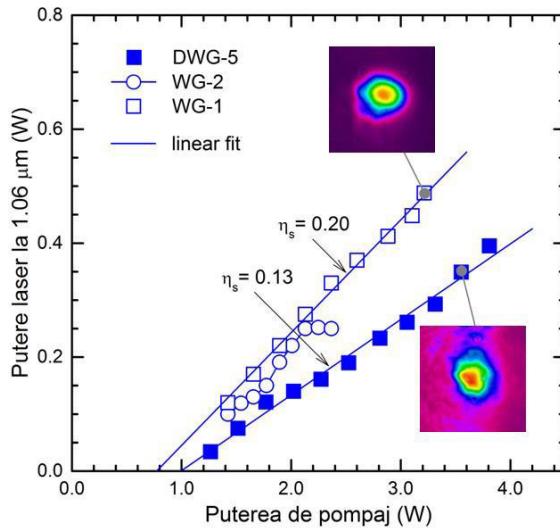


Fig. 5 Puterea de iesire laser (regim continuu) la 1.06 μm obtinuta de la ghidurile lineare WG-1 si WG-2 si de la ghidul eliptic DWG-5. Rezonator plan-plan, oglinda de extractie cu $T = 0.10$. Sunt prezentate doua distributii ale fasciculului laser.

Cateva caracteristici ale emisiei in regim continuu (cw) sunt prezentate in Fig. 5. Ghidul eliptic DWG-5 a emis o putere maxima de 0.39 W; panta emisiei laser a fost de $\eta_s = 0.11$. In aceste experimente puterea maxima la 1.06 μm , de 0.49 W cu eficienta optica $\eta_o \sim 0.15$, a fost obtinuta de la ghidul linear WG-1; panta emisiei a fost $\eta_s = 0.20$. A fost observata si emisie in cw la 1.3 μm , insa cu performante scazute. Astfel, ghidul WG-1 a emis 0.11 W la aceasta lungime de unda, pentru pompaj cu 3.2 W la 808 nm; emisia s-a facut cu o panta scazuta, de numai $\eta_s \sim 0.05$.

Rezultatele au fost publicate in doua articole ISI - Web of Science (Tabel 1, 1 si 2). Rezultate si alte idei dezvoltate in timpul acestor cercetari au dus la publicarea (cu finantare parciala) a unui alt articol (Tabel 1, 3). In plus, au fost prezentate sase comunicari, finantate parcial sau in totalitate din acest contract (Tabel 2, 1-6).

2. Emisie in Laseri de Tip Ghid de Unda Realizati in Mediile Nd:YAG de Tip Policristalin (Ceramice)

Au fost realizate ghiduri de unda in medii laser Nd:YAG de tip ceramic si a fost obtinuta emisie laser la 1.06 μm si 1.32 μm folosind pompajul cu dioda laser la 807 nm. Montajul experimental utilizat pentru scrierea structurilor tip ghid de unda in mediile laser Nd:YAG de tip ceramic este prezentat in Fig. 6 (fiind similar celui din Fig. 1).

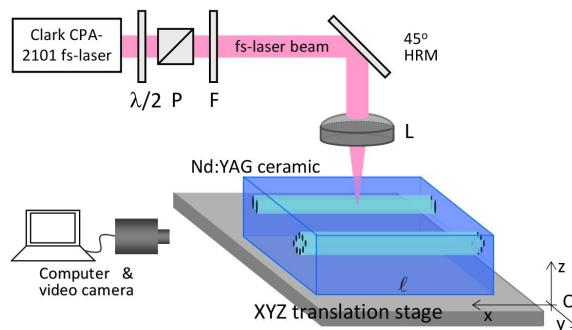


Fig. 6 Montajul experimental folosit pentru scrierea ghidurilor de unda in mediile laser Nd:YAG de tip ceramic. P: polarizor; $\lambda/2$: lama 'jumatate de unda'; F: filtru neutru; L: lentila.

Pentru focalizarea fasciculului laser a fost utilizata o lentila acromata (L) cu distanta focala de 7.5 mm si apertura numerica NA= 0.3. Diametrul fasciculului, in aer, a fost masurat ca fiind de ~5.0 μm . Trasele au fost inscriptionate pe Ox, cu o viteza de deplasare a sistemului de translatie de 50 $\mu\text{m}/\text{s}$. Procesul a fost monitorizat folosind o camera video. Au fost folosite doua medii active de Nd:YAG

(Baikowski Co. Ltd., Japonia) cu nivel de dopaj de 0.7-at.% si 1.1-at.% Nd. Suprafetele laterale ale fiecarui mediu Nd:YAG au fost sifuite dupa procesul de inscriptionare; lungimea finala a fiecarui mediu ceramic Nd:YAG a fost $\ell \sim 7.8$ mm.

Imagini ale ghidurilor realizate in cele doua medii de Nd:YAG ceramic sunt prezentate in Fig. 7. Un ghid format din doua linii (cu distanta dintre linii de $w= 50$ μm) este aratat in Fig. 7(a). Pentru a creste dimensiunea ghidului, pe directia Oz, au fost realizate structuri formate din sase linii. Astfel, au fost scrise doua ghiduri de acest fel, primul cu distanta $w= 50$ μm [WG-1, Fig. 7(b)] si al doilea cu distanta $2w= 100$ μm [WG-2, Fig. 7(c)]. Energia pulsurilor fs-laser a fost de 2.0 μJ . In continuare, au fost inscriptionate doua ghiduri cilindrice, primul cu diametrul $\phi= 50$ μm [DWG-1, Fig. 7(d)] si al doilea cu $\phi= 100$ μm [DWG-2, Fig. 7(e)]. Energia pulsurilor fs laser a fost de 1.0 μJ . Toate ghidurile au fost centrate la adancimea $h= 500$ μm sub suprafata mediilor Nd:YAG. Pierderile de propagare (la lungimea de unda 632.8 nm) au fost de ~ 0.5 dB/cm pentru WG-1 si de 0.6 - 0.7 dB/cm pentru WG-2. In cazul ghidurilor cilindrice pierderile au avut valori mai ridicate, de 1.0 - 1.2 dB/cm pentru DWG-1 si in domeniul 1.5 - 1.8 dB/cm pentru DWG-2.

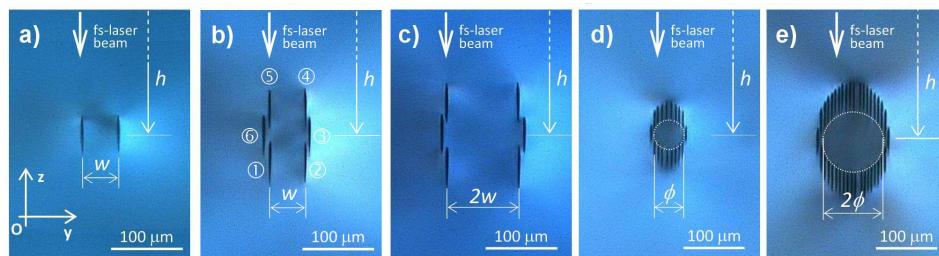


Fig. 7 Diferite ghiduri de unda realizate in Nd:YAG ceramic. a) Ghid de tip ‘doua lini’ cu distanta $w = 50$ μm . Ghiduri cu dimensiune crescuta pe Oz: b) $w = 50$ μm (WG-1) si c) $2w = 100$ μm (WG-2). Ghiduri circulare cu diametrul d) $\phi = 50$ μm (DWG-1) si e) $2\phi = 100$ μm (DWG-2).

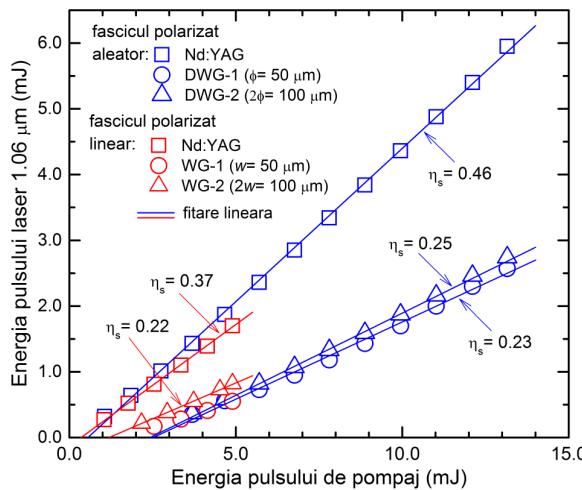


Fig. 8 Energia pulsurilor laser emise la 1.06 μm , obtinute in diferite ghiduri inscriptionate in 0.7-at.% Nd:YAG ceramic, rezonator cu oglinda OCM avand transmisia $T = 0.05$.

In Fig. 8 sunt prezentate performante ale emisiei laser la $\lambda_{\text{em}}= 1.06$ μm obtinute de la ghidurile realizate in mediul 0.7-at.% Nd:YAG ceramic, pentru pompaj in regim quasi-cw. Transmisia oglinzelor de iesire la λ_{em} a fost $T=0.05$. Pentru ghidul DWG-2 s-a obtinut o valoare maxima a energiei $E_p= 2.8$ mJ, pentru energia de pompaj $E_{\text{pump}}= 13.1$ mJ; astfel, eficienta optica a fost $\eta_o= 0.21$. Panta eficientei a fost $\eta_s= 0.23$. Mediul Nd:YAG ceramic nemodificat a generat pulsuri cu energia $E_p= 5.95$ mJ ($\eta_0 \sim 0.45$) si panta $\eta_s= 0.46$. Eficienta de absorbtie a pompajului (η_a) in mediul laser cu indicele de refractie nemodificat a fost masurata ca fiind 0.71, iar eficienta cu care a fost transferat fasciculul de pompaj in structura DWG-2 a fost evaluata ca fiind aproximativ unitara. In acest fel, performantele mai scăzute ale ghidului DWG-2 se datoreaza pierderilor de propagare mai ridicate fata de cele ale mediului Nd:YAG nemodificat (pentru Nd:YAG pierderile prin propagare au fost 0.2 dB/cm la 632.8 nm). Ghidul liniar WG-2 a emis pulsuri laser cu $E_p= 0.8$ mJ pentru un pompaj $E_{\text{pump}}= 4.8$ mJ ($\eta_o \sim 0.17$), cu panta a eficientei $\eta_s= 0.22$. Factorul de calitate M^2 al fasciculului laser a fost masurat ca fiind 1.65

pentru emisia laser in mediul Nd:YAG nemedicat. Pentru ghidurile de unda calitatea fasciculului laser a scăzut, fiind $M^2 \sim 10.1$ in cazul ghidului cilindric DWG-2 si $M^2 \sim 3.9$ pentru ghidul liniar WG-2.

Pentru emisia laser la $1.3 \mu\text{m}$ rezonatorul laser a fost alcătuit dintr-o oglinda de pompaj avand cu reflectivitate ridicata la aceasta lungime de unda; oglinda de extractie a fost depusa cu transmisie $T = 1.3 \mu\text{m}$ dar si cu transmisie ridicata ($HT \sim 0.995$) la $1.06 \mu\text{m}$. Caracteristici ale emisiei laser la $1.3 \mu\text{m}$ obtinute pentru pompaj in regim de pompaj quasi-cw folosind o oglinda de extractie cu $T = 0.03$ sunt prezentate in Fig. 9. In cazul ghidului cilindric DWG-1 realizat in mediul de 0.7-at.% Nd:YAG a fost masurata o valoare a energiei $E_p = 1.2 \text{ mJ}$ ($E_{\text{pump}} = 13.0 \text{ mJ}$, $\eta_o = 0.09$). Pentru ghidul DWG-2 (mediul 1.1-at.% Nd:YAG) pragul emisiei laser este mult mai ridicat, masurandu-se o energie $E_p = 0.75 \text{ mJ}$ si panta eficientei $\eta_s = 0.11$.

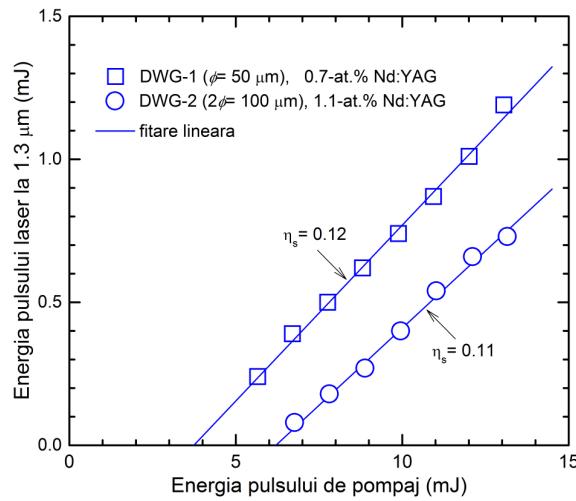


Fig. 9 Energia pulsurilor laser la $\lambda_{\text{em}} = 1.3 \mu\text{m}$ emise de ghidurile circulare DWG-1 ($\phi = 50 \mu\text{m}$, mediul 0.7-at.% Nd:YAG) si DWG-2 ($2\phi = 100 \mu\text{m}$, mediul 1.1-at.% Nd:YAG), oglinda OCM cu transmisia $T = 0.03$.

A fost obtinuta emisie laser la $\lambda_{\text{em}} = 1.06 \mu\text{m}$ in regim de unda continua. Puterea de iesire la aceasta lungime de unda este arata in Fig. 10, pentru ghidul cilindric DWG-2 ($2\phi = 100 \mu\text{m}$) realizat in ambele medii de Nd:YAG ceramic. Pentru mediul 0.7-at.% Nd:YAG a fost masurata o valoare maxima de 0.49 W pentru 3.7 W putere de pompaj la lungimea de unda 807 nm ($\eta_o \sim 0.13$) si panta eficientei $\eta_s \sim 0.25$. Distributia fasciculului laser a fost simetrica, cu factorul $M^2 \sim 3.2$.

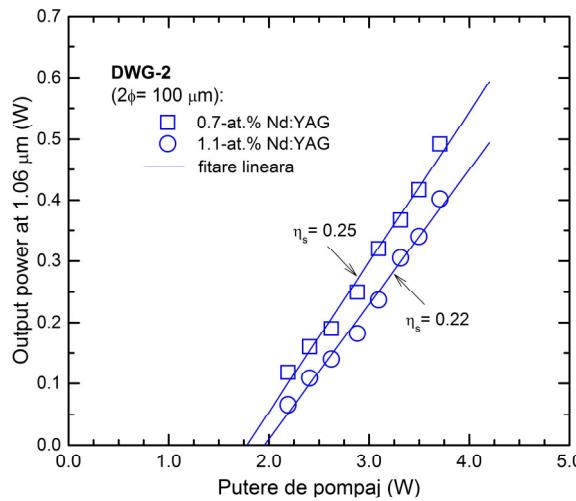


Fig. 10 Puterea fasciculului laser la $1.06 \mu\text{m}$ in regim de emisie cw, ghidul de unda DWG-2, oglinda cu $T = 0.05$.

Rezultatele au fost publicate intr-un articol ISI-WEB of Science (Tabel 1, 4) si au fost prezentate la doua conferinte (Tabel 2, 7 si 8) cu participare internationala.

3. Laseri de Tip Ghid de Unda Realizati prin Inscriptiunea pe o Traекторie de Tip Elicoidal

In cazul metodei clasice de inscriptiune, ghidurile sunt realizate scriind linii consecutive la diferite adancimi astfel incat acestea sa incadreze o regiune cu indice de refractie nemodificat, emisia fiind obtinuta in aceasta regiune [Fig. 11(a)]. Ghidurile realizate prin aceasta metoda pot prezenta pierderi mari, datorita materialului care ramane nemodificat intre fiecare doua linii. Din acest motiv grupul nostru a propus o noua tehnica de scriere, astfel incat mediul laser sa fie miscat pe o traectorie de tip helicoidal. O prima solutie consta in miscarea elicoidală a mediului pe o directie perpendiculara la fasciculul laser fs si paralel cu directia pe care se va obtine emisie laser [Fig. 11(b)]. Dezavantajul acestei tehnici este timpul lung, necesar pentru realizarea ghidului de unda. O a doua solutie considera varianta in care mediul laser este rotit cu 90°C pe sistemul de translatie Oxyz, iar scrierea ghidurilor este realizata pe directia in care se va obtine emisie laser [Fig. 11(c)]. Mediul laser este rotit in planul Oxy si in acelasi timp efectueaza o miscare de translatie in planul Oz.

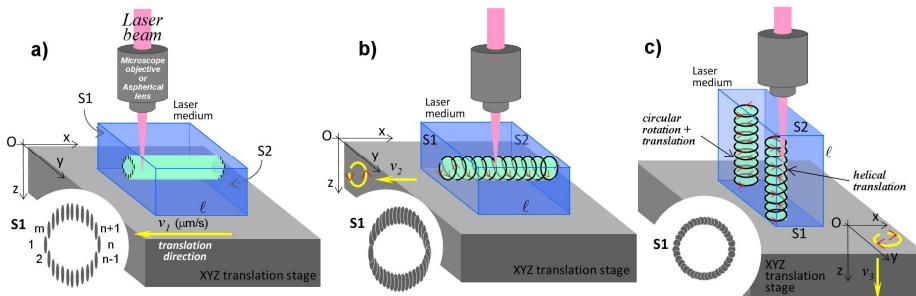


Fig. 11 a) Tehnica de scriere a ghidurilor de unda prin translatia fasciculului laser, paralel cu directia pe care va fi obtinuta emisia laser. Tehnici de inscriptiune propuse de grupul nostru, prin miscarea elicoidală a mediului: b) Perpendicular la fasciculul laser fs (tehnica propusa); c) Paralel cu fasciculul laser fs si cu directia pe care se va obtine emisie laser (tehnica propusa si aplicata).

In Fig. 12 sunt prezentate fotografii ale unor ghiduri circulare realizate prin tehnica ilustrata in Fig. 11(c). Am folosit un mediu 1.1-at.% Nd:YAG ceramic cu lungimea de 5 mm (Baikowski Co., Ltd, Japonia), in care au fost scrise trei ghiduri circulare cu diferite diametre (50 μm, 80 μm si 100 μm). Pentru realizarea acestor ghiduri am utilizat un obiectiv 10x si NA= 0.30, diametrul fasciculului fs-laser focalizat fiind ~12 μm (in aer). Energia pulsurilor fs laser a fost de 15 μJ. Durata de scriere a structurilor cu aceasta tehnica a fost destul de scurta; de exemplu, scrierea ghidului cu diametrul de 100 μm s-a realizat in ~2 min. In urma slefuirii suprafetelor S1 si S2 lungimea cristalului a scazut pana la ~4.7 mm. Am notat aceste ghiduri cu DWG-1 (ghidul cu diametru $\phi=100 \mu\text{m}$, Fig. 12(a)], DWG-2 ($\phi=80 \mu\text{m}$) si DWG-3 ($\phi=50 \mu\text{m}$, Fig. 12(b)]. Pentru comparatie, in Fig. 12(c) este aratat un ghid cu diametrul $\phi= 100 \mu\text{m}$ care a fost realizat prin metoda clasica. Pentru scrierea acestui ghid energia pulsurilor laser a fost de ~1.5 μJ, iar pentru focalizare am utilizat o lentila cu distanta focala 7.5 mm. Ghidul a fost centrata la 500 μm sub suprafata mediului Nd:YAG si a fost realizat din 38 de linii paralele pe directia Ox, fiind inscriptionate cu o viteza de 50 μm/s. Timpul de scriere a fost de 1 ora (mult mai lung decat in cazul scrierii prin miscare elicoidală). Pierderile de propagare (la 632.8 nm) au variat de la 1.1 pana la 1.2 dB/cm pentru cele trei ghiduri, DWG-1, DWG-2 si DWG-3. Pentru ghidul DWG-4, aceste pierderi au fost de 1.6 dB/cm pentru fascicul HeNe polarizat TM si de ~1.9 dB/cm pentru directia de polarizare TE. Astfel, folosind miscarea de tip helicoidală a mediului laser au fost obtinute ghiduri ce prezinta pierderi mai mici decat cele scrise folosind tehnica clasica de translatie.

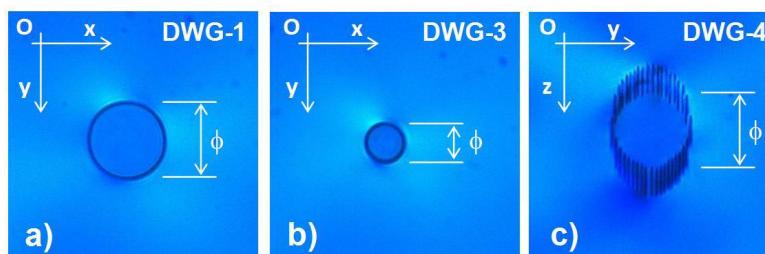


Fig. 12 Imagini ale ghidurilor de unda circulare realizate in mediu 1.1-at.% Nd:YAG ceramic prin miscarea elicoidală: a) DWG-1, diametrul $\phi = 100 \mu\text{m}$ si b) DWG-3, $\phi = 50 \mu\text{m}$. Ghidul c) DWG-4 (cu $\phi = 100 \mu\text{m}$) a fost obtinut prin tehnica clasica de translatie.

In Fig. 13 sunt prezentate caracteristicile emisiei laser obtinute de la ghidurile inscriptionate in mediul 1.1-at.% Nd:YAG ceramic, la cele doua lungimi de unda, $\lambda_{em}=1.06 \mu m$ si $1.3 \mu m$, considerand pompajul in regim quasi-cw. In cazul emisiei la $1.06 \mu m$ in ghidul DWG-2, energia maxima a pulsului laser a fost $E_p= 3.5 \text{ mJ}$ (eficienta optica, $\eta_0\sim 0.27$) cu panta a eficientei $\eta_s=0.31$ [Fig. 13(a)]. Pentru DWG-3 energia pulsului a ajuns la $E_p= 4.1 \text{ mJ}$ ($\eta_0\sim 0.31$) iar panta eficientei a fost $\eta_s= 0.36$ (oglinda OCM cu $T= 0.05$). Chiar daca eficienta de cuplare (η_c) a fasciculului de pompaj este mai scazuta in cazul ghidului DWG-3 ($\eta_c\sim 0.70$), suprapunerea pompajului cu modul laser a compensat aceasta scadere. Pentru DWG-4 energia maxima la $1.06 \mu m$ a fost $E_p= 2.2 \text{ mJ}$ ($\eta_0\sim 0.17$) cu panta eficientei $\eta_s= 0.20$. Factorul de calitate a fost $M^2\sim 20.1$. In Fig. 13(b) sunt aratare caracteristici ale emisiei laser la $1.3 \mu m$, oglinda de extractie la aceasta lungime de unda cu $T= 0.03$. Ghidul DWG-1 a emis pulsuri laser cu $E_p= 1.2 \text{ mJ}$ ($\eta_0\sim 0.09$) cu panta $\eta_s= 0.12$. Din nou, pentru ghidul DWG-4 a fost obtinuta o valoare mai mica a energiei $E_p= 0.82 \text{ mJ}$ ($\eta_0\sim 0.06$), iar panta eficientei a scazut pana la $\eta_s= 0.10$.

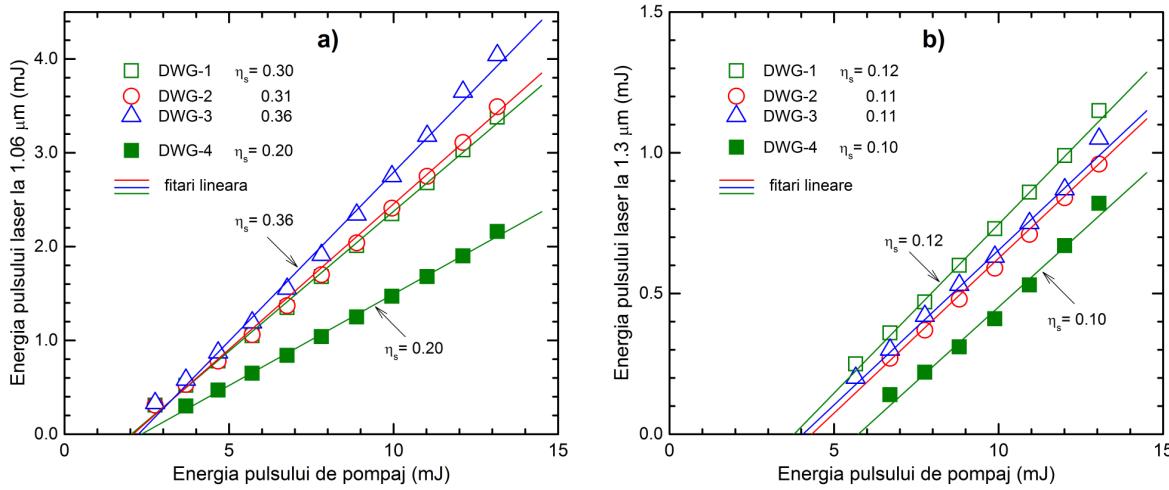


Fig. 13 Rezultate obtinute in regim de pompaj quasi-cw a ghidurilor realizate in 1.1-at.% Nd:YAG ceramic prin deplasare helicoidală (DWG-1, DWG-2 si DWG-3), precum si in ghidul DWG-4 obtinut prin scrierea prin translatie, emisie la a) $1.06 \mu m$, OCM cu $T= 0.05$ si b) $1.3 \mu m$, OCM cu $T= 0.03$.

In Fig. 14 sunt reprezentate performantele emisiei laser in regim cw la $1.06 \mu m$ folosind o oglinda de extractie cu $T= 0.05$. Pentru ghidul DWG-1 a fost masurata o putere de iesire $P_{out}= 0.48 \text{ W}$ cu 3.7 W putere de pompaj la 807 nm ; panta eficientei a fost $\eta_s= 0.24$. In cazul ghidului DWG-2 puterea de iesire a crescut putin, pana la 0.51 W . Pentru ghidul DWG-4 puterea maxima masurata a fost 0.37 W ($\eta_0\sim 0.10$); panta eficientei a fost $\eta_s= 0.19$.

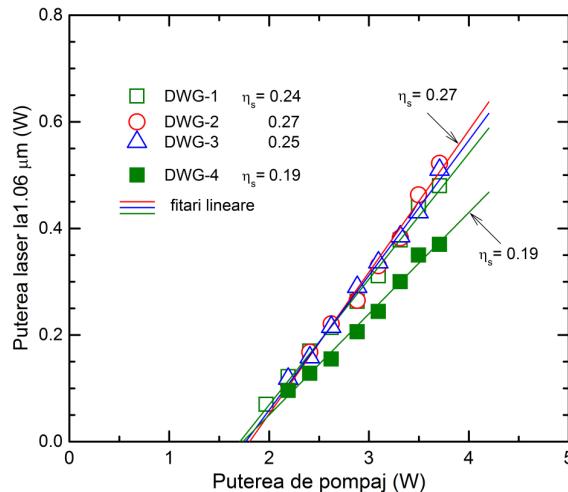


Fig. 14 Puterea fasciculului laser la $1.06 \mu m$ in regim de emisie cw, oglinda OCM cu $T= 0.05$.

Rezultatele au fost publicate in doua articole ISI - web of Science (Tabel 1, 5 si 6) si au fost prezentate in doua comunicari la conferinte (Tabel 2, 9 si 10).

4. Ghiduri de Unda Realizate in Nd:YVO₄. Emisie Laser la 1.06 si 1.34 μm Folosind Pompajul cu Diode Laser la 880 nm, Direct in Nivelul Emitterilor ⁴F_{3/2}

Au fost realizate ghiduri de unda de tip "depressed cladding" in mediul uniaxial Nd:YVO₄ folosind pulsuri laser cu durata de ordinul fs si metoda clasica de translatie [Fig. 1, Fig. 11(a)]. In experimente am utilizat trei cristale de Nd:YVO₄ cu concentratii de 0.5, 0.7 si 1.0-at.% Nd, in care au fost scrise ghiduri cilindrice cu diametrul de 100 μm. Energia pulsurilor laser fs a fost de 0.3 μJ. Ghidurile sunt notate prin CWG-1 pentru 0.5-at.% Nd:YVO₄ [Fig. 15(a)], CWG-2 pentru 0.7-at.% Nd:YVO₄ si CWG-3 pentru 1.0-at.% Nd:YVO₄. In plus, in cristalul de 0.5-at.% Nd:YVO₄ a fost inscriptionat si un ghid patrat cu latura de 80 μm [SWG, Fig. 15(b)]. Ghidurile au fost centrate la 500 μm sub suprafata fiecarui mediu Nd:YVO₄. Dupa procesul de scriere, suprafetele laterale au fost slefuite, astfel incat lungimea finala a ghidurilor laser a fost de 7.2 mm pentru CWG-1 si SWG, de 4.8 mm pentru CWG-2 si de 3.6 mm pentru CWG-3. Pierderile prin propagare (la 632.8 nm) au fost evaluate ca fiind 2.4 dB/cm pentru CWG-1 si de la 1.5 pana la 1.7 dB/cm pentru CWG-2 si CWG-3; pentru ghidul SWG pierderile au fost de ~3.4 dB/cm.

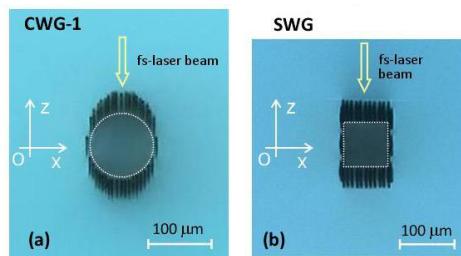


Fig. 15 Ghiduri de unda inscriptionate in: a) Mediul 0.5-at.% Nd:YVO₄, ghid circular cu diametrul $\phi = 100 \mu\text{m}$, CWG-1 si in b) Mediul 0.7-at.% Nd:YVO₄, ghid patrat ($80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$), SWG.

Pompajul optic a fost realizat cu diode laser (Limo Co., Germania) cu emisie la 808 nm si la 880 nm, atat in regim quasi-cw, (durata pulsului de pompaj de 1 ms si rata de repetitie de 10 Hz) cat si in regim de unda continua. Fasciculul de pompaj a fost focalizat in mediul laser folosind o lentila de colimare cu distanta focala 50 mm si o lentila de focalizare cu distanta focala 30 mm. Fiecare mediu Nd:YVO₄ a fost amplasat pe un suport din aluminiu, fara racire. Montajul experimental utilizat pentru a genera emisie laser a fost similar cu cel folosit in experimentele anterioare. In Fig. 16 sunt prezentate performantele laser la 1.06 μm ale ghidului CWG-2, folosind pompaj quasi-cw. Pentru a putea compara performantele emisiei laser la acelasi nivel de absorbtie, energia maxima de pompaj a fost de 11.5 mJ (pentru $\lambda_p = 808 \text{ nm}$) si 17.0 mJ (pentru $\lambda_p = 880 \text{ nm}$). Pentru pompaj la $\lambda_p = 808 \text{ nm}$, energia maxima a pulsului laser a fost $E_p = 3.0 \text{ mJ}$ folosind o oglinda de extractie cu $T = 0.05$. Eficienta optica (η_{oa}) si panta eficientei (η_{sa}) au fost determinate in functie de energia de pompaj absorbita in cristal, acestea fiind $\eta_{oa} \sim 0.30$ si $\eta_{sa} \sim 0.32$. In cazul pompajului la 880 nm, energia maxima a crescut la $E_p = 3.8 \text{ mJ}$, cu $\eta_{oa} \sim 0.36$ si $\eta_{sa} \sim 0.39$.

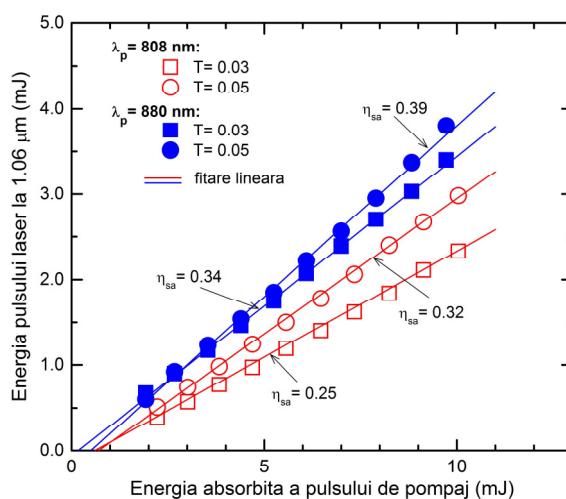


Fig. 16 Energia pulsurilor laser la 1.06 μm obtinute de la ghidul de unda CWG-2 ($\phi = 100 \mu\text{m}$, 0.7-at.% Nd:YVO₄) folosind pompajul la 808 nm si la 880 nm. T este transmisia oglinzelor de extractie OCM.

Cele mai bune rezultate pentru emisia laser la $1.34 \mu\text{m}$, care au fost masurate in ghidul CWG-1 (0.5-at.% Nd:YVO₄), sunt prezentate in Fig. 17. Pentru $\lambda_p = 808 \text{ nm}$, energia maxima a pulsului laser a fost $E_p = 1.5 \text{ mJ}$ (cu $\eta_{\text{oa}} \sim 0.14$ si $\eta_{\text{sa}} \sim 0.19$), in timp ce pentru pompaj optic la $\lambda_p = 880 \text{ nm}$ energia a fost $E_p = 1.8 \text{ mJ}$ ($\eta_{\text{oa}} \sim 0.18$ si $\eta_{\text{sa}} \sim 0.23$). Mentionam ca ghidul dreptunghiular a emis, pentru pompajul la $\lambda_p = 880 \text{ nm}$, pulsuri laser la $1.06 \mu\text{m}$ cu $E_p = 2.0 \text{ mJ}$, in timp ce pentru $\lambda_{\text{em}} = 1.34 \mu\text{m}$ energia maxima a pulsurilor laser a fost $E_p = 0.71 \text{ mJ}$.

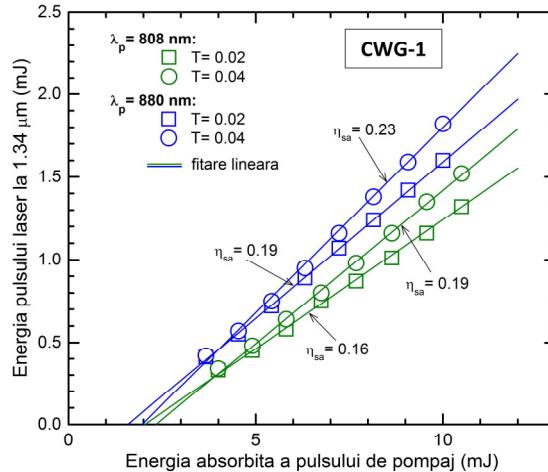


Fig. 17 Energia pulsurilor laser la $1.34 \mu\text{m}$ obtinute de la ghidul CWG-1 ($\phi = 100 \mu\text{m}$, 0.5-at.% Nd:YVO₄), pompaj optic la 808 nm si la 880 nm , oglinda OCM cu $T = 0.03$.

Pentru emisia laser la $1.06 \mu\text{m}$ modificarea pompajului de la 808 nm la 880 nm duce la o crestere a valorii defectului cuantic ($\eta_{\text{qd}} = \lambda_p / \lambda_{\text{em}}$) cu 8.8% (de la 0.76 pentru $\lambda_p = 808 \text{ nm}$ la 0.827 pentru $\lambda_p = 880 \text{ nm}$). In aceste conditii, caldura generata in cristal in timpul emisiei laser scade cu ~28%. Pentru a verifica aceasta afirmatie temperatura suprafetei cristalelor de Nd:YVO₄ a fost masurata (deasupra fiecarui ghid de unda) pentru ambele lungimi de unda de pompaj. Masuratorile au fost facute cu ajutorul unei camere termice FLIR (model T620, domeniu -40°C la +150°C). Spre exemplu, pentru ghidul CWG-2 (0.7-at.% Nd:YVO₄) pompat la 808 nm , temperatura maxima masurata a fost de ~128°C (in regim non-lasing), aceasta scazand la ~108°C pentru emisie laser. Pentru pompajul la 880 nm temperatura maxima a fost de ~100°C (in regim non-lasing) de ~108°C pentru emisie laser. In plus, s-a observat ca distributia temperaturilor in ghiduri este diferita pentru cele doua lungimi de pompaj, fiind mai uniforma pentru pompajul la 880 nm .

Rezultatele au fost publicate intr-un articol ISI - Web of Science (Tabel 1, 7) si au fost prezentate trei comunicari la conferinte internationale (Tabel 2, 11-13).

5. Emisie Laser de Mare Putere in Laseri de Tip Ghid de Unda Realizati in Nd:YAG de Tip Ceramic. Operare in Regim de Comutare a Factorului de Calitate Folosind Cristal cu Absorbtie Saturabila Cr⁴⁺:YAG

In experimentele anterioare am utilizat pompajul in regim quasi-continuu, pentru a obtine emisie laser eficienta la lungimile de unda (λ_{em}) de $1.06 \mu\text{m}$ si $1.3 \mu\text{m}$, de la ghiduri de unda inscriptionate cu fascicul laser fs in Nd:YAG si Nd:YVO₄. Totusi, in cazul emisiei in regim continuu (cw), la $\lambda_{\text{em}} = 1.06 \mu\text{m}$, puterea laser a fost limitata la 0.5 W (cu eficienta optica $\eta_{\text{oa}} = 0.13$, pompaj la $\lambda_p = 807 \text{ nm}$) in Nd:YAG. In plus, pentru $\lambda_{\text{em}} = 1.3 \mu\text{m}$ puterea laser a avut valori mici (de 0.15 W in Nd:YAG). Astfel, obiectivul urmator a fost de a imbunatatiti performantele emisiei laser in regim cw obtinute de la ghidurile realizate in Nd:YAG (atat la $1.06 \mu\text{m}$ cat si la $1.3 \mu\text{m}$).

In acest scop, am considerat diferite ghiduri de unda cu diametrul $\phi = 100 \mu\text{m}$ realizate in Nd:YAG ceramic prin tehnica de scriere clasica, astfel: DWG-1 in 0.7-at.% Nd:YAG cu lungimea de 4.8 mm, DWG-2, in 0.7-at.% Nd:YAG cu lungime de 7.8 mm, DWG-3, in 1.1-at.% Nd:YAG cu lungimea de 7.7 mm si DWG-4, in 1.1-at.% Nd:YAG cu grosimea de 4.5 mm. Am fost folosit si un ghid cu $\phi = 100 \mu\text{m}$ (DWG-5) realizat prin tehnica de miscare elicoidală in 1.1-at.% Nd:YAG, lungime de 4.5 mm. Fiecare suprafata de intrare in ghid (S1) si fiecare suprafata de iesire din ghid (S2) au fost prelucrate optic (paralelism 10"; planeitate $\lambda/10$ la 633 nm), fiind apoi depuse cu straturi dielectrice. Astfel, S1 a fost depusa AR ($R < 0.5\%$) la $\lambda_{\text{em}} = 1.06 \mu\text{m}$ si $1.3 \mu\text{m}$ si HT ($R < 2.5\%$) la $\lambda_p = 807 \text{ nm}$; S2 a fost depusa AR la λ_{em} .

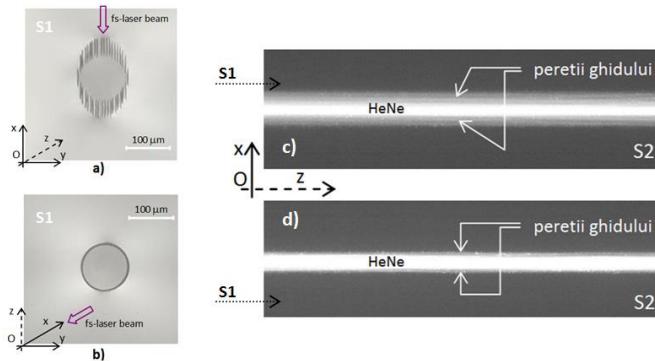


Fig. 18 Fotografii luate la microscop ale suprafetei S1 pentru ghidurilor de unda **a)** DWG-4 si **b)** DWG-5. Este aratata propagarea unui fascicul laser HeNe pe o lungime de 2.5 mm in ghidurile **c)** DWG-4 si **d)** DWG-5.

O imagine a suprafetei S1 a ghidului DWG-4 este prezentata in Fig. 18(a). In cazul scierii cu metoda clasica, peretii ghidului sunt formati din suma urmelor lasate in Nd:YAG de laserul cu fs; zonele care au indicele de refractie neschimbat vor introduce pierderi, atat pentru radiatia de pompaj cat si pentru emisia laser. In cazul ghidului realizat prin metoda elicoidală [Fig. 18(b)] peretele este continuu si uniform. Pierderile la propagare (masurate la 632.8 nm) au fost de 1.7 dB/cm pentru ghidul DWG-1, de 1.5 dB/cm pentru ghidul DWG-2, de 1.2 dB/cm pentru ghidul DWG-3, de 1.5 dB/cm pentru ghidul DWG-4 si de 0.6 dB/cm pentru ghidul DWG-5. In Fig. 18(c) am aratat propagarea fasciculului laser HeNe in ghidul DWG-4 iar in Fig. 18(d) pentru ghidul DWG-5, ambele pe o lungime de 2.0 mm (aproape de suprafata S2). Emisia laser a fost obtinuta in rezonator de tip plan-plan, oglinda de pompaj cat si oglinda de extractie (OCM) fiind plasate foarte aproape de suprafetele S1, respectiv S2 ale fiecarui mediu Nd:YAG. Mediile au fost invelite in Indium si apoi plasate intr-un suport de cupru a carui temperatura a fost mentinuta la 20°C. Pompajul optic a fost realizat la $\lambda_p = 807$ nm cu dioda laser (Limo Co., Germania; fibra cu diametrul $\phi = 100 \mu\text{m}$ si NA=0.22).

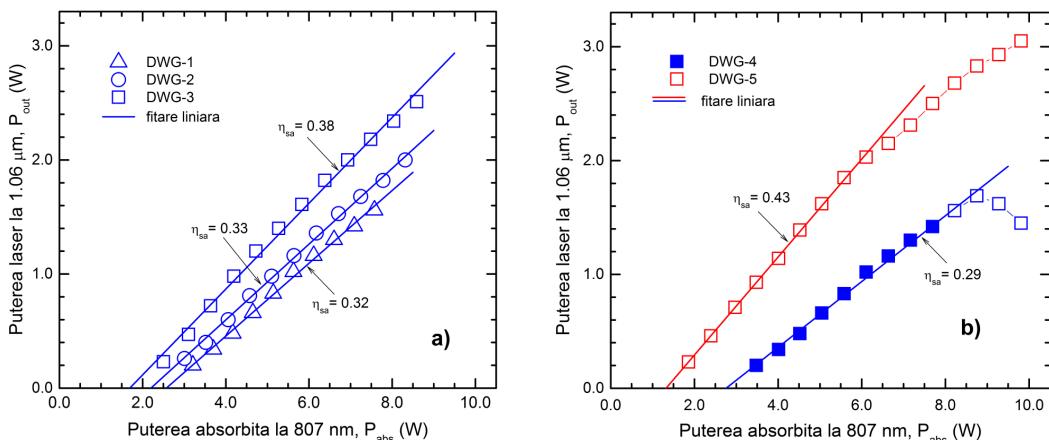


Fig. 19 Puterea laser la $1.06 \mu\text{m}$ in functie de puterea de pompaj absorbita ($\lambda_p = 807$ nm) pentru: **a)** Ghidurile DWG-1, DWG-2 si DWG-3; **b)** ghidurile DWG-4 si DWG-5. Oglinda OCM a avut transmisia $T = 0.05$ la $\lambda_{em} = 1.06 \mu\text{m}$.

Variatia puterii laser la $\lambda_{em} = 1.06 \mu\text{m}$ in functie de puterea absorbita la $\lambda_p = 807$ nm este aratata in Fig. 19. Ghidul DWG-1 a emis puterea $P_{out} = 1.6 \text{ W}$ pentru puterea absorbita $P_{abs} = 7.6 \text{ W}$, cu eficienta optica $\eta_{oa} = 0.21$; panta eficientei laser a fost $\eta_{sa} = 0.32$ [Fig. 19(a)]. Puterea obtinuta de la ghidul DWG-3 a fost $P_{out} = 2.5 \text{ W}$, cu eficienta $\eta_{oa} = 0.29$; panta eficientei laser a fost $\eta_{sa} = 0.38$. Cele mai bune rezultate au fost obtinute de la ghidul DWG-5 [Fig. 19(b)]. Astfel, s-a masurat puterea $P_{out} = 3.1 \text{ W}$ la $1.06 \mu\text{m}$ pentru o putere absorbita la 807 nm de $P_{abs} = 9.8 \text{ W}$ (astfel, eficienta optica a fost $\eta_{oa} = 0.31$), panta emisiei laser fiind $\eta_{sa} = 0.43$. Pierderile rezonatorului L_i au fost evaluate ca avand valoarea 0.05 pentru ghidul DWG-3, de 0.07 la 0.08 pentru ghidurile DWG-1, DWG-2 si DWG-4 si de 0.03 pentru ghidul DWG-5.

Emisia laser la $\lambda_{em} = 1.3 \mu\text{m}$ a fost obtinuta numai in ghidul DWG-5 (Fig. 20). Puterea laser a fost $P_{out} = 1.6 \text{ W}$ pentru $P_{abs} = 9.3 \text{ W}$ la $\lambda_p = 807 \text{ nm}$, eficienta optica fiind $\eta_{oa} = 0.17$; panta emisiei laser a fost $\eta_{sa} = 0.19$.

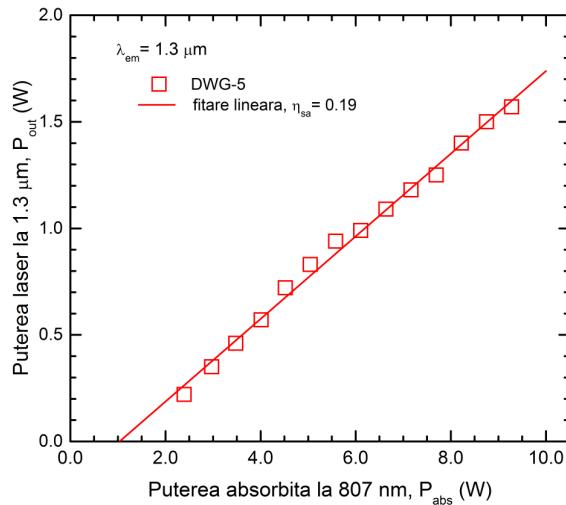


Fig. 20 Puterea laser la $1.3 \mu\text{m}$ in functie de P_{abs} la $\lambda_p = 807 \text{ nm}$ pentru ghidul DWG-5, oglinda OCM cu $T = 0.03$.

Emisia laser (la $\lambda_{\text{em}} = 1.06 \mu\text{m}$) in regim comutat s-a obtinut cu un cristal Cr⁴⁺:YAG cu absorbtie saturabila, avand transmisia initiala $T_i = 0.90$. Mediul Cr⁴⁺:YAG a fost plasat intre ghidul DWG-3 (mediul 1.1-at.% Nd:YAG, 7.7 mm) si oglinda de extractie cu transmisia $T = 0.05$. Puterea medie masurata a fost de 680 mW pentru $P_{\text{abs}} = 9.2 \text{ W}$ [Fig. 21(a)]. Rata de repetitie a pulsurilor laser a fost de 34.4 kHz, de aici rezultand o energie a pulsurilor laser de $19.7 \mu\text{J}$ [Fig. 21(b)]. Durata pulsurilor a fost de 2.8 ns, astfel incat puterea de varf a pulsurilor laser a atins 7 kW.

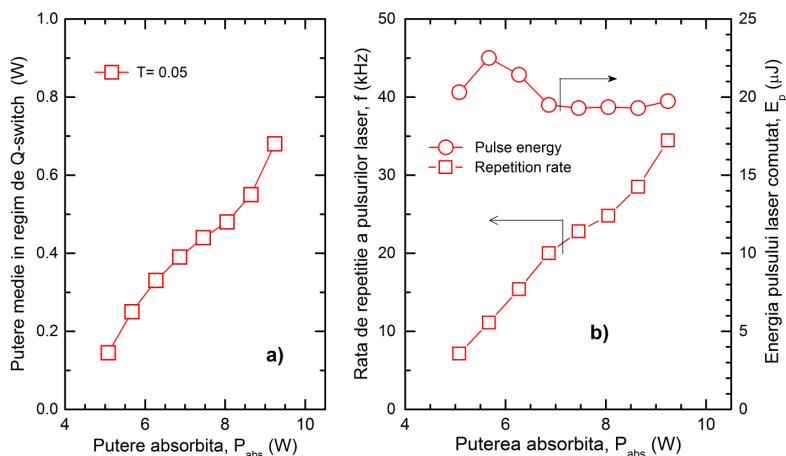


Fig. 21 Caracteristicile emisiei laser in regim de comutare a factorului de calitate cu Cr⁴⁺:YAG avand $T_i = 0.90$: a) Puterea medie; b) Energia pulsurilor laser si rata de repetitie a pulsurilor; OCM cu $T = 0.05$.

Rezultatele au fost publicate intr-un articol ISI - Web of Science (Tabel 1, 8) si au fost prezentate doua comunicari la conferinte internationale (Tabel 2, 14 si 15).

6. Emisie Laser de Mare Putere in Laseri de Tip Ghid de Unda Realizati in Cristale Laser Nd:YVO₄

Ghiduri de unda cu diametrul de $100 \mu\text{m}$ au fost inscriptionate, prin metoda clasica de translatie, in diferite medii Nd:YVO₄, astfel: intr-un mediu 0.5-at.% Nd:YVO₄ cu lungimea de 6.9 mm (ghid notat prin DWG-YV-1); intr-un mediu 0.7-at.% Nd:YVO₄ cu lungimea de 4.6 mm (ghidul DWG-YV-2) si intr-un mediu 1.0-at.% Nd:YVO₄ cu lungimea de 3.5 mm (ghidul DWG-YV-3). Energia pulsurilor laserului fs a fost in domeniul 0.1 la $0.19 \mu\text{J}$. Fiecare ghid a constat dintr-o suma de urme care au fost inscriptionate pe un contur circular, distanta dintre doua urme (sau trase) consecutive fiind de 4 la $5 \mu\text{m}$. Spre exemplu, in Fig. 22 sunt arataate imagini ale ghidului DWG-YV-1, prima fotografie fiind realizata la microscop [Fig. 22(a)], in timp ce a doua arata suprafata de iesire a ghidului in timpul pompajului optic [Fig. 22(b)]. La fel ca si in cazul Nd:YAG, mediiile au fost slefuite la 'grad laser' si apoi acoperite cu straturi dielectrice tip AR la lungimile de unda laser $1.06 \mu\text{m}$ si $1.34 \mu\text{m}$ si HT ($T > 0.99$) la lungimile de unda de pompaj de 808 nm si 880 nm . Pompajul optic si rezonatorul optic au fost similare celor utilizate in cazul ghidurilor de unda realizate in Nd:YAG.

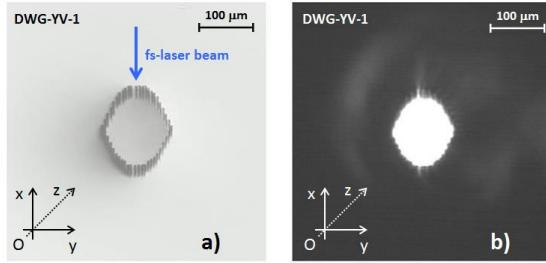


Fig. 22 Imagini ale ghidului de unda DWG-YV-1 (0.5-at.% Nd:YVO₄, 6.9 mm): **a)** Imagine la microscop; **b)** Imagine a suprafetei de iesire, in care se observa pompajul optic care este concentrat in ghid.

Puterea laser generata de ghidul DWG-YV-1 la $\lambda_{em}=1.06 \mu\text{m}$ este aratata in Fig. 23. In cazul in care pompajul optic s-a facut la $\lambda_p=808 \text{ nm}$, ghidul a emis puterea $P_{out}=2.4 \text{ W}$ pentru o putere absorbita $P_{abs}=10.3 \text{ W}$ [Fig. 23(a)]; astfel, eficienta optica (in raport cu P_{abs}) a fost $\eta_{oa}=0.23$. Panta eficientei laser a fost $\eta_{sa}=0.25$ (oglinda de extractie cu $T=0.03$). Ce mai ridicata putere, pentru pompajul la 808 nm, a fost masurata cu oglinda de extractie avand $T=0.05$: $P_{out}=3.4 \text{ W}$ cu $\eta_{oa}=0.33$. Ghidul a operat cu o panta a eficientei $\eta_{sa}=0.36$. In cazul in care pompajul s-a facut la $\lambda_p=880 \text{ nm}$ (adica direct in nivelul laser emitator ${}^4F_{3/2}$), ghidul de unda a emis $P_{out}=4.4 \text{ W}$ pentru o putere absorbita $P_{abs}=9.8 \text{ W}$, ceea ce corespunde unei eficiente optice $\eta_{oa}\sim0.45$. Panta eficientei laser a fost $\eta_{sa}=0.47$ [Fig. 23(b)]. Eficienta de absorbtie a radiatiei de pompaj a fost masurata ca fiind $\eta_a=0.86$ pentru $\lambda_p=808 \text{ nm}$ si $\eta_a=0.59$ pentru pompajul la $\lambda_p=880 \text{ nm}$.

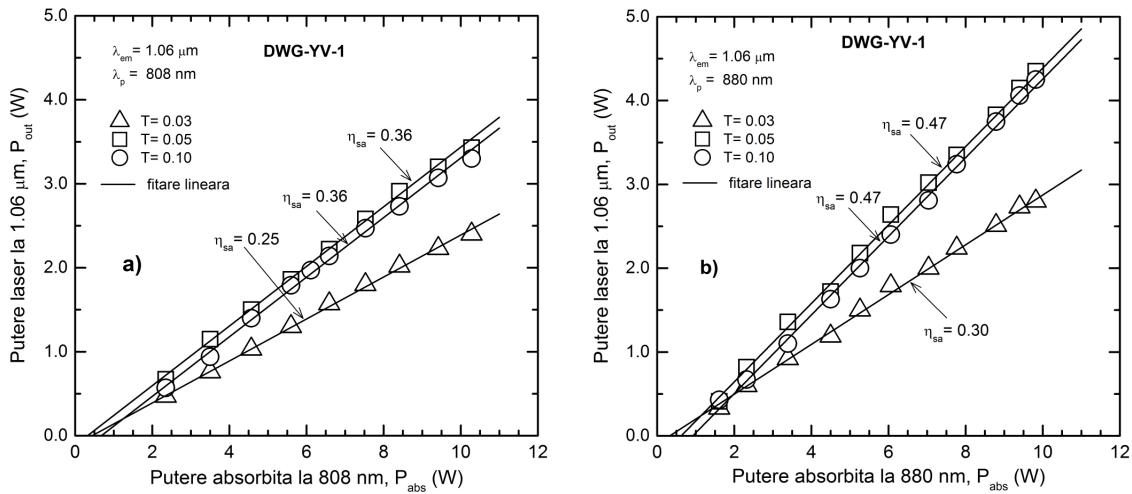


Fig. 23 Puterea laser la $1.06 \mu\text{m}$ emisa de ghidul DWG-YV-1, pentru pompaj la **a)** 808 nm si **b)** 880 nm .

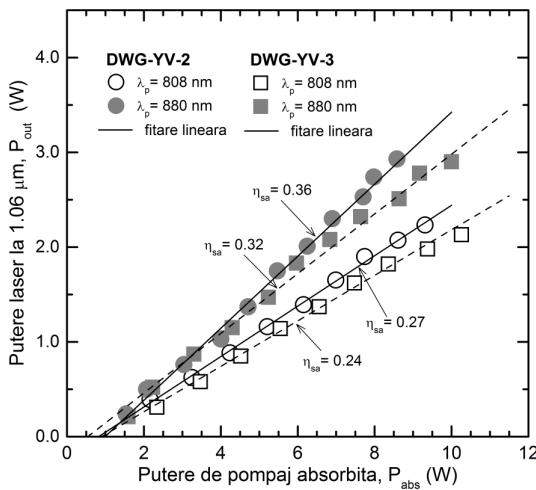


Fig. 24 Puterea laser la $1.06 \mu\text{m}$ obtinuta de la ghidurile DWG-YV-2 si DWG-YV-3 pentru pompajul la 808 nm si 880 nm , oglinda de extractie cu $T=0.05$.

Cele mai bune rezultate pentru emisia la $1.06\text{ }\mu\text{m}$ care au fost obtinute de la ghidurile DWG-YV-2 si DWG-YV-3 sunt prezentate in Fig. 24. Astfel, pentru pompajul la 808 nm ghidul DWG-YV-2 a emis $P_{out}= 2.2\text{ W}$ (pentru $P_{abs}= 93\text{ W}$, $\eta_{oa} \sim 0.24$), cu panta a eficientei de $\eta_{sa}= 0.27$. Puterea laser a crescut la $P_{out}= 2.9\text{ W}$ pentru pompajul la 880 nm cu $P_{abs}= 8.7\text{ W}$ ($\eta_{oa}= 0.33$); in plus, panta eficientei a fost $\eta_{sa}= 0.36$. Ghidul DWG-YV-3 a emis $P_{out}= 2.1\text{ W}$ pentru $P_{abs}= 10.2\text{ W}$ la 808 nm ($\eta_{oa}= 0.21$), iar panta eficientei a fost $\eta_{sa}= 0.24$. Ca si in cazul ghidului DWG-YV-2, pompajul la 880 nm a imbunatatit performantele laser: puterea laser a fost $P_{out}= 2.9\text{ W}$ ($\eta_{oa}= 0.29$) iar panta eficientei de $\eta_{sa}= 0.32$.

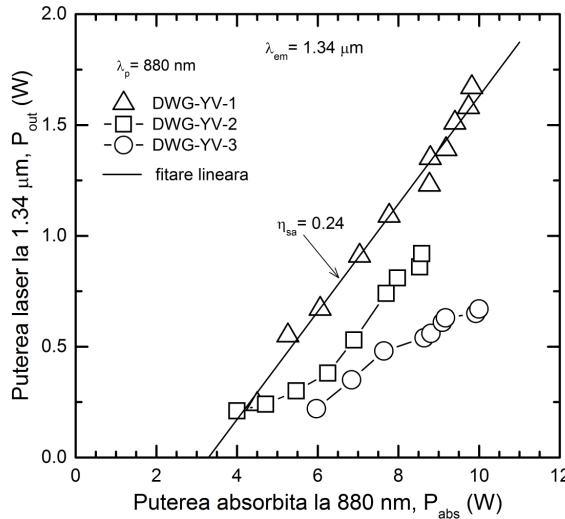


Fig. 25 Puterea laser la $1.34\text{ }\mu\text{m}$ obtinuta de la ghidurile incrisionate in Nd:YVO₄, pentru pompaj optic la 880 nm si oglinda de extractie cu $T= 0.03$.

Emisia laser la $1.34\text{ }\mu\text{m}$ a fost obtinuta in toate ghidurile de unda. Astfel, pentru pompajul la 808 nm , ghidul DWG-YV-1 a emis $P_{out}= 0.95\text{ W}$ for $P_{abs}= 10.3\text{ W}$ (adica eficienta optica de numai $\eta_{oa}= 0.09$); panta eficientei a fost de asemenea scazuta, de numai $\eta_{sa}= 0.11$. Totusi, pentru pompajul la $\lambda_p= 880\text{ nm}$, acelasi ghid a emis puterea $P_{out}= 1.7\text{ W}$ pentru $P_{abs}= 9.8\text{ W}$ ($\eta_{oa} \sim 0.17$), in timp ce panta eficientei laser a fost $\eta_{sa}= 0.24$ (Fig. 25). Puterea obtinuta de la ghidurile realizate in mediile Nd:YVO₄ cu concentratie mai ridicata de Nd, DWG-YV-2 si DWG-YV-3, a fost sub 1 W . In toate aceste experimente, transmisia oglinzii de iesire a fost $T= 0.03$ la $1.34\text{ }\mu\text{m}$. Diferentele intre performantele emisiei laser pentru cele doua lungimi de unda de pompaj au fost explicate pe baza efectelor termice induse in fiecare mediu laser prin pompaj optic.

Rezultatele au fost publicate intr-un articol ISI - Web of Science (Tabel 1, 9) si au fost prezентate doua comunicari la conferinte internationale (Tabel 2, 15 si 16). Mentionam ca sunt disponibile rezultate care vor fi valorificate prin publicare, cu mentionarea finantarii din acest proiect.

7. Cercetari privind Obtinerea de Medii Nd:YAG prin Tehnici Ceramice

In cadrul proiectului s-au facut si cercetari avand ca scop obtinerea de ceramici transparente, in principal Nd:YAG. In raport cu mediile de tip cristalin astfel de materiale policristaline prezinta diferite avantaje, cum ar fi posibilitatea de a fi obtinute la dimensiuni mai mari, utilizarea unor concentratii ridicate ale ionului activ (si astfel posibilitatea de a se realiza laseri de tip miniaturali), realizarea de structuri compozite, sau proprietati termice mai bune.

Prezentam rezultate obtinute in cazul Nd:YAG. Pentru sinteza compozitiilor ceramice 0.5-at.%. Nd:YAG ($\text{Y}_{2.985}\text{Nd}_{0.015}\text{Al}_5\text{O}_{12}$), 1.0-at.% Nd:YAG ($\text{Y}_{2.97}\text{Nd}_{0.03}\text{Al}_5\text{O}_{12}$) si 1.5-at.% Nd:YAG ($\text{Y}_{2.955}\text{Nd}_{0.045}\text{Al}_5\text{O}_{12}$) s-au utilizat materii prime comerciale de puritate ridicata: Al_2O_3 (puritate >99% si dimensiuni ale particulelor de 20 nm), Y_2O_3 (puritate 99.995% si dimensiuni ale particulelor cuprinse intre $50\text{-}70\text{ nm}$) si Nd_2O_3 (cu puritate 99.999% si dimensiuni ale particulelor < 100 nm). Metoda utilizata, "Solid-State Reaction", este prezentata in Fig. 26. Ca aditiv antiaglomerant s-a utilizat polietilenglicol (PEG₄₀₀) si ajutor la sinterizare s-a folosit TEOS in combinatie cu MgO. Suspensiile omogene aferente amestecurilor de $\text{Nd}_x\text{Y}_{3-x}\text{Al}_5\text{O}_{12}$ au fost pulverizate utilizand tehnica "Spray Drying" cu ajutorul unei

instalații de tip BUCHI B-290. Pulberile obținute după pulverizare și uscare au fost pregătite sub formă de pastile cu diametre de 12 mm și grosimi de aprox. 1.5 mm prin presare uniaxială, la o presiune de 10 MPa. Apoi, acestea au fost presate izostatic la rece utilizând tehnica "Cold Isostatic Press - CIP" cu ajutorul unei prese de tip ISOLAB FPG 7680, la o presiune de 245 MPa. Corpurile compacte au fost supuse unui tratament termic de calcinare în aer timp de 6 ore la temperatură de 800°C (rata de încalzire - racire de 5°C/minut) pentru a elimina compusii organici din sistem. Tratamentul termic de sinterizare și densificare a corpuriilor ceramice calcinate s-a facut la temperaturi cuprinse între 1730°C și 1760°C în vid înaintat (4×10^{-6} mbar) timp de 12 ore (rata de încalzire - racire de 10°C/minut). Re-oxidarea speciilor chimice reduse în timpul tratamentului termic de sinterizare în vid s-a facut printr-un tratament termic de recoacere "annealing" în aer, timp de 10 ore la temperatură de 1450°C (rata de încalzire - racire de 5°C/minut).

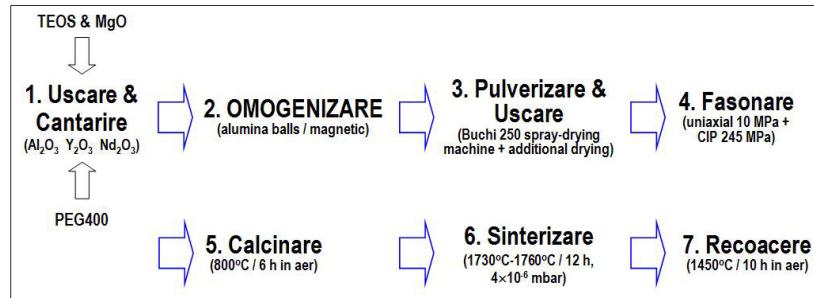


Fig. 26 Principalele etape ale procesului de obținere de Nd:YAG ceramic prin metoda "Solid-State Reaction".

Structura probelor ceramice a fost investigată cu ajutorul unui difractometru de raze X (XRD, model PANalytical Empyrean) în geometrie θ - 2θ (Bragg-Brentano). Morfologia compozitiilor ceramice a fost studiată cu un microscop electronic cu baleaj (SEM, model QUANTA INSPECT F50). Proprietățile optice au fost investigate cu ajutorul tehnicilor de spectroscopie optică.

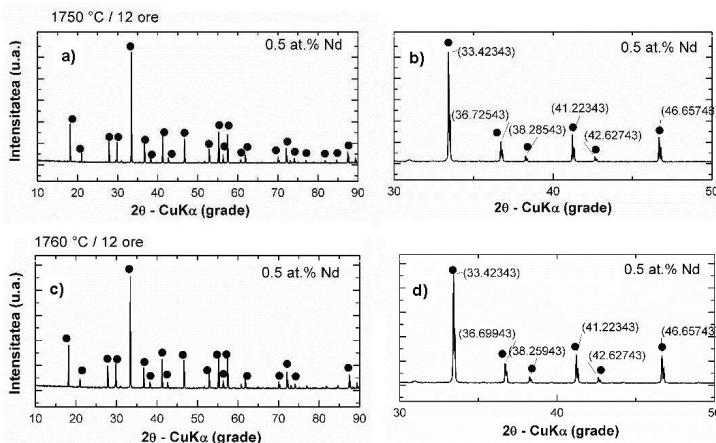


Fig. 27 Difractograme pentru mediul ceramic 0.5-at.% Nd:YAG sinterizat în vid (4×10^{-6} mbar) la temperatura de 1750°C: a) $2\theta = 10^\circ$ - 90° și b) detaliu $2\theta = 30^\circ$ - 50° și la temperatura de 1760°C: c) $2\theta = 10^\circ$ - 90° și d) detaliu $2\theta = 30^\circ$ - 50° .

In Fig. 27 sunt prezentate difractograme ale ceramicii 0.5-at.% Nd:YAG care a fost sinterizata la 1750°C [Fig. 27(a), (b)] și la 1760°C [Fig. 27(c), (d)]. Ceramicile prezintă ca fază unică compusul cu structura cubică $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$. În plus, Fig. 27(b) și Fig. 27(d) arată detalii ale difractogramelor pentru unghiul de difracție $2\theta = 30^\circ$ la 50° . Cele două maxime de difracție (420) și (532) sunt specifice unei structuri cubice monofazice de $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$.

Dupa sinterizare timp de 12 ore intre 1730°C - 1760°C in vid (4×10^{-6} mbar), probele ceramice au fost supuse unui tratament termic de "annealing" in aer, timp de 10 ore, la temperatura de 1450°C. In Fig. 28 sunt arătate micrografii SEM ale mediului ceramic 0.5-at.% Nd:YAG.

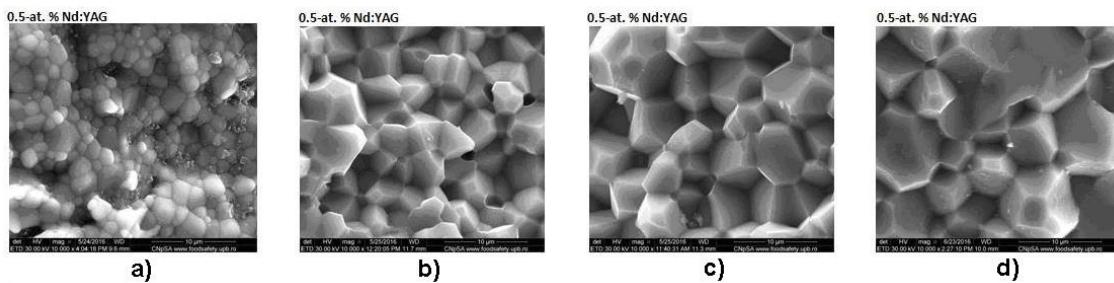


Fig. 28 Imagini SEM ale mediilor ceramice 0.5-at.% Nd:YAG sinterizate timp de 12 ore la diferite temperaturi: a) 1730°C; b) 1740°C; c) 1750°C; d) 1760°C.

Pentru probele sinterizate la 1730°C limitele granulare sunt vizibile și gradul de porozitate inter- și intragranulară este ridicată [(Fig. 28(a)]. Dimensiunile granulelor au valori cuprinse între 1.0 μm - 6.5 μm. În cazul sinterizării la 1740°C, numarul de punți intergranulară este mai mare și granulele cresc în dimensiuni, atingând valori de până la 10 μm. Gradul de porozitate inter- și intragranulară este, în continuare, destul de ridicat. După sinterizarea la 1750°C limitele granulare sunt bine definite și prezintă jonctiuni triple perfecte. Porozitatea reziduală (inter- și intragranulară) este scăzută, iar procesul de densificare se accentuează, granulele atingând valori de până la 12 μm. Mediile ceramice prezintă un aspect lipsit de porozitate. În cazul cresterii temperaturii de sinterizare la 1760°C, mediile ceramice prezintă un aspect lipsit de porozitate, cu limite granulare bine definite și jonctiuni triple perfecte (~120°). Dimensiunile granulelor sunt cuprinse între 2 μm și 14 μm.

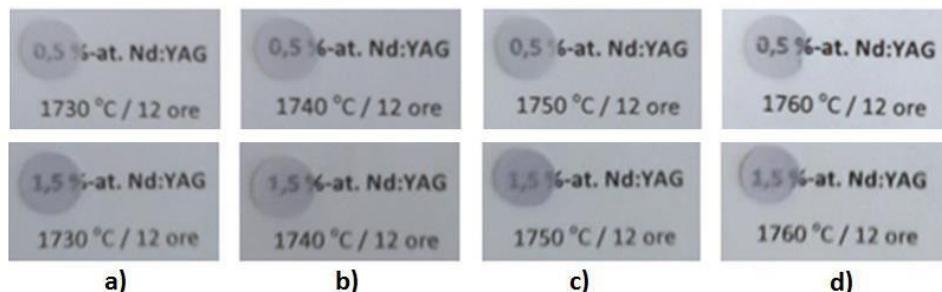


Fig. 29 Fotografii ale mediilor ceramice 0.5-at.% și 1.5-at.% Nd:YAG sinterizate la diferite temperaturi: a) 1730°C; b) 1740°C; c) 1750°C; d) 1760°C.

Probele ceramice au fost slevuite la calitate optică, având o grosime de aprox. 1 mm. În Fig. 29 sunt arătate fotografii ale mediilor ceramice 0.5-at.% și 1.5-at.% Nd:YAG pentru cele patru temperaturi de sinterizare. În continuare, considerăm că sunt sănătate experimentale pentru imbunatatirea proprietăților structurale, morfologice și optice ale materialelor ceramice, prin optimizarea parametrilor tehnologici utilizati la sinteza acestora: optimizarea procesului de omogenizare a amestecului de materii prime, utilizarea de noi aditivi și concentrații a acestora (ex: TEOS+MgO/LiF/La₂O₃), ca ajutor la sinterizare sau identificarea temperaturii optime de sinterizare și durata palierului de tratament termic.

8. Rezultate

Lista cu articolele publicate in timpul proiectului este prezentata in Tabel 1, iar comunicarile la conferinte sunt enumerate in Tabel 2. Mentionam ca avem date experimentale in curs de interpretare, iar publicarea lor se va face cu indicarea acestui proiect ca sursa principala de finantare.

Tabel 1. Lista cu lucrările publicate in reviste ISI – Web Of Science si cu lucrările prezentate la conferinte.

LISTA LUCRARII					
Nr. crt.	Titlu	Autori	Revista, vol. / nr. / pagini / an	Factor de impact	Nr. citari (conform ISI-Web of Science), fara autocitari
1.	Efficient laser emission in diode-pumped Nd:YAG buried waveguides realized by direct femtosecond-laser writing	N. Pavel, G. Salamu, F. Voicu, F. Jipa, M. Zamfirescu, and T. Dascalu	Laser Physics Letters 10 (9), 095802 (2013)	2.946	13
Comentariu: "4. Conclusion: ... To the best of our knowledge this is the first report on laser emission at $1.3\text{ }\mu\text{m}$ from Nd:YAG waveguides realized by a direct fs-laser writing technique, while the laser performances at both 1.06 and $1.3\text{ }\mu\text{m}$ are the highest obtained under pumping with diode lasers.".					
2.	Laser emission in diode-pumped Nd:YAG single-crystal waveguides realized by direct femtosecond-laser writing technique	G. Salamu, F. Voicu, N. Pavel, T. Dascalu, F. Jipa, and M. Zamfirescu	Rom. Reports in Physics 65 (3), 943-953 (2013).	1.12	-
Comentariu: "3. Conclusions: ... Laser action at 946 nm was observed under quasi-cw pumping..".					
3.	Novel laterally pumped by prism laser configuration for compact solid-state lasers	T. Dascalu, G. Salamu, O. Sandu, F. Voicu, and N. Pavel	Laser Physics Letters 10 (5), 055804 (2013)	2.946	-
4.	Laser emission from diode-pumped Nd:YAG ceramic waveguide lasers realized by direct femtosecond-laser writing technique	G. Salamu, F. Jipa, M. Zamfirescu, and N. Pavel	Opt. Express 22 (5), 5177-5182 (2014).	3.488	23
5.	Cladding waveguides realized in Nd:YAG ceramic by direct femtosecond-laser writing with a helical movement technique	G. Salamu, F. Jipa, M. Zamfirescu, and N. Pavel	Opt. Material Express 4 (4), 790-797 (2014)	2.844	13
Comentarii: • "4. Conclusions: ... we have reported the first realization of circular cladding waveguides by helical movement of the laser medium during the direct fs-laser writing process, the direction of translation and the fs-laser beam being parallel". • Aceasta lucrare a fost inclusa de OSA in lista " Optical Materials Express' 15 Most Cited Articles " pe anul 2015.					
6.	Cladding waveguides realized in Nd:YAG laser media by direct writing with a femtosecond-laser beam	N. Pavel, G. Salamu, F. Voicu, F. Jipa, and M. Zamfirescu	Proceedings of the Romanian Academy - Series A: Mathematics, Physics, Technical Sciences, Information Science 15 (2), 151-158 (2014)	1.658	-
7.	Diode-laser pumping into the emitting level for efficient lasing of depressed cladding waveguides realized in Nd:YVO ₄ by the direct femtosecond-laser writing technique	N. Pavel, G. Salamu, F. Jipa, and M. Zamfirescu	Opt. Express 22 (19), 23057-23065 (2014).	3.488	11
Comentariu: "4. Conclusions: ... This is the first report on diode-pumped laser emission in depressed cladding waveguides that were realized in Nd:YVO ₄ by the fs-laser beam writing. Furthermore, the results of this work suggest that the pump with diode lasers directly into the emitting level could be a good solution for realization of efficient waveguide lasers that are inscribed in Nd-vanadate laser media.".					

8.	Watt-Level Output Power Operation from Diode-Laser Pumped Circular Buried Depressed-Cladding Waveguides Inscribed in Nd:YAG by Direct Femtosecond-Laser Writing	G. Salamu, F. Jipa, M. Zamfirescu, and N. Pavel	IEEE Photonics Journal 8 (1), art. 1500209 (2016)	2.177	3
	Comentariu: "4. Conclusions: ... To the best of our knowledge the data reported in this work for both cw and Q-switch operation are the highest for such configurations; these results prove the potential of the waveguides inscribed by the fs-laser beam technique to realize efficient integrated laser sources pumped by fiber-coupled diode lasers.".				
9.	Power scaling from buried depressed-cladding waveguides realized in Nd:YVO ₄ by femtosecond-laser beam writing	G. Salamu and N. Pavel	Opt. & Laser Techn. 84 , 149-154 (2016).	1.879	-
	Comentariu: "3. Conclusions: ... The data reported in this work are the highest output powers obtained to date from waveguides inscribed in Nd:YVO ₄ and show the potential of such configurations to obtain compact, efficient, diode-pumped laser sources.".				

Tabel 2. Lista cu lucrările prezentate la conferințe.

COMUNICARI LA CONFERINTE				
Nr. crt.	Titlu	Autori	Conferinta	Tip prezentare
1.	Efficient, simultaneous dual-wavelength emission at 1.06 and 1.34 μm in Nd:GdVO ₄ laser crystal	N. Pavel, G. Salamu, O. Sandu, A. Ionescu, C. Brandus, F. Voicu, and T. Dascalu	5th EPS-QEOD EUROPHOTON CONFERENCE, Solid State, Fibre, and Waveguide Coherent Light Sources, 26-31 August, 2012, Stockholm, Sweden. Europhysics Conf. Abstract Vol. 36 E; ISBN 9-914771-778-9.	Poster presentation TuP.11
2.	Generation of high-peak power 532-nm green pulses from passively Q-switched, all-poly-crystalline Nd:YAG/Cr ⁴⁺ :YAG ceramics laser	G. Salamu, A. Ionescu, C. Brandus, O. Sandu, N. Pavel, T. Dascalu	• Micro- to Nano-Photonics III, ROMOPTO 2012, 10 th International Conference on Optics, 3-6 September, Bucharest, Romania • Proceeding: Proc. SPIE 8882 , ROMOPTO 2012: Tenth Conference on Optics: Micro- to Nanophotonics III, 888206 (June 10, 2013)	Poster presentation I.P. 5.
	Comentariu: Această lucrare a fost distinsă cu premiul "Certificate of Excellence for First Place Student Presentation" și cu "Best Poster SPIE Award at the ROMOPTO 2012 Conference".			
3.	Direct femtosecond laser written waveguides in Nd:YAG 1	G. Salamu, F. Voicu, F. Jipa, M. Zamfirescu, N. Pavel	Micro- to Nano-Photonics III, ROMOPTO 2012, 10 th International Conference on Optics, 3-6 September, Bucharest, Romania	Poster presentation II.P.
4.	Diode-pumped laser emission in femtosecond-laser inscribed Nd:YAG waveguides	G. Salamu, F. Voicu, N. Pavel, T. Dascalu, F. Jipa, and M. Zamfirescu	International Conference "Modern Laser Applications" Third Edition, INDLAS 2013, 20-24 May 2013, Bran, Romania	Oral presentation O1
5.	Femtosecond-laser inscribed Nd:YAG waveguides. Realization and laser emission	N. Pavel, G. Salamu, F. Voicu, F. Jipa, and M. Zamfirescu	LPHYS'13: 22nd International Laser Physics Workshop, Prague, 15-19 July, 2013	Oral presentation 4.1.3
6.	Laser emission from diode-pumped Nd:YAG waveguides, realized by direct femtosecond-laser writing technique	N. Pavel, G. Salamu, F. Jipa, and M. Zamfirescu	Advanced Solid State Lasers (ASSL) Congress, 27 October - 1 November 2013, Paris, France	Oral presentation ATu2A.6
7.	Laser Emission from Nd:YAG Laser Waveguides Realized by Femtosecond-Laser Writing Techniques	G. Salamu, F. Jipa, M. Zamfirescu, and N. Pavel	• 2014 Photonics Europe SPIE Conference, 14-17 April 2014, Brussels, Belgium • Proceeding SPIE 9135 , Laser Sources and Applications II, 91351F (May 1, 2014).	Oral presentation, paper number: 9135-52
8.	Waveguides Fabricated in Nd:YAG by Direct fs-Laser Writing - Realization and Laser Emission under Diode-Laser Pumping	N. Pavel, G. Salamu, F. Voicu, T. Dascalu, F. Jipa, and M. Zamfirescu	The 14th International Balkan Workshop on Applied Physics, July 2-4, 2014, Constanta, Romania, Book of Abstracts p. 106	Invited presentation S2-L07

9.	Laser emission from diode-pumped Nd:YAG waveguide lasers realized by femtosecond-writing technique	G. Salamu, F. Jipa, M. Zamfirescu, F. Voicu, and N. Pavel	5th International Student Conference on Photonics, Orastie, Romania, 23-26 September 2014	Oral presentation O.02
Comentariu: Această lucrare a primit diploma " Best Oral Presentation - Second Place" la aceasta conferinta.				
10.	Efficient laser emission in diode-pumped Nd:YAG cladding waveguides fabricated by direct writing with a helical movement technique	N. Pavel, G. Salamu, F. Jipa, M. Zamfirescu, F. Voicu, and T. Dascalu	6th EPS-QEOD EUROPHOTON CONFERENCE, Solid State, Fibre, and Waveguide Coherent Light Sources, 24-29 August, 2014, Neuchâtel, Switzerland. Europhysics Conference Abstract Vol. 38 E; ISBN 2-914771-89-4	Poster presentation, TuP-T2-P-02
11.	Efficient Laser Emission under 880-nm Diode-Laser Pumping of Cladding Waveguides Inscribed in Nd:YVO ₄ by Femtosecond-Laser Writing Technique	N. Pavel, G. Salamu, F. Jipa, and M. Zamfirescu	Advanced Solid State Lasers (ASSL) Congress, 16-21 November 2014, Shanghai, China	Poster presentation ATu2A.26
12.	Diode-Pumped Laser Emission from Depressed Cladding Waveguides Inscribed in Nd-doped Media by Femtosecond Laser Writing Technique	G. Salamu, N. Pavel, T. Dascalu, F. Jipa, and M. Zamfirescu	CLEO Europe - EQEC 2015 Conference, 21-25 June 2015, München, Germany	Poster presentation CA-P.29
13.	Efficient Laser Emission from Waveguides Inscribed in Nd-doped Media by Femtosecond-Laser Writing Technique	G. Salamu, F. Voicu, F. Jipa, M. Zamfirescu, T. Dascalu, N. Pavel	"Siegman International School on Lasers: 2015", 02-07 August 2015, Amberg, Germania	Poster presentation
14.	Depressed-cladding waveguides inscribed in Nd:YAG and Nd:YVO ₄ by femtosecond-laser writing technique. Realization and laser emission	N. Pavel, G. Salamu, F. Voicu, O. Grigore, T. Dascalu, F. Jipa, and M. Zamfirescu	ROMOPTO 2015, 11 th International Conference on Optics "Micro- to Nano-Photonics IV", September 1-4, 2015, Bucharest, Romania	Invited presentation I.I.7
15.	Power-scaling from buried depressed-cladding waveguides realized in Nd:YAG and Nd:YVO ₄ by direct writing with a femtosecond-laser beam	G. Salamu, N. Pavel, T. Dascalu, F. Jipa, M. Zamfirescu	The 16 th International Balkan Workshop on Applied Physics, 7-9 July, 2016, Constanta, Romania	Invited presentation, S2 L3 (Book of Abstracts, pp. 77-78)
16.	High-power operation in circular buried depressed-cladding waveguides inscribed in Nd:YAG and Nd:YVO ₄ by femtosecond-laser beam	G. Croitoru, T. Dascalu, F. Jipa, M. Zamfirescu, N. Pavel	7th EPS-QEOD EUROPHOTON CONFERENCE, Solid State, Fibre, and Waveguide Coherent Light Sources, 21-26 August, 2016, Vienna, Austria	Oral presentation FWG-4.4