

RAPORT STIINTIFIC

privind implementarea proiectului in perioada octombrie - decembrie 2011

In ultimele doua decenii, comunitatea stiintifica a manifestat (si manifesta) un interes deosebit pentru laserii de tip ghid de unda [1]. Aceste dispozitive au dimensiuni reduse, iar emisia laser necesita putere scazuta de pompaj la prag, fiind caracterizata de o panta ridicata a eficientei de emisie. In plus, un astfel de laser poate furniza puteri in domeniul sutelor de mW la cativa W, cu o eficienta optica foarte buna, distributia transversala a fascicului fiind de tip Gaussian (sau foarte aproape de aceasta distributie, cu factorul M^2 scazut). Pentru realizarea unui laser de tip de ghid de unda s-au dezvoltat diferite tehnici, acestea fiind bazate pe principiul de a induce o schimbare de indice de refractie in mediul activ (sau la suprafata acestuia). Radiatia de pompaj (cu lungimea de unda, λ_p) este cuplata in ghidul de unda cu ajutorul unui sistem optic adecvat, iar emisia laser se obtine utilizand un rezonator simplu, spre exemplu de tip oglinda HRM (cu reflectivitate de 100% la lungimea de unda a emisiei laser, λ_{em}) si cu oglinda de extractie PRM tot cu suprafata plan. Dintre aceste tehnici amintim: a) difuzia termica de ioni [2]; b) schimb de ioni, folosita mai ales in cazul sticlelor [3]; c) schimb de protoni [4], aceasta fiind utilizata mai ales pentru obtinere de ghiduri de unda in cristale photorefractive, de tip LiNbO_3 ; d) implantarea de ioni/protoni cu fascicule de ioni-protoni [5-7]; scrierea 3D de ghiduri de unda cu fascicul de protoni [8], sau scrierea optica directa, cu ajutorul unui fascicul laser cu lungimea de unda definita, spre exemplu in ultraviolet [9].

Un important aspect al procesului de scriere directa este faptul ca energia fascicului laser incident este absorbita si transferata retelei prin efecte nelinulare, acest proces fiind mult mai rapid decat cel de transfer termic. Rezulta o modificare locala a structurii mediului, care se traduce intr-o schimbare a indicelui de refractie in punctul de focalizare al fascicului incident, fara a afecta zonele vecine. In cazul in care se foloseste un fascicul laser cu durata scurta (de ordinul femtosecundelor, fs), iar mediul este o sticla, are loc topirea si re-solidificarea zonei iradiate. Volumul respectiv se contracta, indicele de refractie creste, de obicei obtinandu-se variatii ale indicelui de refractie in domeniul 10^{-2} la 10^{-3} . In cazul cristalelor laser, focalizarea fascicului fs conduce la o crestere locala a volumului iradiat, iar densitatea mediului cat si indicele de refractie scad. Ghidarea luminii in astfel de structuri se face pe suprafata dintre zona iradiata si cea ne-iradiata, unde se observa o crestere a indicelui de refractie de ordinul 10^{-3} , din cauza expansiunii zonei care este prelucrata.

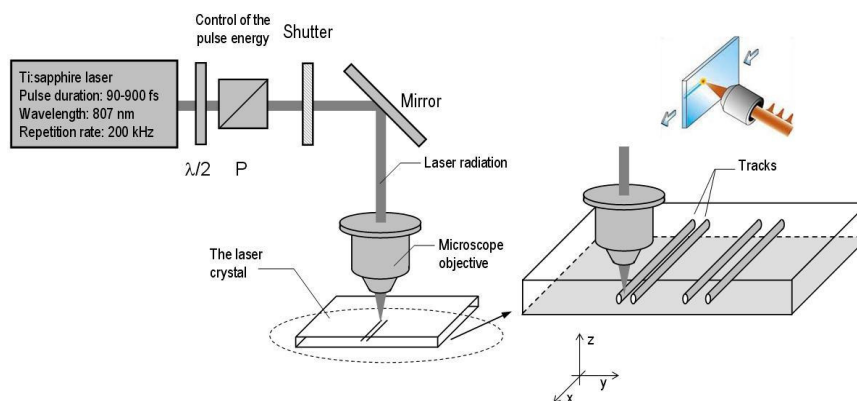


Fig. 1 Montaj experimental folosit pentru fabricarea de ghiduri de unda in medii laser prin scriere directa cu laser Ti:safir. P: polarizor; $\lambda/2$ = lama 'jumătate de unda'.

Un montaj experimental, care poate fi folosit pentru scrierea de ghiduri de unda intr-un cristal laser, este prezentat in Fig. 1. Astfel, un laser Ti:safir livreaza un fascicul laser cu durata pulsurilor de

ordinul zeci la sute de fs, cu lungimea de unda dorita (de obicei la 0.8 μm) si cu rata de repetitie de ordinul zeci la sute de kHz. Acest fascicul este directionat spre cristallul laser cu ajutorul unei oglinzi (Mirror), fiind focalizat cu un obiectiv microscopic (cu apertura numerica, NA). Focalizarea se face sub suprafata mediului laser, iar energia fasciculului incident este modificata (si astfel aleasa la valoarea care induce schimbari ale indicelui de refractie in mediul activ) cu un sistem optic format (in general) dintr-o lama optica 'jumata de unda' ($\lambda/2$) si un polarizor, P. Un sistem optic sau mecanic (Shutter) poate fi utilizat pentru a bloca total fasciculul de la laserul Ti:safir.

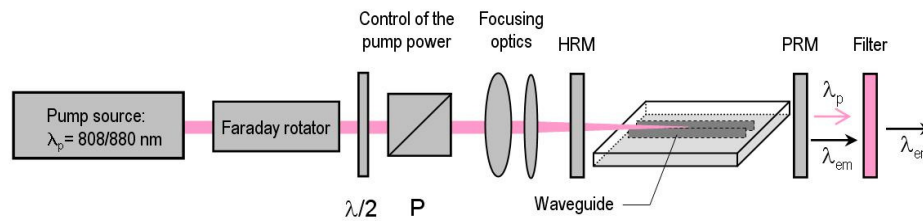


Fig. 2 Montaj experimental folosit pentru caracterizarea emisiei obtinute de la un laser de tip ghid de unda. λ_p = lungimea de unda de pompaj; λ_{em} = lungimea de unda a emisiei laser; HRM: oglinda cu reflectivitatea 100% la λ_{em} ; PRM: oglinda de extractie.

Investigarea performantelor care se obtin de la un laser de tip ghid de unda, realizat prin metoda scrierii directe, se poate face utilizand un montaj experimental, apropiat de cel aratat in Fig. 2. Sursa de pompaj este (de obicei) un laser Ti:safir cu emisie in regim continuu, cu lungimea de unda (λ_p) aleasa corespunzator mediului laser investigat. Ca sursa de pompaj se poate folosi si o dioda laser cuplata la fibra optica. Puterea de pompaj incidenta pe waveguide se poate schimba cu acelasi sistem optic (lama $\lambda/2$ si P), in cazul laserului Ti:safir, sau prin schimbarea curentului de alimentare in cazul diodei laser. Radiatia de pompaj este cuplata in ghidul de unda cu ajutorul unei optici adecvate (Focusing optics). Rezonatorul laser este format intre oglinda HRM si oglinda de extractie PRM; deoarece ghidul de unda nu este acoperit antireflex, chiar suprafata din dreapta a ghidului poate actiona ca oglinda de extractie. Pe de alta parte, daca nu se utilizeaza oglinda HRM, emisia laser poate avea loc in ambele directii. In acest caz este indicata utilizarea unui izolator optic (Faraday rotator; Fig. 2), care va proteja sursa de pompaj de radiatia laser emisa in directia respectiva.

In anul 2007 au fost realizate ghiduri de unda in mediul 2.0-at.% Nd:YAG de tip ceramic [10]. Laserul Ti:safir a furnizat pulsuri laser cu durata de 120 fs, energie maxima pe puls de 0.9 mJ, rata de repetitie de 1 kHz, la lungimea de unda de 796 nm. Focalizarea in Nd:YAG s-a facut cu un obiectiv de microscop cu NA= 0.3. Pentru o fluenta laser de 4 J/cm² s-au obtinut canale in Nd:YAG cu adancimea de 3.6 μm . Fluenta laser de prag (pentru obtinerea de ghiduri de unda) a fost determinata ca fiind 1.8 J/cm². Nu au fost raportate rezultate privind emisia laser, insa pierderile de propagare, la 660 nm, au fost masurate ca fiind ~1 dB/cm. Tot in anul 2008, acelasi grup de autori demonstreaza emisie laser de la un laser ghid de unda 2.0-at.% Nd:YAG de tip ceramic [11]. Puterea de pompaj absorbita la prag a fost de 68 mW (λ_p = 748 nm), panta emisiei laser a fost de 0.60, obtinandu-se o putere laser de 80 mW la λ_{em} = 1.06 μm pentru o putere de pompaj de ~200 mW. Ghiduri de unda in mediul Nd:YAG de tip cristal au fost realizate in anul 2009, folosind pentru 'scriere' un sistem laser Clark-MRX CPA-2010, cu lungimea de unda de 775 nm, durata pulsurilor de 140 fs, energia maxima pe puls de 1 mJ si rata de repetitie de 1 kHz. Emisia laser la 1.06 μm a avut pragul de ~78 mW, panta eficientei a fost de 0.23, obtinandu-se 25.5 mW pentru o putere de pompaj de 261 mW. Relativ recent, in anul 2010 [13], acelasi grup de cercetare de la Universitatea din Hamburg au demonstrat un laser ghid de unda Nd:YAG (de tip cristal), cu puterea maxima de 1.29 W pentru putere de pompaj de 2.25 W (eficienta de cuplaj de ~70%); pragul emisie laser a fost de 63 mW, iar panta eficientei laser a fost de 0.59.

Lasere de tip ghid de unda realizati prin tehnica scrierii directe au fost obtinuti si in medii laser Nd-vanadati. Astfel, s-a demonstrat emisie laser la 1.06 μm cu panta a eficientei de 0.70 in mediul

Nd:GdVO₄ (1.0-at.% Nd) [14]. Pragul emisiei laser a fost de ~170 mW, obtinandu-se putere laser de 256 mW pentru o putere de pompaj la 808 nm de 569 mW. Laseri de tip ghid de unda au fost obtinuti si in mediul Nd:YVO₄ [15, 16]. Astfel, o putere laser la 1.06 μm de 254 mW a fost masurata la o putere absorbita intr-un ghid de unda realizat intr-un cristal 1.0-at.% Nd:YVO₄ de 434 mW. Puterea de pompaj la prag a fost de 34 mW, iar panta eficientei a fost de 0.65. Rezultatele mentionate anterior sunt aratate in Fig. 3.

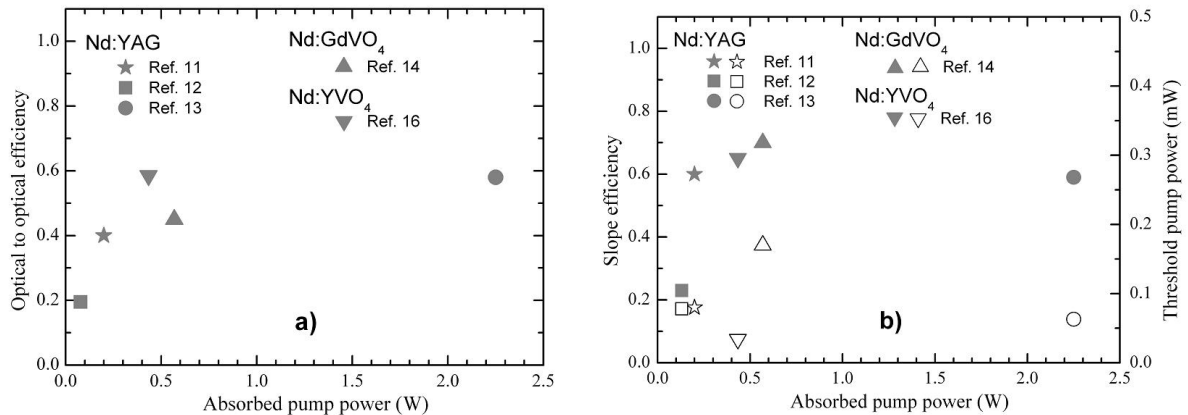


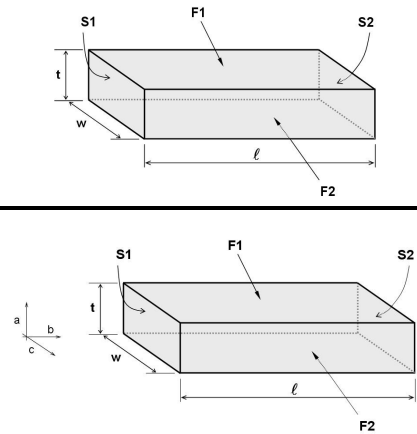
Fig. 3 Performantele emisiei laser obtinute de la laser de tip ghid de unda realizati prin tehnica scrierii directe. **a)** Eficienta optica pentru puterea maxima de pompaj (adica puterea maxima laser); **b)** Panta eficientei laser (semnele gri) si puterea de pompaj la prag (semnele goale).

Mentionam ca, recent, s-a demonstrat emisie laser simultan la doua (1.06 μm si 1.34 μm) lungimi de unda intr-un laser ghid de unda Nd:YVO₄ [17]. In plus, laseri de acest tip s-au realizat prin scriere directa si in alte medii active, cum ar fi Nd:Gd₃Ga₅O₁₂ (Nd:GGG) [18], Pr:YLiF₄ [19], sau chiar Yb:YAG de tip ceramic [20] si de tip cristal, folosind (de aceasta data) si pompajul cu diode laser [21].

In vederea stabilirii conditiilor pe care trebuie sa le indeplineasca fasciculul laser (energia pulsului, durata acestuia, rata de repetitie, sau modul de focalizare) pentru inducerea de schimbari in indicele de refractie si pentru realizarea ghidurilor de unda, am stabilit sa folosim in experimente mediile active enumerate in Tabelul 1.

Tabelul I Mediile active Nd:YAG, Nd:YVO₄ si Nd:GdVO₄ care vor fi folosite, in etapa urmatoare, pentru obtinerea de laseri de tip ghid de unda prin metoda scrierii directe.

Mediul laser	Caracteristici	
	Nd (at.%)	Dimensiuni (w×t×ℓ, mm ³)
Nd:YAG ([111]-cut)	0.7	6×3×5 6×3×8
Nd:YVO ₄ (a-cut)	0.5	6×3×5 6×3×8
	1.0	6×3×4
Nd:GdVO ₄ (a-cut)	0.5	6×3×5
	1.0	6×3×4



Scrierea ghidurilor de unda se va face cu o instalatie ce foloseste un sistem laser amplificat (Clark CPA-2101), ce emite pulsuri optice ultracurte (200 fs) cu lungimea de unda centrala 775 nm, frecventa de repetitie 2 kHz si energia maxima pe puls de 600 μJ. Energia fasciculului laser incident

pe proba este reglata cu ajutorul unei lame $\lambda/2$, plasata in fata unui polarizor Glan. Componentele principale ale statiei de lucru, care este prezentata in Fig. 4, pentru scriere directa cu laserul sunt: a) componentele optice de directionare si focalizare a fascicului laser; b) translatiile cu precizie micrometrica; c) sistemul de vizualizare a zonei de lucru folosind camera CCD si d) software pentru controlul translatiilor micrometrice, intensitatii laserului si focalizarii fascicului pe proba.

Pentru realizarea structurilor prin scriere directa laser, proba e translata cu ajutorul unui sistem mecanic de mare precizie controlat de calculator folosind un sistem piezoelectric ce ofera precizie nanometrica si stabilitate mecanica, sau de un sistem cu motoare pas cu pas cu precizie submicronica si deplasare pe distante de mai multi milimetri. Dimensiunea redusa a spotului laser se obtine folosind obiective de microscop cu marire mare. Alegerea obiectivelor se face tinand cont de distanta de lucru si apertura numerica. Pentru procesarea materialelor transparente sunt folosite obiective cu distanta de lucru mare, de ordinul a cativa milimetrii pentru a permite focalizarea radiatiei laser in volumul materialului transparent. Sistemul de procesare are componentele opticii de focalizare a fascicului laser fixe, procesarea materialelor realizandu-se prin deplasarea probei cu ajutorul translatiei. Avantajul sistemului de procesare laser prin deplasarea probei si mentinerea fixa a fascicului laser consta in precizia de procesare care poate fi de ordinul micrometrului sau chiar mai jos, in functie de caracteristicile sistemului mecanic de translatie. Dezavantajul este dat de viteza mica de scanare care, pentru a pastra precizia de prelucrare, nu poate fi mai mare de 1-2 mm/s.

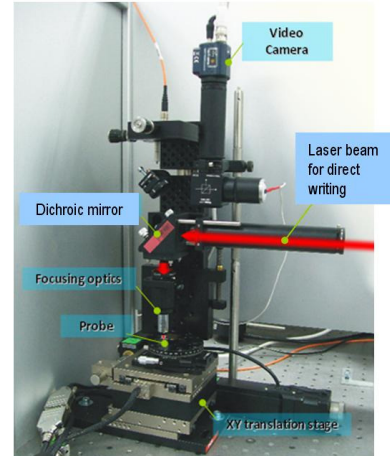


Fig. 4 Statie de lucru pentru scriere directa cu laserul.

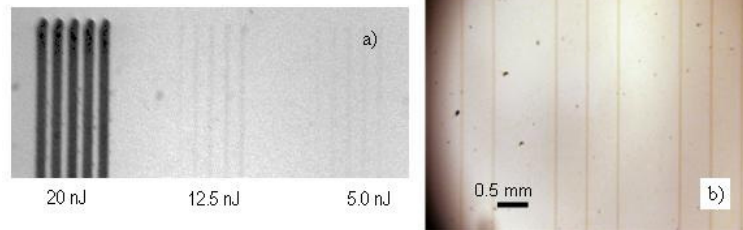


Fig. 5 a) Imagine de microscop a unei probei de sticla iradiate cu laserul fs la diferite energii laser. b) Structuri realizate in volumul sticlei.

Sistemul de scanare laser este un sistem mecanic complex, monobloc, pentru a evita eventualele jocuri mecanice ce ar putea sa apara atunci cand sunt folosite monturi si translatii clasice pentru cele trei directii. Masa de translatie XY (LNR50SEK2-ThorLabs) este echipata cu motoare pas cu pas ce asigura o gama de deplasare de $50 \times 50 \text{ mm}^2$ si precizia de $0.4 \mu\text{m}$. Translatiile sunt controlate de dispozitive electrice de control, conectate la calculator prin port USB. Parametrii de pozitionare X-Y si viteza de deplasare sunt controlati prin intermediul unui software specializat bazat pe biblioteci de tip ActivX, oferite de producator, ce pot fi cu usurinta integrate in programe scrise in limbaje C, LabView, MatLab, etc. Software-ul sistemului APT (Advances Positioning Technologies) este implementat ca o colectie de biblioteci ActiveX, independente de limbajul de programare folosit de utilizator, ce permite dezvoltarea propriei aplicatii si interfete grafice scrise de programator in oricare dintre limbajele de programare comune precum LabView, Visual Basic and Visual C++. Software-ul cuprinde atat

algoritmi de deplasare a probei dedicati scrierii de geometrii complexe cat si algoritmi de autofocalizare si de corectie a planeitatii probei, permitand o automatizare completa a procesului de scriere cu laserul. Acesta are capacitatea de a controla simultan translatiile pe cele trei directii, viteza lor de deplasare, sau obturatorul fascicolului laser. Prin intermediul camerei CCD se vizualizeaza in timp real procedura de scriere.

Capabilitatea sistemului de scriere cu laserul fs a unei structuri tip ghid de unda a fost testata, pentru inceput, in volumul unei sticle de dimensiune $18 \times 18 \times 0.5 \text{ mm}^3$. Pentru focalizare s-a utilizat un obiectiv de microscop 100x cu apertura numerica $NA = 0.5$ si distanta de lucru de 12 mm. S-a realizat un set de 3 grupe de linii cu lungimea de 1 mm, viteza de scriere de 1mm/s si distanta intre grupe de 0.5 mm. Fiecare grupa de linii cuprinde cite 5 linii, la o distanta intre ele de 100 μm . O imagine de miscroscopie optica a structurii create este aratat in Fig. 5a. Prima structura din stanga a fost realizata folosind o energie laser de 20 nJ (0.28 J/cm^2), urmatoarea grupa de linii cu energia de 12.5 nJ (0.17 J/cm^2), iar ultima cu energia de 5nJ (0.07 J/cm^2). In urma masuratorilor de profilometrie a rezultat ca la energia de 20 nJ si la o focalizare a fascicolului laser pe suprafata probei, s-a produs ablatia materialului obtinandu-se canale. Astfel, folosind pulsuri laser cu energia de pana la 20 nJ, se poate induce o modificare a indicelui de refractie necesara obtinerii structurii ghid de unda. Pentru realizarea acestor structuri s-au trasat in volumul sticlei prin absorbtia neliniara a radiatiei laser, linii de lungime 17 mm, cu o distanta intre linii de 0.5 mm si o viteza de scriere de 1 mm/s (Fig. 5b). Aceste date preliminare vor fi utilizate in etapa urmatoare a proiectului.

Bibliografie

1. C. Grivas, Progress in Quantum Electronics, **35** (6), 159 (2011).
2. R.V. Schmidt and I.P. Kaminov, Appl. Phys. Lett. **25** (8), 458 (1974).
3. T. Izawa and H. Nakagome, Appl. Phys. Lett. **21** (12), 584 (1971).
4. J.L.Jackel, C.E.Rice, and J.J.Veselka, Appl. Phys. Lett. **41** (7), 607 (1982).
5. F. Chen, J. Appl. Phys. **106** (8) 081101 (2009).
6. S.J. Field, D.C. Hanna, A.C. Large, D.P. Shepherd, A.C. Tropper, P.J. Chandler, P.D. Townsend, and L. Zhang, Electron Lett. **27**, 2375 (1991).
7. M.E.Sanchez-Morales,G.V.Vazquez, E.B.Mejia, H.Marquez, J.Rickards, R. Trejo-Luna, Appl.Phys.B **94** (2), 215 (2009).
8. Y. Yao, Y. Tan, N. Dong, F.Chen, and A.A. Bettiol, Opt. Express **18** (24), 24516 (2010).
9. V. Mizrahi, P.J. Lemaire, T. Erdogan, W.A. Reed, D.J. DiGiovanni, R.M. Atkins, Appl. Phys. Lett. **63** (13), 1727 (1993).
10. A.T. Gustavo, F.M. Pablo, A. Rodenas, D. Jaque, C. Mendez, L. Roso, Optics Express, **15** (20), 13266 (2007).
11. G.A. Torchia, A. Rodenas, A. Benayas, E. Cantelar, L. Roso, and D. Jaque, Appl. Phys. Lett., **92**, 111103 (2008).
12. J. Siebenmorgen, K. Petermann, G. Huber, K. Rademaker, S. Nolte, A. Tunnermann, Appl. Phys. B, **97** (2), 251 (2009).
13. T. Calmano, J. Siebenmorgen, O. Hellmig, K. Petermann, and G. Huber, Appl. Phys. B, **100** (1), 131 (2010).
14. Y. Tan, A. Rodenas, F. Chen, R. R. Thomson, A. K. Kar, D, Jaque, and Q. Lu, Opt. Express, **18** (24), 24994 (2010).
15. Y. Tan, f. Chen, J. R. Vazquez de Aldana, G. A. Torchia, A. Benayas, D. Jaque, Appl. Phys. Lett., **97**, 031119 (2010).
16. Y. Tan, F. Chen, J. R. Vazquez de Aldana, G.A. Torchia, A. Benayas, D. Jaque, in Advanced Solid-State Photonics, Advanced in Optical Materials, Fiber Laser Applications, High-Intensity Lasers and High-Field Phenomena (ASSP/AIOM/FILAS/HILAS), (Optical Society of America, Washington, DC, 2011), presentation AIFB4.
17. Y. Tan, Y. Jia, J. R. Vazquez de Aldana, D. Jaque, J. Opt. Soc. Am. B, **28** (7), 1607 (2011).
18. C. Zhang, N. Dong, J. Yang, F. Chen, J. R. Vazquez de Aldana, and Q. Lu, Opt. Express, **19** (13), 12503 (2011).
19. D. Beckmann, D. Esser, J. Gottmann, Appl. Phys. B, **104** (3), 619 (2011).
20. T. Calmano, A. G. Paschke, J. Siebenmorgen, S. T. Fredrich-Thornton, K. Petermann, and G. Huber, Appl. Phys. B, **103** (1), 1 (2011).
21. T. Calmano, J. Siebenmorgen, A. G. Paschke, C. Fiebig, K. Paschke, G. Erbert, K. Petermann, G. Huber, Opt. Mat. Express, **1** (3), 428 (2011).