

UNIVERSITATEA DIN
BUCUREȘTI
— VIRTUTE ET SAPIENTIA —

Teză de doctorat
Investigarea reducerii duratei de puls și creșterea
intensității pentru sistemele laser de clasă Petawatt

Rezumat

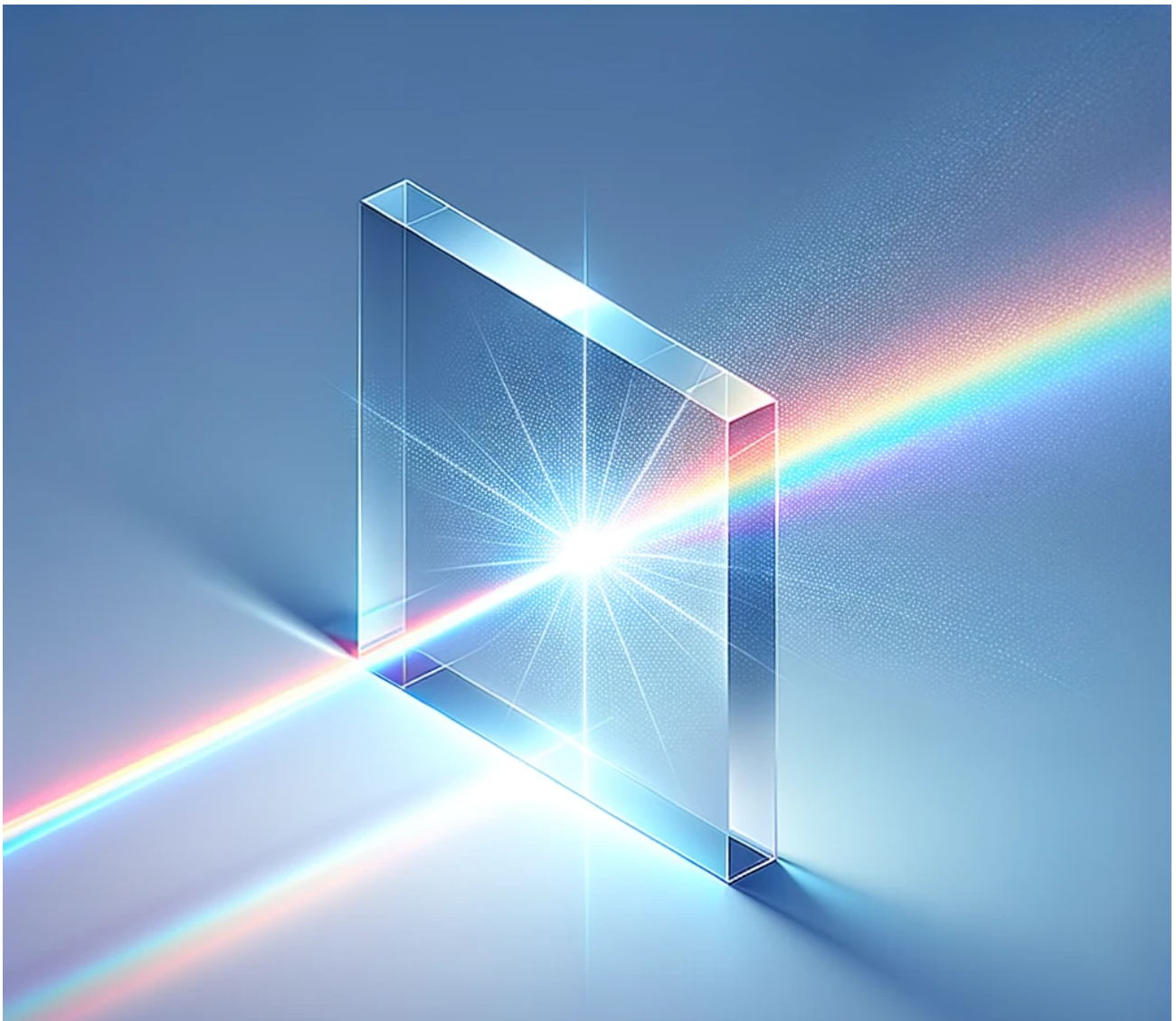
Institut Polytechnique de Paris și Universitatea din București
București, România, 2023

PETRIȘOR GABRIEL BLEOTU

Coordonatori :

Dr. Habil. Daniel Ursescu

Dr. Julien Fuchs



Cuprins

1	Introducere	1
1.1	Sisteme laser de mare energie și de mare putere	2
1.2	Lărgirea spectrală și post-compresia pulsurilor laser	2
1.3	Post-compresia pulsurilor laser de mare energie	4
1.4	Metoda de compresie: Thin film compression (TFC)	5
1.5	Conținutul tezei	6
2	Capitolul II Dispersia și automodularea de fază	13
2.1	Publicații	15
3	Capitolul III Materiale optice pentru post-compresie	19
3.1	Materiale optice folosite pentru lărgirea spectrală	20
3.2	Montajul experimental	20
3.3	Discuții	22
3.4	Publicații	24
4	Capitolul IV Experimente de post-compresie	27
4.1	Experimentul de la facilitatea ELFIE	28
4.2	Experimentul de la facilitatea Apollon	30
4.3	Discuții	31
4.4	Publicații	32
5	Concluzii	37
5.1	Lista lucrărilor publicate	39
5.1.1	Publicații cotate ISI	39
5.1.2	Proceedings	39
5.1.3	Conferințe internaționale	40
5.1.4	Patente	41

CAPITOLUL 1

Introducere

Motivația acestei teze are la bază dezvoltarea sistemelor laser de mare energie sau cu putere de vârf mare, pentru a deschide calea către o înțelegere mai bună a fizicii fundamentale, genezei universului, proprietăților vidului cuantic, științei materialelor etc. În urmărirea acestor aplicații, un obiectiv major constă în creșterea puterii de vârf a pulsurilor actualelor sisteme laser dezvoltate în întreaga lume (de exemplu, ELI, LULI, Apollon, SULF, XCELS...). Post-compresia actualelor pulsurilor de ordinul femtosecundelor (fs) către limita fundamentală a unui singur ciclu de oscilație a fost propusă ca o scurtătură pentru transformarea sistemelor laser de ordinul terawatt (TW) în sisteme laser de ordinul petawatt (PW) [1].

Post-compresia reprezintă o metodă eficientă și rentabilă de creștere a puterii maxime a pulsului ca alternativă a utilizării unei etape suplimentare de amplificare. Pentru a obține cele mai scurte durate ale pulsurilor este necesară trecerea la lungimi de undă mai scurte în ultraviolet și raze X, însă provocarea reală constă în generarea acestor pulsuri la facilitățile laser moderne de astăzi [2]. Realizarea acestei etape va deschide un domeniu complet nou de fizică fundamentală și aplicată prin generarea de pulsuri cu puteri de ordinul Exawatt, cu durate extrem de scurte, de exemplu sub-attosecunde.

Cu toate că au fost propuse multiple soluții pentru îmbunătățirea puterii maxime a pulsurilor, cum ar fi combinarea coerentă [3], amplificarea în plasmă [4, 5], post-compresia sau post-compresia combinată cu amplificarea nonlineară [6, 7, 8, 9], problema generării de pulsuri laser cu durate de câteva cicluri de oscilație la nivel de petawatt (PW) nu a fost rezolvată până în prezent.

Această teză investighează o metodă de post-compresie care se bazează pe controlul atent al auto-modulației fazei folosite aici pentru a crește lățimea de bandă a pulsului laser, precum și controlul dispersiei de ordinul II (GDD) necesar pentru pulsurile cu lățime de bandă largă. Metoda propusă (compresia cu film subțire [1]) reprezintă cea mai fiabilă cale de a obține durate ale pulsurilor sub 10 fs pentru sistemele laser de mare putere existente, atât pentru cele de ordinul petawatt (PW), cât și pentru cele de ordinul a 10 PW [10, 11]. Accentul acestui studiu va fi pus pe explorarea interacției dintre pulsurile laser de mare intensitate cu medii subțiri și transparente, cu scopul generării de pulsuri ultra-scurte, aproape de un singur ciclu de oscilație. Este necesară o caracterizare completă a acestor materiale pentru a le alege pe cele mai potrivite. În această teză, voi prezenta rezultatele obținute cu ajutorul tehnicii de post-compresie aplicate la patru facilități laser de mare putere diferite.

Context

Această teză a fost redactată în limba engleză iar acest rezumat cuprinde doar cele mai importante concluzii ale fiecărui capitol.

1.1 Sisteme laser de mare energie și de mare putere

Majoritatea sistemelor laser de mare energie se bazează pe medii de amplificare precum Nd:Sticlă, în primul rând datorită capacității lor de a stoca cantități semnificative de energie. Cu toate acestea, acești amplificatori au anumite limite care trebuie luate în considerare. Una dintre dezavantaje este dimensiunea lor relativ mare, ceea ce poate genera provocări referitoare la structura sistemului și implementarea practică. În plus, rata de repetiție redusă a laserelor de tip Nd:Sticlă se datorează efectelor termice care necesită un timp semnificativ de răcire între două pulsuri laser succesive.

De exemplu, la NIF, există zile în care se efectuează doar câteva pulsuri pe zi din cauza timpului necesar pentru amplificare sau schimbarea țintei.

Mecanismul de pompaj pentru laserele Nd:Sticlă implică în mod obișnuit utilizarea lampilor cu flash, care furnizează energia necesară pentru a excita mediul de amplificare și a iniția procesul de amplificare. Această metodă de pompaj a fost larg utilizată în diverse sisteme laser de mare energie.

Pe de altă parte, laserele PW bazate pe Ti:Safir vin cu avantaje precum dimensiuni relativ mici, rată mare de repetiție (0,1-10 Hz), lărgime de bandă care suportă 30 fs. Pomparea se realizează cu ajutorul laserelor Nd:Sticlă sau Nd:YAG dublate în frecvență ($2\omega / 532 \text{ nm}$).

Un aspect important este abordat în Figura 1.1, în care devine evident faptul că, deși puterea de vârf a majorității laserelor se încadrează în intervalul de la 1 TW la 1 PW, puterea medie de vârf a acestora rămâne în mod tipic la scala Watt (W). Principalele aplicații ale acestor sisteme laser sunt legate de concepte de fuziune cu laser, generarea de armonici înalte (HHG), accelerarea particulelor și aplicații medicale.

Îmbunătățiri precum controlul activ al fazei spectrale cu feedback, adoptarea unei geometrii de comprimare dublă (Diocles), utilizarea rețelelor de difracție mari (NIF), integrarea laserelor de pompaj de mare energie (de exemplu, Atlas 100 @ HERCULES, ELI-NP), eliminarea telescoapelor bazate pe lentile (TEXAS PW), îmbunătățirea contrastului prin tehnici cu undă polarizată încrucișată (XPW) (așa cum se vede la Scarlet, ELI-NP), introducerea unei oglinzi de plasmă înainte de țintă (GEKKO XII) și folosirea a două oglinzi de plasmă (CoReLS) au fost toate implementate la diferite facilități ca parte a inițiativelor de modernizare.

Tabelul 1.1 prezintă câteva exemple de sisteme laser de mare putere bazate pe amplificatoare Nd:Sticlă și Ti:Safir, evidențiind specificațiile lor legate de energie și puterea de vârf.

1.2 Lărgirea spectrală și post-compresia pulsurilor laser

Pentru a scurta durata pulsului, este necesară o lărgire semnificativă a spectrului, controlul fazei spectrale pe întregul spectru și o metodă eficientă de re-compresie.

Primele pulsuri sub 10 fs au fost generate prin auto-modulația fazei (SPM) (1 MW, 8 fs, 5 KHz) în fibre cu miez solid, urmate de compresia pulsurilor folosind oglinzi cu derivă de frecvență rezultate [15].

Amplificatoare pe bază de Nd:Sticlă					
Categoria Sub-kJ		Categoria kJ		Categoria MJ	
Gekko-XII, Japan (2004)	0.42	OMEGA EP, USA (2006)	2.60	NIF, USA (192 beams) (2018)	1.8
Titan, USA (2006)	0.30	PETAL, France (2008)	3.50	LMJ, France (176 beams) (2017)	1.4
SG-II-U, SIOM, China (2008)	0.15	LFEX, Japan (2012)	10.00	VNIIED*, Russia (192 beams)	2.8
Z-Petawatt, USA (2008)	0.50	NIF-ARC, USA (2015)	13.60	Shenguang-IV* (48 beams)	0.2
Texas Petawatt, USA (2010)	0.17	Vulcan 2020*, UK (6 beams)	2.00		
PHELIX, Germany (2010)	0.40	L4*, Czech Republic (2019)	1.50		
Orion AWE, UK (2013)	0.50	SG-II, China (2018)	6.00		
Amplificare pe bază de Ti:Safir					
Categoria Sub-PW		Categoria PW		Categoria 10 PW	
J-KAREN, Japan (2003)	0.85	ELI-NP, Romania (2022)	1.00	ELI-NP, Romania (2022)	
HERCULES, USA (2004)	0.30	BELLA, USA (2018)	1.30	SULF*, China (2018)	
SILEX-I, China (2005)	0.27	XL-III, China (2018)	1.20	Apollon*, France (2019)	
Astra-Gemini, UK (2009)	0.50	Apollon, France (2018)	1.00	PEARLX*, Russia	
CETAL*, Romania (2010)	0.70	VEGA, Spain (2018)	1.00	> 10 PW	
Scarlet, USA (2018)	0.40	J-KAREN-P*, Japan (2018)	1.00	ELI-NP, Romania	10.2
Diocles*, USA (2012)	0.70	Shengguang, China (2013)	2.00	Vulcan 2020*, UK	
LOA, France (2018)	0.50	CoReLS, S. Korea (2021)	4.20	LLP*, China	
XingGuang-III, China (2018)	0.70	ELI-BL, Czech Rep. (2019)	1.00	EPOCH*	
J-KAREN-P*, Japan (2019)	0.30	ELI-ALPS, Hungary (2018)	2.00		
SACLA, Japan (2019)	0.50	Vulcan PW*, UK (2018)	1.00		
Scapa, UK (2018)	0.35	ILE, Japan (2018)	2.00		
TIFR, India (2019)	0.15	PEneLOPE, Germany (2018)	1.00		
* indică faptul că facilitatea propune o modernizare la valoarea menționată sau funcționează la o putere mai mică. Anul reprezintă ultima actualizare extrasă din recenzii. [12, 13, 14] și sursa: https://www.easymapmaker.com/map/ICUIL_World_Map_v3					

Tabela 1.1: Sistemele laser de mare putere bazate pe amplificatoare Nd:Sticlă și Ti:Safir din întreaga lume. Numerele de lângă numele facilității reprezintă energia pulsului corespunzător (kJ/MJ) și puterea de vârf în PW, respectiv.

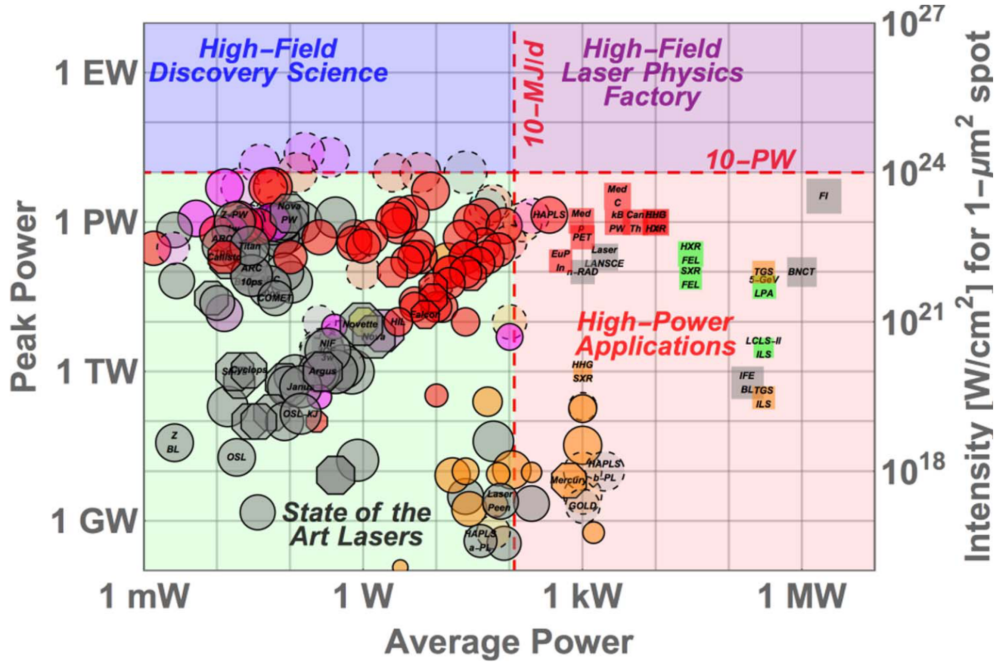


Figura 1.1: Puterea de vârf vs. puterea medie a actualelor lasere de mare putere. Figură extrasă din Ref. [13]

Lărgirea spectrală eficientă a fost obținută prin efectul SPM în fibre [16], în fibre cu miez gol umplute cu gaze precum Kripton, Argon [17], cristale neliniare [18, 19], sticlă [8, 20] și, cel mai recent, în materiale plastice [1, 21, 22, 23, 24].

Post-compresia s-a mai realizat utilizând oglinda deformabilă ($\tau_{out} = 15$ fs) [25], modelarea pulsului ($\tau_{out} = 2.2$ fs) [26]; s-a dovedit atât experimental, cât și teoretic că pulsul laser cu chirp negativ poate fi remodelat și auto-comprimit în sticlă [27], și prin utilizarea auto-comprimării în SiO₂ (6 plăci) și filtrare spațială, s-au măsurat 8.8 fs pornind de la pulsuri inițiale de 40 fs și 0.8 mJ [28].

1.3 Post-compresia pulsurilor laser de mare energie

Pentru regimul de mare energie ($E > 500$ mJ), problemele legate de ionizare, auto-focalizare, distrugerea materialului și dimensiunea materialelor neliniare devin factori critici [1, 21, 23]. Scopul acestei teze este de a investiga fezabilitatea generării unei lățimi spectrale largi prin auto-modulația fazei în materiale solide folosind pulsuri laser de mare energie.

Auto-modularea de fază (SPM) este un proces neliniar care se bazează pe modificarea indicelui de refracție în funcție de intensitate atunci când un fascicul laser intens se propagă prin mediul respectiv ($n(t, r) = n_0 + n_2 \cdot I(t, r)$). În esență, variația indicelui de refracție cu intensitatea incidentă induce o modulație de fază în timp pentru fiecare componentă de frecvență în cadrul pulsului. Răspunsul mediului introduce o schimbare de fază în unda incidentă, rezultând generarea de noi frecvențe. Răspunsul neliniar (n_2) variază în funcție de compoziția chimică a diferitelor materiale, ceea ce duce la indici de refracție neliniari (NRI) distincți, care influențează generarea SPM.

În plus față de generarea de noi frecvențe în cristalele neliniare, fibre și capilarele goale umplute cu gaz, care și-au găsit aplicații în sistemele laser de energie scăzută, cu profile de fascicul Gaussian, materialele optice subțiri precum sticlele sau plasticele oferă o perspec-

tivă nouă pentru generarea de pulsuri ultra-scurte în sistemele laser de ordinul Joule-ului cu profile de fascicul super-Gaussian sau flat-top [1, 21, 23]. Aceste tipuri de profile ale fascicului permit o distribuție uniformă a energiei pe suprafața materialului, reducând apariția zonelor intense și a filamentației, fenomene adesea asociate cu profilele de tip Gaussian. Înțelegerea proprietăților materialelor optice și plastice, împreună cu capacitățile lor, reprezintă atât o provocare, cât și o oportunitate pentru atingerea regimului cu un singur ciclu de oscilație, așa cum este discutat mai detaliat în Capitolul 3.

1.4 Metoda de compresie: Thin film compression (TFC)

Datorită principalelor lor avantaje, cum ar fi costul redus, timpul scurt de fabricație și o gamă largă de dimensiuni, împreună cu caracteristicile optice similare celor ale sticlei (de exemplu, FS sau N-BK7 în ceea ce privește indicii de refracție, transmisia), materialele plastice au fost introduse și propuse pentru prima dată în metoda de Comprimare cu Film Subțire (TFC), ilustrată în Figura 1.2 [1].

Metoda TFC folosește filme subțiri de plastic cu sute de microni grosime pentru auto-modulația fazei. Materialele plastice ar trebui să aibă o calitate optică înaltă și ar trebui plasate preferabil la un unghi Brewster pentru a minimiza pierderile prin reflexii. O serie de oglinzi cu derivă de frecvență (CM) cu o valoare specifică de GDD (Group Delay Dispersion) sunt utilizate pentru a comprima durata pulsului după lărgirea spectrului. Oglinzile CM sunt fabricate din mai multe straturi dielectrice cu spații de adâncime variabilă, proiectate pentru a reflecta mai multe lungimi de undă. GDD-ul introdus de CM are o magnitudine negativă, permițând astfel compensarea dispersiei pozitive introduse de material. Compensarea perfectă a GDD conduce la un puls comprimat aproape de limita Fourier.

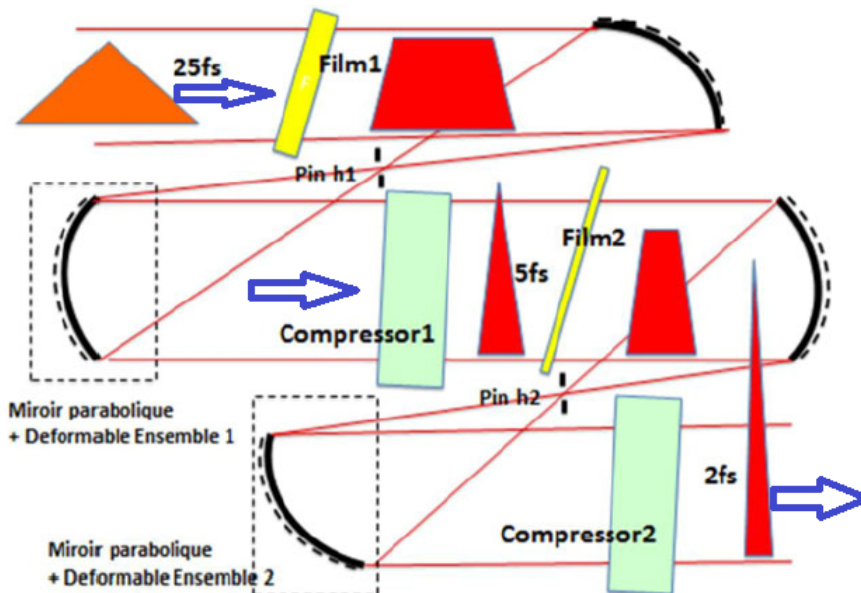


Figura 1.2: Metoda de post-compresie bazată pe tehnica "Thin film Compression (TFC)" Figura a fost extrasă și modificată din ref. [1]

Post-compresia impulsurilor laser de mare energie s-a dovedit a fi limitată de pragul de distrugere al materialelor optice și al oglinzilor cu deriva de frecvență, iar calitatea acestor materiale joacă un rol critic în calitatea frontului de undă și a focalizării. Măsurarea atentă a neliniarităților, în special a celor care duc la auto-modulația fazei (SPM), la lungimea

de undă centrală a pulsului laser (de exemplu, $\lambda_{central} = 800$ nm), este esențială. Implementarea cu succes a tehnicii, precum și dezvoltarea de dispozitive de diagnoză eficiente, sunt extrem de necesare pentru obținerea unui control precis asupra post compresiei pulsurilor laser. În plus, optimizarea prin simulări și explorarea diferitelor aplicații sunt pași importanți în avansarea acestei tehnici la nivel global.

Această teză abordează cuprinzător aceste aspecte, acoperind cadre teoretice, studii de simulare și rezultate experimentale. Accentul principal al acestei cercetări se concentrează asupra post-compresiei pulsurilor laser de mare energie pentru obținerea de durate sub 10 fs, cu accent pe utilizarea atât a materialelor din sticlă, cât și a celor din plastic. Au fost efectuate o serie de experimente pentru a înțelege tehnica de post-compresie și de a o optimiza.

1.5 Conținutul tezei

Capitolul I explica nevoia de impulsuri laser ultracurte și ultraintense, pornind de la starea actuală a sistemelor laser de mare putere. Acest capitol include o trecere în revistă a metodelor de post-compresie care ar putea duce la o implementare realistă a unui sistem laser de clasa Exawatt.

Capitolul II este dedicat aspectelor teoretice ale acestei teze. Prima parte se concentrează pe efectele neliniare, în special pe indicele de refracție neliniar (NRI) și automodularea de fază (SPM) care conduc la lărgirea spectrală a impulsurilor ultracurte. Ultima parte a acestui capitol discută fenomenele de dispersie, diferitele ordine de dispersie, materialele dispersive relevante utilizate în mod obișnuit în sistemele laser de mare putere (HPLS) și metodele de compensare a dispersiei. Aceste concepte formează fundamentul tezei.

Pentru a aduce aceste concepte teoretice în experimente, au fost dezvoltate simulări folosind biblioteca PyNLO într-un mediu de programare ce utilizează limbajul Python. Aceste simulări sunt concepute pentru a descrie generarea de impulsuri laser ultracurte și propagarea lor ulterioară prin medii neliniare.

Capitolul III descrie caracterizarea proprietăților materialelor optice : dispersia, transmisia, rugozitatea, compatibilitatea cu vidul, și ofera o analiză detaliată a indicelui de refracție neliniar și a pragului de distrugere indusă de laser. În plus, un sistem de management al dispersiei (DMS) este proiectat pentru a comprima impulsurile lărgite spectral nou simulate. Rezultatele au fost rezumate într-un tabel care acoperă proprietățile a 10 materiale optice de tip sticla sau plastice.

Capitolul IV prezintă o descriere detaliată a rezultatelor experimentale obținute în urma a patru campanii experimentale dedicate postcompresiei pulsurilor ultracurte. Prezintă utilizarea materialelor plastice și a sticlelor în experimente de post-compresie care implică impulsuri laser de înaltă energie, atingând cu succes niveluri de compresie variind de la terawatt (TW) la putere de vârf petawatt (PW). Capitolul abordează, de asemenea, noile provocări legate de metrologia impulsurilor laser post-comprimate, cum ar fi cuplările spațio-temporale, energia în focus, absorbția neliniară în oglinzi cu deriva de frecvență (CM) și corecția frontului de undă, oferind o perspectivă detaliată asupra acestor aspecte.

Folosind parametrii cheie precum dispersia, indicele de refracție neliniar și pragul de distrugere, se arată, de asemenea, că propagarea impulsurilor laser ultra-scurte prin materiale optice poate furniza impulsuri laser sub 6 fs.

Capitolul V încheie teza prin prezentarea principalelor concluzii trase în urma cercetării. Include diverse tabele rezumative, două metode noi pentru a estima NRI, 3 metode complementare pentru a efectua măsurători LIDT și predicția atingerii sub 6 fs la energie de nivel 2 Joule.

Am arătat pentru prima dată rezultate experimentale pentru stabilitatea unor astfel de impulsuri laser post-comprimate în timp ce ordinele mai mari de dispersie sunt compensate, demonstrând astfel potențialul de a genera un factor de compresie temporală a pulsurilor de 5 atunci când sunt utilizați 2 J și 2 mm BK7.

Acest capitol discută, de asemenea, perspective de viitor, inclusiv implementarea potențială a rezultatelor lucrării pentru accelerarea electronilor, precum și simulări care implică surse secundare de radiație.

Bibliografie

- [1] G. Mourou, S. Mironov, et al. “Single cycle thin film compressor opening the door to Zeptosecond-Exawatt physics”. en. In: *The European Physical Journal Special Topics* 223.6 (May 2014), pp. 1181–1188. URL: <http://link.springer.com/10.1140/epjst/e2014-02171-5> (visited on 02/06/2019).
- [2] T. Tajima and G. Mourou. “Zettawatt-exawatt lasers and their applications in ultrastrong-field physics”. In: *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams* 5.3 (Mar. 2002). Publisher: American Physical Society, p. 031301. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTAB.5.031301> (visited on 06/28/2023).
- [3] Gerard Mourou, William Brocklesby, et al. “The future is fibre accelerators”. In: *Nature Photonics* 7 (Apr. 2013), pp. 258–261.
- [4] V. M. Malkin, G. Shvets, et al. “Fast Compression of Laser Beams to Highly Overcritical Powers”. In: *Physical Review Letters* 82.22 (May 1999). Publisher: American Physical Society, pp. 4448–4451. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.82.4448> (visited on 06/22/2023).
- [5] G. A. Mourou, N. J. Fisch, et al. “Exawatt-Zettawatt pulse generation and applications”. In: *Optics Communications* 285.5 (Mar. 2012), pp. 720–724. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401811012338> (visited on 02/06/2019).
- [6] Zhaoyang Li, Yoshiaki Kato, et al. “Simulating an ultra-broadband concept for Exawatt-class lasers”. en. In: *Scientific Reports* 11.1 (Jan. 2021). Number: 1 Publisher: Nature Publishing Group, p. 151. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-80435-6> (visited on 01/13/2021).
- [7] E. A. Khazanov, S. Yu Mironov, et al. “Nonlinear compression of high-power laser pulses: compression after compressor approach”. en. In: *Physics-Uspekhi* 62.11 (Nov. 2019). Publisher: IOP Publishing, p. 1096. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.3367/UFNe.2019.05.038564/meta> (visited on 11/09/2020).
- [8] S. Yu. Mironov, S. Fourmaux, et al. “Thin plate compression of a sub-petawatt Ti:Sa laser pulses”. en. In: *Applied Physics Letters* 116.24 (June 2020), p. 241101. URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0008544> (visited on 06/22/2020).
- [9] Ji in Kim, Jin Woo Yoon, et al. “Post-compression of a 100-TW Ti:sapphire laser (Conference Presentation)”. In: *High-power, High-energy Lasers and Ultrafast Optical Technologies*. Vol. PC12577. SPIE, June 2023, PC125770G. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/PC12577/PC125770G/Post-compression-of-a-100-TW-Ti-sapphire-laser-Conference/10.1117/12.2669875.full> (visited on 06/13/2023).

-
- [10] S. Gales, K. A. Tanaka, et al. “The extreme light infrastructure—nuclear physics (ELI-NP) facility: new horizons in physics with 10 PW ultra-intense lasers and 20 MeV brilliant gamma beams”. en. In: *Reports on Progress in Physics* 81.9 (Aug. 2018). Publisher: IOP Publishing, p. 094301. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6633/aacfe8> (visited on 02/11/2021).
- [11] François Lureau, Guillaume Matras, et al. “High-energy hybrid femtosecond laser system demonstrating 2×10 PW capability”. en. In: *High Power Laser Science and Engineering* 8 (2020). Publisher: Cambridge University Press. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/high-power-laser-science-and-engineering/article/highenergy-hybrid-femtosecond-laser-system-demonstrating-2-10-pw-capability/C10005F3B8BA78E4FA3EF9EAF06C3BFB> (visited on 12/17/2020).
- [12] Colin Danson, David Hillier, et al. “Petawatt class lasers worldwide”. en. In: *High Power Laser Science and Engineering* 3 (Jan. 2015). Publisher: Cambridge University Press, e3. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/high-power-laser-science-and-engineering/article/petawatt-class-lasers-worldwide/77B55882D24E72D26E233B691A8376D2> (visited on 06/09/2023).
- [13] Colin N. Danson, Constantin Haefner, et al. “Petawatt and exawatt class lasers worldwide”. en. In: *High Power Laser Science and Engineering* 7 (Jan. 2019). Publisher: Cambridge University Press, e54. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/high-power-laser-science-and-engineering/article/petawatt-and-exawatt-class-lasers-worldwide/D85E3F002CBFC286C08076E127BB5F5C> (visited on 06/09/2023).
- [14] Sterling Backus, Charles G. Durfee III, et al. “High power ultrafast lasers”. In: *Review of Scientific Instruments* 69.3 (Mar. 1998), pp. 1207–1223. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1148795> (visited on 06/09/2023).
- [15] W. H. Knox, R. L. Fork, et al. “Optical pulse compression to 8 fs at a 5-kHz repetition rate”. en. In: *Applied Physics Letters* 46.12 (June 1985), pp. 1120–1121. URL: <https://pubs.aip.org/aip/apl/article/46/12/1120-1121/49468> (visited on 06/14/2023).
- [16] R. H. Stolen and Chinlon Lin. “Self-phase-modulation in silica optical fibers”. In: *Physical Review A* 17.4 (Apr. 1978), pp. 1448–1453. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.17.1448> (visited on 09/27/2019).
- [17] Xiaowei Song and Jingquan Lin. “Spectral broadening of femtosecond laser pulse through ionizing-gas-filled capillary”. en. In: *Optik* 124.6 (Mar. 2013), pp. 501–504. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030402612000605> (visited on 02/06/2019).
- [18] S Yu Mironov, V N Ginzburg, et al. “Using self-phase modulation for temporal compression of intense femtosecond laser pulses”. en. In: *Quantum Electronics* 47.7 (July 2017), pp. 614–619. URL: <http://stacks.iop.org/1063-7818/47/i=7/a=614?key=crossref.05447f7085d35235d951af5ca02eabd4> (visited on 02/06/2019).
- [19] Andrey Shaykin, Vladislav Ginzburg, et al. “Use of KDP crystal as a Kerr nonlinear medium for compressing PW laser pulses down to 10 fs”. en. In: *High Power Laser Science and Engineering* 9 (2021). Publisher: Cambridge University Press, e54. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/high-power-laser-science-and-engineering/article/use-of-kdp-crystal-as-a-kerr-nonlinear-medium-for-compressing-pw-laser-pulses-down-to-10-fs/47F400B9C1E38C4DA0B2BDAC33C6AE23> (visited on 01/04/2023).
-

- [20] R. R. Alfano and S. L. Shapiro. “Observation of Self-Phase Modulation and Small-Scale Filaments in Crystals and Glasses”. In: *Physical Review Letters* 24.11 (Mar. 1970), pp. 592–594. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.24.592> (visited on 08/10/2019).
- [21] S Yu Mironov, J Wheeler, et al. “100 J-level pulse compression for peak power enhancement”. en. In: *Quantum Electronics* 47.3 (Mar. 2017), pp. 173–178. URL: <http://stacks.iop.org/1063-7818/47/i=3/a=173?key=crossref.bc537e9b520e19d80018dbb8797b98f9> (visited on 02/06/2019).
- [22] D. M. Farinella, J. Wheeler, et al. “Focusability of laser pulses at petawatt transport intensities in thin-film compression”. en. In: *Journal of the Optical Society of America B* 36.2 (Feb. 2019), A28. URL: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=josab-36-2-A28> (visited on 01/29/2020).
- [23] P.-G. Bleotu, J. Wheeler, et al. “Post-compression of high-energy, sub-picosecond laser pulses”. en. In: *High Power Laser Science and Engineering* 11 (2023), e30. URL: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S2095471923000105/type/journal_article (visited on 05/02/2023).
- [24] Daniel Ursescu, Dan Matei, et al. “First HPLS Experiments at ELI-NP: Spectral Broadening in Thin Films”. en. In: *Frontiers in Optics* (2020), p. 2.
- [25] Erik Zeek, Kira Maginnis, et al. “Pulse compression by use of deformable mirrors”. EN. In: *Optics Letters* 24.7 (Apr. 1999). Publisher: Optical Society of America, pp. 493–495. URL: <https://www.osapublishing.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-24-7-493> (visited on 12/04/2020).
- [26] Francisco Silva, Benjamín Alonso, et al. “Strategies for achieving intense single-cycle pulses with in-line post-compression setups”. EN. In: *Optics Letters* 43.2 (Jan. 2018). Publisher: Optica Publishing Group, pp. 337–340. URL: <https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-43-2-337> (visited on 06/08/2023).
- [27] Jun Liu, Xiaowei Chen, et al. “Spectrum reshaping and pulse self-compression in normally dispersive media with negatively chirped femtosecond pulses”. EN. In: *Optics Express* 14.2 (Jan. 2006). Publisher: Optica Publishing Group, pp. 979–987. URL: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-14-2-979> (visited on 06/28/2023).
- [28] Yitan Gao, Yabei Su, et al. “Generation of annular femtosecond few-cycle pulses by self-compression and spatial filtering in solid thin plates”. en. In: *Optics Express* 29.19 (Sept. 2021), p. 29789. URL: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=oe-29-19-29789> (visited on 09/06/2021).

CAPITOL 2

Capitolul II Dispersia și automodularea de fază

În capitolul anterior, am efectuat o analiză a stării curente a celor mai semnificative lasere din lume, evidențiind potențialul laserelor de tip Exawatt. Printre parametrii critici, lărgirea spectrală și post-compresia se evidențiază ca strategii eficiente pentru îmbunătățirea puterii maxime a sistemelor laser de mare putere existente.

Pentru a explora mai în detaliu lărgirea spectrală, în acest capitol, am prezentat un studiu teoretic care include dispersia, auto-modulația fazei (SPM), integrala B și indicele de refracție neliniar (NRI). Acești parametri sunt strâns legați de materialele utilizate și de calitatea pulsului laser de intrare.

Prin urmare, pe parcursul acestui capitol, am investigat teoria SPM, am analizat factorii care contribuie la dispersie și am examinat diverse tehnici pentru cuantificarea efectelor neliniare.

High order spectral phase			
$\phi^{(2)}(\omega_0)$	$\phi^{(3)}(\omega_0)$	$\phi^{(4)}(\omega_0)$	$\phi^{(5)}(\omega_0)$
$\phi_s^{(2)}(\omega) < 0$	$\phi_s^{(3)}(\omega) < 0$	$\phi_s^{(4)}(\omega) > 0$	$\phi_s^{(5)}(\omega) < 0$
$\phi_m^{(2)}(\omega) > 0$	$\phi_m^{(3)}(\omega) > 0$	$\phi_m^{(4)}(\omega) < 0 \text{ or } > 0$	$\phi_m^{(5)}(\omega) > 0$
$\phi_p^{(2)}(\omega) < 0 \text{ or } > 0$	$\phi_p^{(3)}(\omega) < 0 \text{ or } > 0$	$\phi_p^{(4)}(\omega) < 0 \text{ or } > 0$	$\phi_p^{(5)}(\omega) < 0 \text{ or } > 0$
$\phi_c^{(2)}(\omega) < 0$	$\phi_c^{(3)}(\omega) > 0$	$\phi_c^{(4)}(\omega) < 0$	$\phi_c^{(5)}(\omega) > 0$
$\phi_{CM}^{(2)}(\omega) < 0 \text{ or } > 0$	$\phi_{CM}^{(3)}(\omega) < 0 \text{ or } > 0$	-	-

Figura 2.1: Semnul ordinilor de dispersie pentru s-stretcher, m-materiale, p-prisme, c-compresor, CM- oglinzi cu derivă de frecvență

Teoria SPM a fost aplicată într-un cod de programare care simulează propagarea prin diferite materiale și efectele asupra părților temporale și spectrale ale pulsurilor laser.

Aceste simulări, inclusiv rezultatele pentru indicele de refracție nelinier n_2 , au fost folosite în Capitolul IV pentru a estima lărgirea spectrală obținută în experimente de la facilități precum ELI-NP (2 campanii experimentale), LASERIX și APOLLON.

Rezultatele acestui capitol, în ceea ce privește dispersia, au fost folosite pentru a genera un cod Python care poate extrage valorile ordinilor (până la ordinul cinci) de dispersie și faza spectrală pentru o listă de materiale (cuprinde 12 materiale predefinite utilizate în sistemele mari CPA: Silicat topit (FS), BK7, MgF2, CaF2, SF11, SF57, TGG și Al2O3 (Ti: Safir), DKDP, TeO₂ cu cele două orientări pe axa ordinară și axa extraordinară), lărgitor de puls (stretcher) și compresoare bazate pe 2 rețele de difracție, compresoare cu prisme și oglinzi CM. Semnele de dispersie pentru fiecare dintre aceste componente optice sunt prezentate în Figura 2.1.

Pentru un puls laser, neliniaritatea de tip Kerr induce o modulare a fazei temporale odată ce cu propagarea în interiorul materialului. Această modulare a fazei generează o derivă de frecvență (chirp), caracterizată de parametrul k_2 .

Câmpul electric al unui puls care este supus SPM arată un decalaj de fază mai mare în regiunile de intensitate mai mare decât în cele de intensitate mai mică.

Luând în considerare chirp-ul, forma spectrală suferă o transformare pronunțată. În mod deosebit, spectrul central, este evidențiat sub forma unor vârfuri și adâncituri multiple în cadrul oscilațiilor. Amplitudinea și frecvența modulațiilor sinusoidale sunt intrinsec legate de magnitudinea maximă și locația chirp-ului [1].

Dispersia, SPM, Integrala B ($\frac{2*\pi*n_2*I*L}{\lambda}$) și indicele de refracție nelinier sunt atributele de bază pentru subiectul acestei lucrări. I denotă intensitatea iar L lungimea materialului. Acestea sunt legate de materiale (i) și de parametrii laserului (ii).

(i) S-a arătat că indicele de refracție n , grosimea materialului (L), calitatea materialului, dimensiunea eșantionului (pentru lasere cu putere mare, de exemplu, 10 PW @ ELI-NP are 55 cm [2]) și când iradianța este suficient de mare, contribuțiile neliniarității ordinului superior (n_2I , n_4I^2) la n , absorbția liniară și neliniară, pierderile (de exemplu, reflecțiile Fresnel) afectează efectul general al SPM și al integralei B și trebuie să fie înțelese și investigate cu atenție înainte de experimente.

(ii) Dimensiunea petei laser, energia de intrare, durata pulsului (pe scurt, intensitatea), uniformitatea fasciculului, contrastul pulsului laser, raportul Strehl, duratele de puls diferite de-a lungul fasciculele laser mari (>10 mm), Dazzler și oglinzile deformabile, joacă un rol major în eficiența post-compresiei.

Acest capitol acoperă o înțelegere cuprinzătoare a efectelor nelineare legate de SPM (de la teoria complexă la teoria simplificată). Trei termeni cheie: Integrala B, n_2 (NRI) și Coeficientul de Absorbție Neliniară (NAC) β au fost investigate din punct de vedere teoretic.

Metoda Z-scan este cea mai utilizată tehnică folosită pentru a măsura NRI și NAC. Metoda Z-scan cuprinde două configurații distincte: configurația cu apertură închisă (CA), utilizată pentru extragerea NRI, în care se înregistrează doar lumina care trece printr-o apertură și configurația de apertură deschisă (OA) unde se colectează toată lumina, de regulă folosind o lentilă [3].

2.1 Publicații

P.-G. Bleotu et al., "PRISM COMPRESSOR ENABLING PULSE DURATION MEASUREMENTS AT ELI-NP EXPERIMENTAL AREAS"-in ELI-NP reports 2019

[4]. V.Aleksandrov, **P.-G. Bleotu** et al., "Upgrading design of a multi-TW femtosecond laser", Romanian Reports in Physics, 2020.

[5]. V.Aleksandrov, **P.-G. Bleotu**, D Ursescu, "Femtosecond Pulse Shortening Using Cascaded Quadratic Nonlinearities for High Temporal Contrast", CLEO, 2019.

Bibliografie

- [1] Christophe Finot, F. Chaussard, et al. “Simple guidelines to predict self-phase modulation patterns”. EN. In: *JOSA B* 35.12 (Dec. 2018). Publisher: Optica Publishing Group, pp. 3143–3152. URL: <https://opg.optica.org/josab/abstract.cfm?uri=josab-35-12-3143> (visited on 08/24/2023).
- [2] S. Gales, K. A. Tanaka, et al. “The extreme light infrastructure—nuclear physics (ELI-NP) facility: new horizons in physics with 10 PW ultra-intense lasers and 20 MeV brilliant gamma beams”. en. In: *Reports on Progress in Physics* 81.9 (Aug. 2018). Publisher: IOP Publishing, p. 094301. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6633/aacfe8> (visited on 02/11/2021).
- [3] M. Sheik-Bahae, A.A. Said, et al. “Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam”. en. In: *IEEE Journal of Quantum Electronics* 26.4 (Apr. 1990), pp. 760–769. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/53394/> (visited on 02/19/2019).
- [4] V Aleksandrov, G Bleotu, et al. “Upgrading design of a multi-TW femtosecond laser”. In: *Romanian Reports in Physics* 72 (June 2020).
- [5] Veselin Aleksandrov, Gabriel Bleotu, et al. “Femtosecond Pulse Shortening using Cascaded Quadratic Nonlinearities for High Temporal Contrast”. en. In: *2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*. Munich, Germany: IEEE, June 2019, pp. 1–1. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8872446/> (visited on 08/19/2023).

CAPITOL 3

Capitolul III Materiale optice pentru post-compresie

A road map of expertise, challenges and improvements

— Gabriel P. Bleotu

Acest capitol evidențiază specificațiile în fabricarea lamelelor de sticlă și plastic, subliniind proprietățile materialelor esențiale necesare pentru lărgirea spectrală.

Caracterizarea completă a proprietăților optice ale materialelor a fost efectuată în jurul lungimii de undă centrale ($\lambda_{central} = 800$ nm), specifică pentru majoritatea laserelor Ti:safir, inclusiv sistemele laser utilizate în capitolul următor.

Acest capitol prezintă rezultate originale (măsurători și simulări) și contribuții aduse în domeniul caracterizării materialelor. Cu toate dezvoltările în curs în domeniul științei materialelor și al cercetărilor privind post-compresia, există o notabilă absență a rezultatelor publicate care să se potrivească caracterizării cuprinzătoare pe care am realizat-o în acest capitol.

Totodată, acest capitol cuprinde analiza a 10 materiale diferite. Rezultatele obținute în urma măsurărilor de disperisie, rugozitate, front de undă, compatibilitate cu vidul, transmisie sunt cuprinse într-un tabel. Acest tabel mai cuprinde rezultatele experimentale obținute pentru indicele de refracție neliniar prin 4 metode diferite (Z-scan, I-scan, Radius Z-scan și LIDT-scan). Au fost dezvoltate 3 metode complementare de estimare a pragului de distrugere indus laser (Metoda frecvențelor spațiale (spatial frequencies), metoda fasciculelor largi (Large beam) și metoda Sonda Langmuir -Curentul Țintei (LPTC))

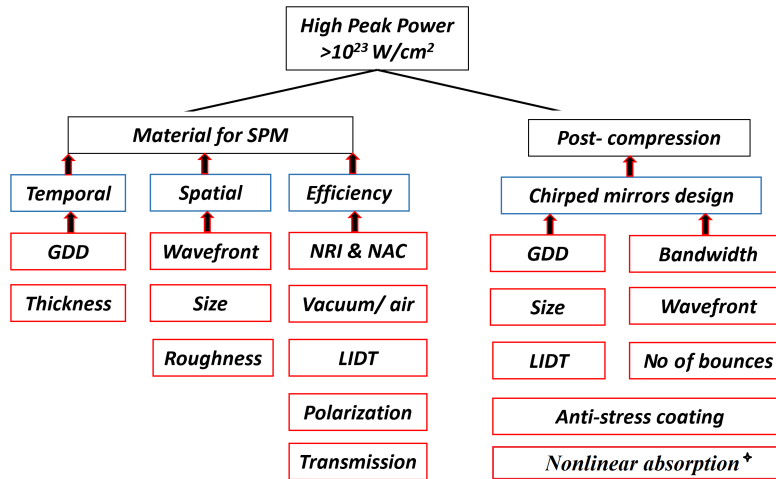


Figura 3.1: Principalele proprietăți ale materialelor optice și ale oglinzilor cu derivă de frecvență investigate în acest capitol

3.1 Materiale optice folosite pentru lărgirea spectrală

În prezent, există o mulțime de materiale optice pe piață care pot fi utilizate. Ca prim pas, este necesară o caracterizare completă (a se vedea Figura 3.1) a proprietăților optice pentru a-l selecta pe cel mai potrivit dintre ele. În acest capitol, voi discuta munca efectuată pentru a măsura dispersia, rugozitatea, transmisia, compatibilitatea cu vidul, indicele de refracție neliniar, coeficientul de absorbție neliniar și frontul de undă transmis al diferitelor materiale plastice și sticle.

Voi oferi o discuție detaliată a trei caracteristici cheie: neliniaritățile, pragul de distrugere indus laser (LIDT) și caracterizarea lărgirii spectrale. Aceste aspecte sunt parametri cheie pentru selectarea materialelor în contextul proceselor SPM și post-compresie.

Fiecare element din Figura 3.1 joacă un rol important în realizarea unei creșteri eficiente a puterii de vârf. Acestea pot fi grupate în două categorii: alegerea materialului potrivit pentru SPM și alegerea oglinzilor CM. Parametrii CM au fost stabiliți după mai multe discuții cu producători precum Ultrafast-Innovation, Optosigma, LaserOptik, Laser2000 și după experiența anterioară dobândită din experimente [1, 2, 3]. Semnul * alături de absorbția neliniară în CM reprezintă un parametru, recent observat în experimente și care nu este încă înțeles pe deplin în prezent.

3.2 Montajul experimental

Pentru a putea măsura cât mai multe proprietăți ale materialelor, am proiectat și construit un montaj experimental care poate măsura SPM, neliniaritățile și pragul de distrugere.

Configurația experimentală pe care am folosit-o este ilustrată în Figura 3.2. Aceasta constă din trei sub-ansambluri principale (I, II și III). Primul se bazează pe o configurație Z-scan (deschisă și închisă) sau I-scan (Scanare de intensitate)[4, 5] menită să măsoare și să valideze semnul și magnitudinea NRI și NAC. În al doilea rând, un sistem de imagistică cu distanță de lucru mare (LWDIS) este utilizat pentru a măsura și califica pragul de distrugere indus de laser prin diferite metode de procesare a imaginii. În al treilea rând, a fost utilizat un spectrometru cu fibră optică (FS) pentru a monitoriza lărgirea spectrală în timpul iradierii.

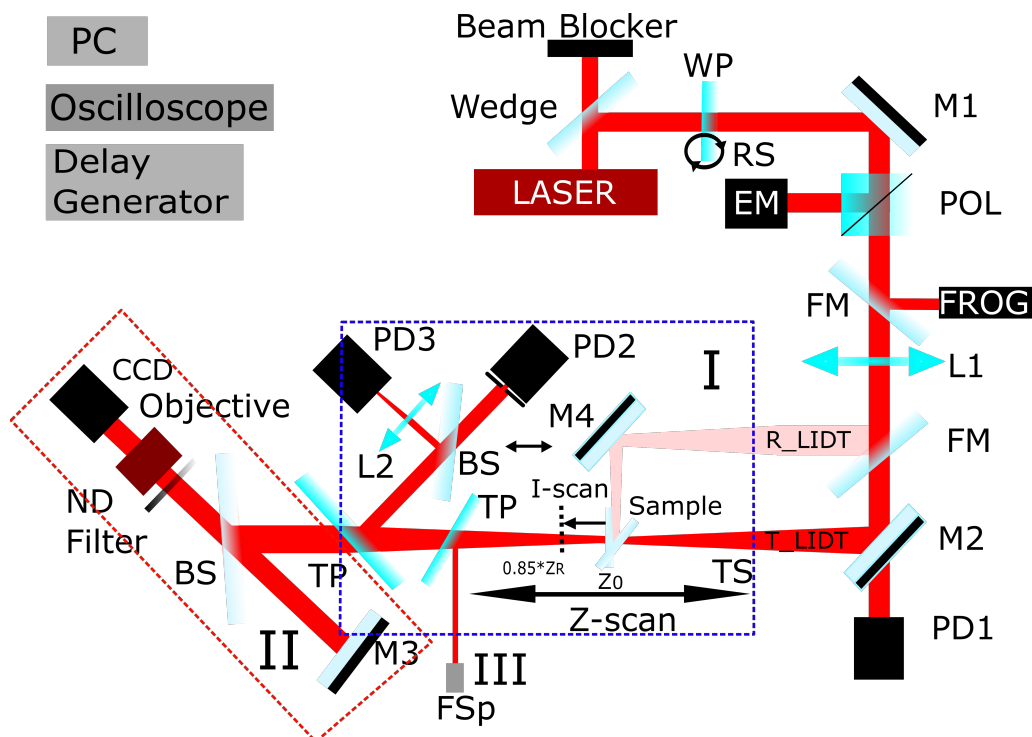


Figura 3.2: Configurația experimentală în aer: I) **I și Z-scan** pentru măsurarea coeficientului de absorbție neliniară și a indicelui de refracție neliniară (NRI) [3], II) **Sistem de imagistică cu distanță de lucru mare (LWDIS)** pentru măsurători LIDT și III) **Spectrometru cu fibră optică (FSp)** pentru măsurători de lărgire spectrală (SPM). Configurația are următoarele elemente optice: BS - divizor de fascicule, EM - măsurător de energie, FS - spectrometru cu fibră optică, FM - oglindă mobilă, LASER - Ti: Safir, L1 și L2 - lentile de focalizare, M1, M4 - oglindă de înaltă reflexie, M2 - oglindă reflectivă 99%, M3 - oglindă sferică, ND - filtru de atenuare, POL - polarizator, PD1, PD2 și PD3 - fotodiode, TP - lamelă subțire de FS, TS - stagiu de translație, RS - stagiu de rotație, WP - lamă jumătate de undă $\lambda/2$

Sistemul laser AVESTA Ti:safir a fost utilizat pentru a furniza pulsuri laser comprimate (40 fs, 800 nm, 10 Hz, 1 mJ) către experimentul propriu-zis. Energia pulsului a fost redusă prin utilizarea unui wedge cu o transmisie de 4%, combinată cu o lamă $\lambda/2$ (WP) și un cub polarizator (POL). WP a fost montată pe un stagi de rotație motorizat, permițând schimbarea polarizării cu până la 90° pentru o rotație de 45° a WP. Pentru experimentele dedicate măsurării NRI și NAC, energia transmisă ($36 \mu\text{J} \pm 1,5 \mu\text{J}$) a fost focalizată printr-o lentilă plano-convexă (L1) cu o distanță focală de 40 cm. Durata pulsului ($40 \text{ fs} \pm 3 \text{ fs}$) a fost măsurată folosind un autocorelator SHG și confirmată cu SHG FROG [6].

3.3 Discuții

Acest capitol oferă o înțelegere detaliată a principalelor proprietăți ale materialelor optice, și anume: dispersia, rugozitatea, transmiterea, compatibilitatea cu vidul, distorsiunile frontului de undă, neliniaritățile (refracție și absorbție), auto-modularea de fază și pragul de distrugere indus de laser. Toți acești parametri au fost mășurați cu ajutorul dispozitivelor dedicate precum (senzor front de undă, profilometru etc.). Pentru ultimii trei parametri, am conceput o configurație experimentală, complet automatizată, care poate măsura și furniza rezultate în timp real.

Am contribuit la dezvoltarea de noi tehnici de măsurare a neliniarităților, cum ar fi Radius Z-scan și apertura LIDT sau de măsurare a pragului de distrugere indus de laser prin intermediul frecvențelor spațiale, LIDT cu fascicul mare sau metoda LPTC (Langmuir Probe-Target Current). Atât în cazul neliniarităților, cât și al pragului de distrugere, tehnicile sunt inovative, oferind rezultate complementare din punct de vedere cantitativ și calitativ.

O caracterizare completă a materialelor optice folosite pentru post-compresie a fost efectuată pentru prima dată. Rezultatele experimentale sunt rezumate în Tabelul 3.1.

Studiile referitoare la efectele neliniare au fost rezumate și ilustrate în Figura 3.3. Variația fazei nonlineare în funcție de energia de intrare este ilustrată în Figura 3.3. Valoarea NRI este recuperată din $\Delta\Phi \approx n_2 I$, deci faza este strict legată de intensitatea incidentă. Având în vedere că durata pulsului și fluctuația dimensiunii pulsului de intrare sunt sub 4%, am observat că faza are o dependență diferită (inclinare) pentru fiecare material pe măsură ce energia crește. Acest grafic m-a ajutat să știu unde să opresc creșterea energiei pentru a nu depăși 1 rad. De asemenea, existau materiale mai neliniare, cum ar fi Policarbonatul (PC), pentru care am măsurat întotdeauna o fază mai mare.

O altă perspectivă pentru obținerea NRI a fost din măsurările de tip I-scan, unde am rezumat interacția laserului cu materia în 3 regiuni (liniară, neliniară și de distrugere). În plus față de curba de potrivire, o estimare aproximativă poate fi făcută prin împărțirea pantei fiecărei curbe la referință (de exemplu FS, unde NRI a fost măsurat în mai multe surse [7]).

Se poate observa că materialul perfect (fără dispersie, cu distorsiuni minime ale frontului de undă, NRI ridicat și LIDT mare) nu există, dar materialele subțiri noi, precum Zeonor și OKP ($100 \mu\text{m}$), conduc la un răspuns mai bun decât BK7 sau FS pentru procesul SPM. Cu distorsiuni minime ale frontului de undă, NRI mare, dimensiuni mari și LIDT mai mare în comparație cu alte materiale plastice, aceste materiale subțiri pot fi folosite în serie și separate în spațiu pentru a minimiza potențialul efect de auto-focalizare la scară mică.

Materialele de sticlă pot fi utilizate dacă rugozitatea este îmbunătățită ($\lambda/10$) sau distorsiunile frontului de undă sunt corectate cu ajutorul unei oglinde deformabile. În ambele cazuri (plastic sau sticlă), este recomandată o buclă cu oglindă deformabilă pentru

Material	GDD (fs ²)	T (%)	R (μm)	WF RMS (μm)	WF (μm)	NRI - n ₂				NAC - β
						Z-scan	I-scan	Radius Z-scan	LIDT-Aperture	
FS	36	97	5.94	0.08 ($\sim\lambda/7$)	0.18($\sim\lambda/2$)	3.56	3.15	3.75	3.23	5.16
BK7	45	96.1	6.46	0.09 ($\sim\lambda/6$)	0.18($\sim\lambda/2$)	1.59	2.75	2.21	2.85	18.8
Zeonor	75	95.4	6.92	0.1 ($\sim\lambda/6$)	0.46($\sim\lambda/2$)	3.71	2.48	4.71	2.55	12.3
Zeonex	67	96.5	7.29	0.06 ($\sim\lambda/10$)	0.34($\sim\lambda/2$)	4.49	2.67	4.37	2.75	14.4
Topas	70	96.2	6.52	0.07 ($\sim\lambda/9$)	0.33($\sim\lambda/2$)	4.96	3.8	4.69	4.45	7.06
PC	136	95.6	6.23	0.09 ($\sim\lambda/6$)	0.42($\sim\lambda/2$)	3.34	2.53	4.34	2.72	16.4
PMMA	58	96.4	5.64	0.09 ($\sim\lambda/6$)	0.45($\sim\lambda/2$)	2.33	2.53	3.02	2.58	4.38
OKP*	7	96.7	6.21	0.03 ($\sim\lambda/18$)	0.21($\sim\lambda/3$)	-	5.37	2.81	4.71	2.02
Apel*	8	96.3	5.37	0.04 ($\sim\lambda/13$)	0.22($\sim\lambda/3$)	5.57	4.5	5.17	4.08	9.4
Zeonor*	7.5	96.8	4.74	0.01 ($\sim\lambda/45$)	0.09($\sim\lambda/8$)	-	5.88	4.69	5.13	10.3

Tabela 3.1: Rezultatele preliminare pentru caracterizarea materialelor, în care T - Transmisia, R - Rugozitatea și WF - Rădăcina medie pătrată (RMS) și Vârf-la-Vale (P-V) a frontului de undă, 'n₂' - nu a fost măsurată. Materialele marcate cu * aveau o grosime de 0,1 mm, în timp ce celelalte aveau 1 mm. Valorile NRI au o deviație standard de aproximativ 15% datorită variației parametrilor de intrare ai laserului.

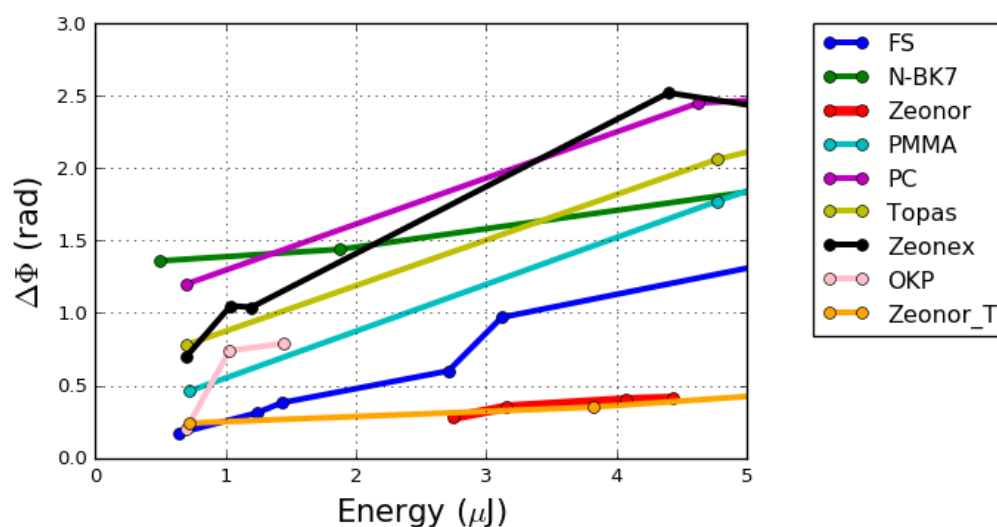


Figura 3.3: Faza neliniară ca funcție de energia de intrare pentru materialele optice alese

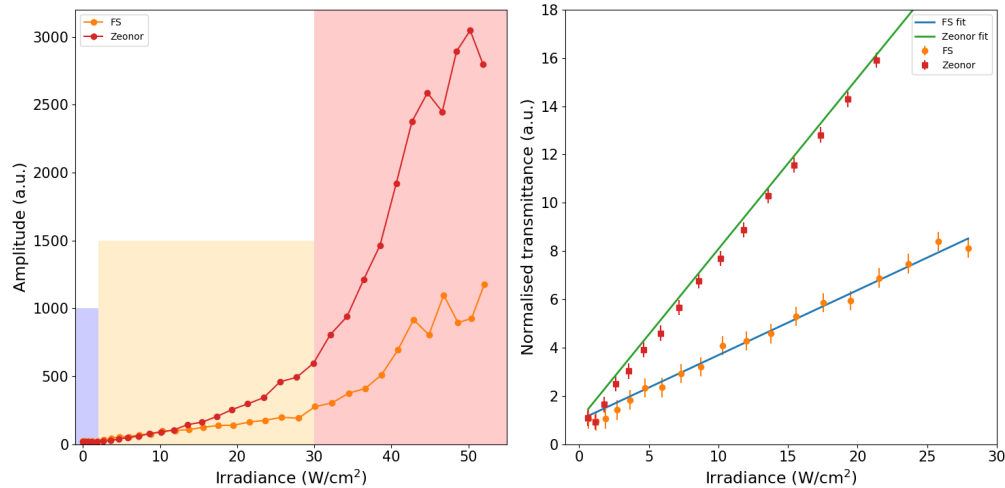


Figura 3.4: Măsurători de tip I-scan. Datele brute reprezentate în cele 3 regiuni de interes (stânga) și datele brute și fitarea pentru FS și Zeonor.

a îmbunătăți calitatea punctului focal. Importanța lor este prezentată în măsurătorile experimentale din următorul capitol.

În cadrul acestei lucrări, am fost implicat în construirea a trei configurații experimentale (una în aer și două sub vid) și am contribuit la dezvoltarea a patru metode pentru investigarea LIDT. Aceste metode includ unele originale, cum ar fi analiza frecvenței spațiale, și în colaborare cu alte echipe, am dezvoltat metodele Large Beam LIDT și Langmuir Probe - Target Current. În plus, am introdus analiza cu profilometru, care poate furniza informații despre adâncimea deteriorării și lungimea filamentării.

Problema contaminării și carbonizării oglinzilor sistemelor laser de mare putere este esențială. În cercetarea mea, m-am concentrat pe eliminarea carbonizării și contaminării induse de laser utilizând plasmă pe bază de oxigen și am demonstrat o creștere a sensibilității metodelor de diferențiere prin efectuarea de măsurători de GDD (dispersie de ordin II).

De asemenea, am efectuat măsurători și am comparat LIDT pentru două oglinzi chirped, luând în considerare cei mai importanți parametri. Oglinzile cu reflexie ridicată au prezentat cea mai mare valoare a LIDT.

3.4 Publicații

Activitatea legată de LIDT a fost publicată în Ref. [8, 9], iar lucrarea legată de Langmuir Probe-Target Current "Exploring fs-laser irradiation damage subthreshold behavior of dielectric mirrors via electrical measurements" a fost trimisă spre publicație la revista High Power Laser Science and Engineering.

[9]. **P.-G. Bleotu**, S. Irimiciuc, A. Dumitru, D.G. Matei, R. Udrea, D. Craciun, I. Dancus, V. Craciun, D. Ursescu, Target current and spatial modulations analysis for LIDT measurements using fs laser irradiation, in: Laser-Induced Damage in Optical Materials 2023, SPIE, Dublin/Livermore, United States, 2023: p. 81. <https://doi.org/10.1117/12.2685157>.

[8]. **P.-G. Bleotu**, A. Naziru, A.H. Okukura, S. Popa, D. Matei, A. Dumitru, C. Alexe, V.P. Iancu, A.-M. Talposi, V.C. Musat, I. Dancus, L.P. Caratas, B. Boisdeffre, T. Samoskoi, J. Takahisa, J. Wheeler, G. Mourou, D. Ursescu, LIDT station development with femtosecond pulses at ELI-NP, in: Laser-Induced Damage in Optical Materials 2022, SPIE, 2022. <https://doi.org/10.1117/12.2641616>.

Bibliografie

- [1] S. Yu. Mironov, S. Fourmaux, et al. “Thin plate compression of a sub-petawatt Ti:Sa laser pulses”. en. In: *Applied Physics Letters* 116.24 (June 2020), p. 241101. URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0008544> (visited on 06/22/2020).
- [2] S Yu Mironov, J Wheeler, et al. “100 J-level pulse compression for peak power enhancement”. en. In: *Quantum Electronics* 47.3 (Mar. 2017), pp. 173–178. URL: <http://stacks.iop.org/1063-7818/47/i=3/a=173?key=crossref.bc537e9b520e19d80018dbb8797b98f9> (visited on 02/06/2019).
- [3] E. A. Khazanov, S. Yu Mironov, et al. “Nonlinear compression of high-power laser pulses: compression after compressor approach”. en. In: *Physics-Uspekhi* 62.11 (Nov. 2019). Publisher: IOP Publishing, p. 1096. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.3367/UFNe.2019.05.038564/meta> (visited on 11/09/2020).
- [4] M. Sheik-Bahae, A.A. Said, et al. “Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam”. en. In: *IEEE Journal of Quantum Electronics* 26.4 (Apr. 1990), pp. 760–769. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/53394/> (visited on 02/19/2019).
- [5] I Dancus, V I Vlad, et al. “Z-SCAN AND I-SCAN METHODS FOR CHARACTERIZATION OF DNA OPTICAL NONLINEARITIES”. en. In: *Romanian Reports in Physics* 65.3 (2013), pp. 966–978.
- [6] Rick Trebino, Kenneth W. DeLong, et al. “Measuring ultrashort laser pulses in the time-frequency domain using frequency-resolved optical gating”. en. In: *Review of Scientific Instruments* 68.9 (Sept. 1997), pp. 3277–3295. URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1148286> (visited on 11/12/2020).
- [7] Jonathan Wheeler, Gabriel Petrișor Bleotu, et al. “Compressing High Energy Lasers through Optical Polymer Films”. en. In: *Photonics* 9.10 (Oct. 2022). Number: 10 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 715. URL: <https://www.mdpi.com/2304-6732/9/10/715> (visited on 10/04/2022).
- [8] Gabriel Petrișor Bleotu, Andrei Naziru, et al. “LIDT station development with femtosecond pulses at ELI-NP”. In: *Laser-Induced Damage in Optical Materials 2022*. Vol. PC12300. SPIE, Dec. 2022. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/PC12300/0000/LIDT-station-development-with-femtosecond-pulses-at-ELI-NP/10.1117/12.2641616.full> (visited on 12/09/2022).
- [9] Gabriel Petrișor Bleotu, Stefan Irimiciuc, et al. “Target current and spatial modulations analysis for LIDT measurements using fs laser irradiation”. en. In: *Laser-Induced Damage in Optical Materials 2023*. Ed. by Christopher W. Carr, Detlev Ristau, et al. Dublin/Livermore, United States: SPIE, Nov. 2023, p. 81. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12726/>

2685157 / Target - current - and - spatial - modulations - analysis - for - LIDT -
measurements-using/10.1117/12.2685157.full (visited on 09/22/2023).

CAPITOL 4

Capitolul IV Experimente de post-compresie

În acest capitol se discută patru campanii experimentale distincte concentrate pe post-compresia pulsurilor laser ultra-scurte. Aceste experimente au avut ca scop realizarea post-compresiei pulsurilor laser cu durate inițiale variind de la 350 fs la 27 fs și niveluri de energie între 0,3 J și 7 J. Post-compresia a fost realizată folosind metoda TFC.

Experimentele au fost efectuate la diferite facilități din Franța, inclusiv ELFIE, LASERIX și Apollon, precum și la facilitatea ELI-NP din România. În aceste experimente au fost utilizate diferite materiale optice, cum ar fi FS, Bk7, SF5, Zeonor și OKP.

Parametrii cheie de ieșire, examinați în aceste experimente, includ lărgirea spectrală, durata pulsului, distorsiunile frontului de undă, pierderile de energie și cuplajele spațio-temporale. Rezultatele și observațiile obținute din aceste experimente sunt discutate în detaliu în acest capitol.

4.1 Experimentul de la facilitatea ELFIE

Amplitudinile spectrale obținute în timpul campaniei experimentale folosind spectrometrul cu imagini sunt prezentate în Figura 4.1. Această figură ilustrează comparația între spectrul laserului original, înregistrat după amplificatorul final (albastru), și spectrele obținute în diferite scenarii: fără material (Figura 4.1a), FS (Figura 4.1b), sau COP (Zeonor) (Figura 4.1c).

În întreaga Figură 4.1, lungimea de undă centrală a sistemului laser rămâne constantă la $\lambda = 1057.5$ nm, iar spectrul de referință menține o lățime la jumătate din înălțimea maximă (FWHM) a benzii de $\Delta\lambda_{ref} = 5.4 \pm 0.3$ nm. Această lățime de bandă este suficientă pentru a susține o durată de puls dată de limita Fourier de aproximativ 300 fs.

În Figura 4.1a, în cazul în care nu există interacție cu materialul, absența lărgirii indică faptul că nu apare SPM în timpul transportului fasciculului și al măsurătorii. Un puls specific din acest caz, prezentat în Figura 4.1d, dezvăluie o măsurare de autocorelare corespunzătoare unei durate a pulsului de 340 ± 10 fs.

Pentru cazul specific al sticlei FS, evidențiat în Figura 4.1b, energia măsurată este ușor mai mare la $E \sim 4.8$ J, în comparație cu $E \sim 4.2$ J pentru pulsul de referință. În plus, lungimea de undă centrală suferă o mică deplasare la $\lambda_L = 1056.5$ nm, iar lățimea de bandă se extinde la $\Delta\lambda_{FS} = 13.3$ nm. Această lărgire a benzii poate susține o durată de puls mai scurtă de 124 fs.

Pentru pulsul laser care interacționează cu filmul COP din Figura 4.1c, energia pulsului măsoară mai puțin, $E = 3,9$ J. Când se examinează spectrul asociat cu COP, lungimea de undă centrală suferă o deplasare la $\lambda = 1055.0$ nm, iar lățimea benzii la jumătate din înălțime maximă (FWHM) se lărgeste la $\Delta\lambda_{COP} = 12.4$ nm. Această lărgire a benzii spectrale poate susține o durată de puls mai scurtă de 132 fs.

Din acest set de date, raportul măsurat al creșterii spectrale pentru FS este notat ca $F_{\omega}^{FS} = 2.66$. Această valoare poate fi comparată cu modelele prezentate în Ref. [1] pentru lărgirea așteptată, având în vedere valorile parametrilor: $B_{int} \sim 1.78$ și $D \sim 0.00078$. Acești parametri prevăd un factor simulat de $F_{\omega}^{FS} = 2.6$.

Figurile 4.1d și 4.1e prezintă măsurătorile autocorelatorului (AC), mai întâi fără material și apoi după interacția cu materialul FS și cu setul de oglinzi CM.

Prin presupunerea unui profil temporal al pulsului, de tip gaussian, potrivirea AC a arătat o durată inițială a pulsului de referință de 340 fs. După introducerea FS și post-compresie, această durată se reduce la 200 fs, indicând un GDD corespunzător ~ 3000 fs². Componentele optice din transportul fasciculului, inclusiv lentilele telescopului, fereastra camerei și divizoarele de fascicul, contribuie colectiv la o dispersie suplimentară de 1000 fs².

Un aspect interesant este ilustrat în Figura 4.1f, care evidențiază relația dintre lărgimea spectrală FWHM și prezența materialului FS în comparație cu absența oricărui material. Această relație este examinată ca o funcție a dispersiei introduse pulsului de intrare prin ajustarea distanței dintre rețelele de difracție în compresorul laserului. Atunci când este introdus FS, poziția optimă a compresoarelor este atinsă atunci când lărgirea lățimii de bandă atinge valoarea maximă de 13,3 nm. Ulterior, pe măsură ce distanța dintre rețele este modificată în ambele direcții, lățimea benzii scade.

În cadrul acestui experiment, am învățat semnificația calității materialului, în special în ceea ce privește distorsiunile frontului de undă și calitatea punctului focal. Optimizarea acestui proces se putea face prin utilizarea unei oglinzi deformabile. La momentul experimentului, facilitatea ELFIE nu a avut această capacitate. Cu toate acestea, lărgirea spectrală s-a dovedit a fi o metodă viabilă pentru optimizarea preliminară a compresoarelor cu rețele de difracție. În plus, analiza frecvențelor spațiale s-a dovedit valoroasă

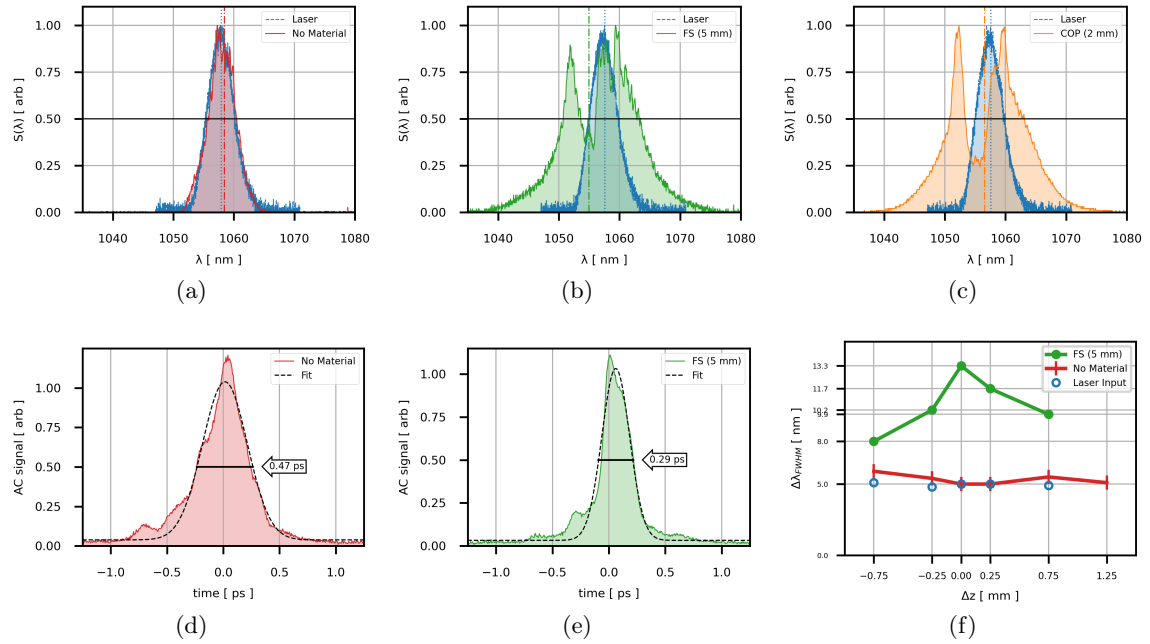


Figura 4.1: Lărgirea spectrală datorată automodulării de fază este comparată cu spectrul laserului măsurat înainte de interacția cu materialul în panourile (a)-(c) pentru diferite scenarii: fără material (roșu), FS (verde) și COP (portocaliu). Panoul (a) reprezintă spectrul pulsului inițial măsurat fără material, arătând schimbări minime în spectre. În panoul (b), un puls de 4,8 J interacționează cu 5 mm de FS, în timp ce panoul (c) ilustrează rezultatul unui puls de 3,9 J care trece prin 2 mm de COP. Măsurătorile AC, prezentate în panourile (d) și (e), furnizează rezultatele potrivirii FWHM pentru cazurile fără material ($0,50 \pm 0,05$ ps) și FS ($0,41 \pm 0,9$ ps), corespunzând la duratele ale pulsului de 0,34 ps, respectiv 0,2 ps. Panoul (f) arată lărgimea spectrală FWHM rezultată în raport cu dispersia pulsului de intrare, definită de variația distanței dintre rețelele compresorului (Δz [mm]). În absența materialului (roșu), lărgimea de bandă FWHM inițială rămâne relativ constantă la 5,1 nm, în ciuda modificărilor de distanțare a rețelelor de difracție ale laserului. Cu FS, poziția compresoarelor este optimizată când lărgimea de bandă (buline verzi) se aliniază cu lărgimea de bandă a laserului măsurată (albastru). Figurile sunt extrase din Ref. [2]

pentru aprofundarea mecanismelor precum, auto-modularea de fază, auto-focalizarea la scară mică, integrala B și pragul de distrugere indus laser.

4.2 Experimentul de la facilitatea Apollon

În acest experiment, pulsurile laser, care transportă o energie de 7 J și trec prin lamele de sticlă subțiri cu diametru mare (30 cm diametru), sunt supuse lărgirii spectrului pentru a obține o lățime de bandă potrivită pentru generarea de pulsuri de 15 fs. În plus, experimentul arată potențialul de a obține pulsuri sub 10 fs folosind o energie inițială 14 J.

Poziționarea post-compresorului în imediata apropiere a punctului de interacție oferă o abordare eficientă din punct de vedere economic, pentru a produce cele mai scurte pulsuri la energie mare. Această strategie minimizează cerința pentru optica de bandă largă cu prag de distrugere ridicat în apropierea țintei.

Unul dintre obiectivele principale ale sistemului laser Apollon este de a genera pulsuri de ordinul a 10 PW cu o energie de 150 J și o durată de 15 fs la o rată de repetiție de 1 puls pe minut. În acest experiment, linia de amplificare de 1 PW a fost folosită pentru a furniza energia de 7 J, cu o durată de puls de 25 fs la o lungime de undă centrală de 800 nm.

Am fost implicat activ în toate aspectele acestui experiment, cuprinzând pregătirea, implementarea, simularea, analiza datelor, măsurătorile și publicarea (vezi Ref. [3]).

Luând în considerare grosimea lamelelor de sticlă și unghiul acestora față de fasciculul de intrare, am putut estima o grosime efectivă de $L_i \sim 0,84$ mm. Folosind aceste valori, am estimat B-integral $B_{int} \sim 1.4$. Împreună cu parametrul de dispersie, $D \sim 0,085$, putem calcula F_ω din ecuația 4.1: F_ω din Ec. 4.1 să fie:

$$F_\omega = 1 + 0,51 B_{int} \sim 1,7$$

Raportul dintre spectrul lărgit și spectrul pulsului de intrare poate fi reprezentat ca $F_\omega = \Delta\omega_{out}/\Delta\omega_{in}$. Predicțiile privind lărgirea spectrală așteptată au fost obținute prin simulări prin fitarea unei relații liniare la parametrul B_{int} , luând în considerare în același timp GDD al materialului subțire. Dispersia vitezei de grup (GDD) tinde să diminueze răspunsul neliniar, mai ales în condițiile în care durata pulsului este lărgită în timp datorită dispersiei pozitive ($k_2 > 0$), care este tipică pentru majoritatea materialelor. Parametrul $D = L_i k_2/\tau_p^2$ ține cont de dispersia relativă și de durata inițială a pulsului. Astfel, lărgirea spectrală este dată de următoarea relație extrasă din Ref. [1]:

$$F_\omega = 1 + 0.91 B_{int} \left(1 - 1.5\sqrt{D}\right). \quad (4.1)$$

Următoarele rezultate au fost obținute pe baza aspectelor teoretice aplicate în simulări, folosind limbajul de programare python.

Figura 4.2 ilustrează spectrele pulsului pornind de la un puls de 14 J inițial la o durată de 22 fs (gri –) în comparație cu spectrul lărgit spectral ulterior (albastru -) care acceptă o durată de puls de 9 fs. După sistemul de gestionare a dispersiei (perechi de CM) care asigură compensarea GDD de -70 fs², faza spectrală este afișată în verde, punctat. Intensitatea medie a pulsului de-a lungul profilului fasciculului este dată pentru pulsul de referință (gri), pulsul lărgit în timp care iese din filmele subțiri (punctat cu roșu) și pulsul comprimat (albastru).

În această simulare, demonstrăm potențialul post-compresiei de a obține pulsuri laser cu o durată mai mică de 10 fs la energie mare. Acest experiment reprezintă unul din cele mai importante rezultate de obținere a unor astfel de pulsuri ultrascurte, după experimentul

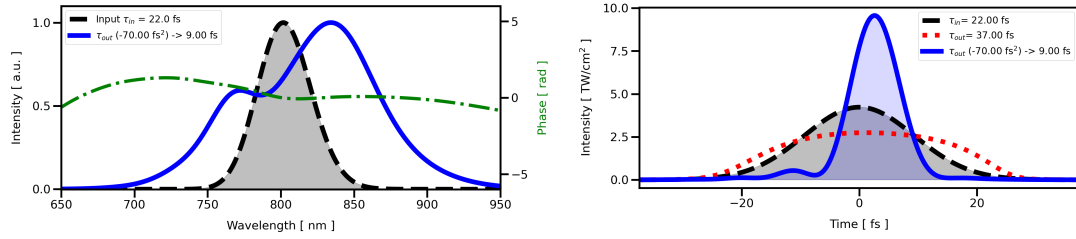


Figura 4.2: Profil spectral și temporal înainte și după postcompresie. Figura extrasă din Ref. [3].

prezentat în Ref. [4]. În această referință, energia de intrare a fost de 17 J, iar durata pulsului de intrare a fost de 74 fs, cu un diametru al fasciculului de 18 cm. Pentru a obține compresia pulsului până la 11 fs la o putere de 1,5 PW, s-au utilizat 5 mm de FS. Mai multe aspecte cheie ale acestei referințe sunt de remarcat, inclusiv utilizarea propagării libere pentru evitarea autofilamentării, utilizarea a 3 perechi de CM-uri de 20 cm (Ultrafast Innovations) și o valoare a parametrului B-integral de 19,2.

Lățimea de bandă spectrală medie măsurată după interacțiunea cu filmele subțiri a fost de 74 ± 2 nm, corespunzătoare unei durate a pulsului de aproximativ 15 fs. Acest lucru este în contrast cu pulsul de intrare original, care avea o durată optimizată a pulsului de 22 fs și o lățime de bandă de 41 ± 1 nm. Calcularea raportului dintre aceste lățimi de bandă spectrale măsurate produce $F_{\omega}^{meas} = 1,8 \pm 0,1$.

Acordul dintre valoarea măsurată și estimarea pentru materialul BK7 (0,7 mm), interacționând cu un puls de energie (6,4 J) și durată (22 fs) confirmă că pulsul final poate fi livrat la o durată optimizată către camera de interacție. De asemenea, validează ipoteza făcută cu privire la valoarea de n_2 pentru filmele de sticlă, indicând că estimările caracteristicilor pulsului atunci când se utilizează întreaga energie în experimentele viitoare sunt rezonabile.

În timpul acestui experiment, am făcut progrese semnificative în domeniul tehnicilor de post-compresie. Am demonstrat capacitatea configurației de a post-comprima pulsuri laser cu energie de 7 J și o durată ultra-scurtă de 22 fs.

Acest experiment a marcat mai multe progrese, inclusiv utilizarea fasciculului complet și a energiei complete pe eșantion, utilizarea unui nou tip de sticlă (Schott AF32eco), dimensiunea mare a sticlei (30 cm), o montură pentru sticlă care minimizează stresul indus și dezvoltarea unui algoritm pentru estimarea lărgirii spectrale. În plus, am arătat potențialul de a obține pulsuri de 9 fs cu întreaga energie a pulsurilor laser ale facilității Apollon 1 PW.

4.3 Discuții

Acest capitol prezintă rezultatele obținute din patru campanii experimentale în care a fost folosită metoda de post-compresie.

De-a lungul acestui capitol, am detaliat implementarea metodei de compresie a filmului subțire în patru facilități laser distincte. Patru configurații experimentale au fost construite și utilizate pentru a post-compresa pulsurile laser ultra-scurte, reducându-le durata de la 350 fs la 22 fs, culminând cu pulsuri laser de ieșire cu durate variind de la 200 fs până la 11 fs măsurate. Cele mai recente rezultate indică potențialul de a obține pulsuri laser apropiate de regimul cu un singur ciclu de oscilație, plecând de la o durată a pulsului de intrare de 26 fs și 2 J, demonstrând astfel o compresie de cinci ori mai mare. Studiul acestui capitol include nivele de energie de intrare variind de la 150 mJ la 7 J, făcând această cercetare relevantă pentru aplicațiile de post-compresie la energii mari.

Cei mai relevanți parametri și analize sunt rezumați în Tabelul 4.1. Celulele verzi

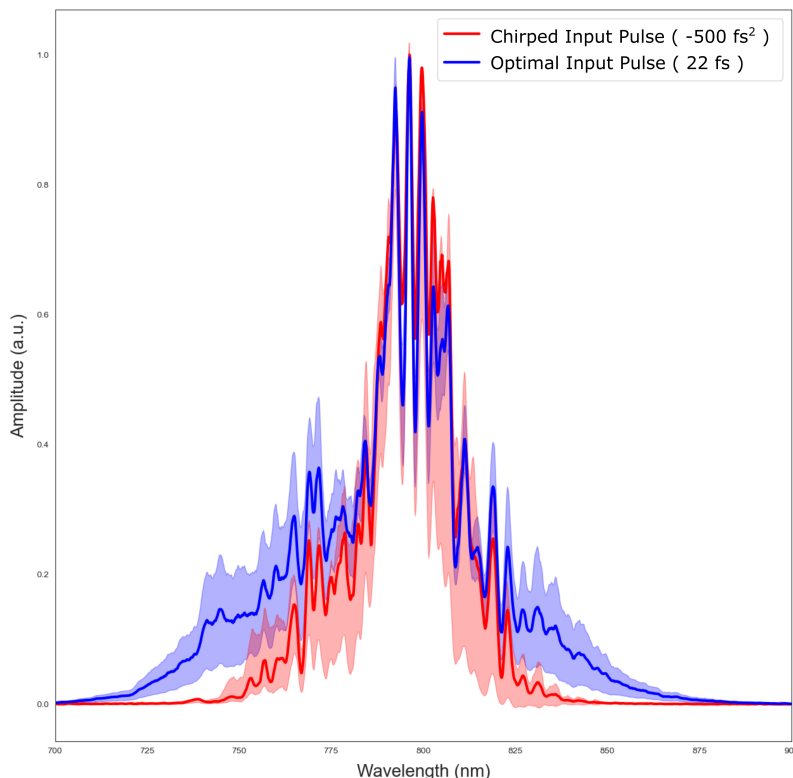


Figura 4.3: Statistică spectrală pentru referință (roșu) și lărgirea ieșirii (albastru). Figură extrasă din Ref. [3]

denotă principalele îmbunătățiri prezentate în lucrările publicate și ultimul rezultat experimental la HPLS 100 TW al ELI-NP. Campaniile experimentale prezentate în această lucrare cuprind aspecte legate de analiza temporală, spectrală, spațială și spațio-temporală. Cele mai semnificative rezultate sunt legate de studiile temporale și spectrale facilitate de utilizarea Dazzler și a spectrometrelor optice. În plus, profilul spațial (câmp apropiat, câmp îndepărtat sau focalizare) a prezentat un potențial de îmbunătățire prin aplicarea unei oglinzi deformabile. S-a demonstrat prin măsurători spațio-temporale că materialele selectate nu au introdus chirp spațial.

Simulările au indicat fezabilitatea generării de pulsuri laser care se apropie de durata unui singur ciclu de oscilație (2.7 fs) la nivelul J folosind materialul BK7 de 2 mm grosime. Realizarea pulsurilor de acest tip, poate necesita încorporarea a două etape de compresie. În plus, intensitatea în focus, în urma lărgirii spectrale, poate fi îmbunătățită prin: utilizarea de oglinzi deformabile (fie cea existentă în laser, fie o oglindă deformabilă suplimentară după etapa inițială de post-compresie), materiale polizate pe ambele fețe și poziționate la unghi Brewster.

4.4 Publicații

In publication process : **P.-G. Bleotu**, A.M. Talposi, S. Popa, R. Ungureanu, D. Matei, S. Roder, V. Bagnoud, I. Dancus, S. Amarande, J. Fuchs, J. Wheeler, G. Mourou, D. Ursescu, "Four cycles, focused post-compressed 100 TW laser pulses", Optica.

[2]. **P.-G. Bleotu**, J. Wheeler, S.Yu. Mironov, V. Ginzburg, M. Masruri, A. Naziru, R. Secareanu, D. Ursescu, F. Perez, J. DeSousa, D. Badarau, E. Veuillot, P. Audebert, E. Khazanov, and G. Mourou, "Post-compression of high energy, sub-picosecond laser pulses",

Laser	ELFIE	LASERIX	APOLLON	ELI-NP 100 TW
λ (nm)	1056	800	800	810
Energy (J)	5	0,16	7	1
T_{in} (fs)	350	45	22	26
T_{out_m} (fs)	200	23	15	11
T_{out_FTL} (fs)	124	-	9	10
T_{out_e} (fs)	-	9	9	<6
Fw_m	2,6	2,04	1,8	3,14
Fw_e	2,66	-	1,9	3,12
B-int	1,78	-	1,8	3->12
Analysis	influența B-int asupra frecvențelor NF; calitatea FF; materiale optice FS și COP; sub-ps post-compresie;	Dezvoltarea unui mecanism de rotație care permite până la 6 treceri; materiale optice FS și COP; n_2 estimat din lărgirea spectrală; Analiza lărgirii spectrale și a fluentei;	Post-compresie la scala de PW; materiale optice mari; studiul FF; algoritmi pentru estimarea lărgirii spectrale; măsurarea frontului de undă a materialelor	Metrologia completă (spațială, temporală, spectrală, spațio-temporală, pierderi de energie) a pulsurilor laser post-compresate; influența GDD și TOD SPM vs. B-int; 1-2 cicli optice cu E=2 J;

Tabela 4.1: Compararea principalelor rezultate ale experimentelor de post-compresie. Acronimele denotă m -măsurate, e -estimate

High Power Laser Science and Engineering, 11, 2023. <https://doi.org/10.1017/hpl.2023.10>

[5]. Wheeler, J.; **Bleotu, G.P.**; Naziru, A.; Fabbri, R.; Masruri, M.; Secareanu, R.; Farinella, D.M.; Cojocar, G.; Ungureanu, R.; Baynard, E.; Demailly, J.; Pittman, M.; Dabu, R.; Dancus, I.; Ursescu, D.; Ros, D.; Tajima, T.; Mourou, G. Compressing High Energy Lasers through Optical Polymer Films. *Photonics*, 9, 715, 2022. <https://doi.org/10.3390/photonics9100715>

[3]. **Bleotu, P.**, Wheeler, J., Papadopoulos, D., Chabanis, M., Prudent, J., Frotin, M.,..., Mourou, G., Spectral broadening for multi-Joule pulse compression in the APOLLON Long Focal Area facility. *High Power Laser Science and Engineering*, 10, E9, 2022, doi:10.1017/hpl.2021.61

[6]. I. Dancus, **P-G. Bleotu** et. al. "10 PW Peak Power Laser at the Extreme Light Infrastructure Nuclear Physics – status updates", EOSAM, 2022.

[7]. D. Ursescu, D. Matei, M. Talposi, V. Iancu, V. Aleksandrov, **P.G. Bleotu** et al., "First HPLS Experiments at ELI-NP: Spectral Broadening in Thin Films", *Frontier in Optics*, 2020;

Bibliografie

- [1] E. A. Khazanov, S. Yu Mironov, et al. “Nonlinear compression of high-power laser pulses: compression after compressor approach”. en. In: *Physics-Uspekhi* 62.11 (Nov. 2019). Publisher: IOP Publishing, p. 1096. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.3367/UFNe.2019.05.038564/meta> (visited on 11/09/2020).
- [2] P.-G. Bleotu, J. Wheeler, et al. “Post-compression of high-energy, sub-picosecond laser pulses”. en. In: *High Power Laser Science and Engineering* 11 (2023), e30. URL: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S2095471923000105/type/journal_article (visited on 05/02/2023).
- [3] P.-G. Bleotu, J. Wheeler, et al. “Spectral broadening for multi-Joule pulse compression in the APOLLON Long Focal Area facility”. en. In: *High Power Laser Science and Engineering* 10 (2022). Publisher: Cambridge University Press. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/high-power-laser-science-and-engineering/article/spectral-broadening-for-multijoule-pulse-compression-in-the-apollo-long-focal-area-facility/62E91CE89219A83DCAC94BEE27CD4F6F> (visited on 03/07/2022).
- [4] Vladislav Ginzburg, Ivan Yakovlev, et al. “11 fs, 15 PW laser with nonlinear pulse compression”. en. In: *Optics Express* 29.18 (Aug. 2021), p. 28297. URL: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=oe-29-18-28297> (visited on 08/23/2021).
- [5] Jonathan Wheeler, Gabriel Petrișor Bleotu, et al. “Compressing High Energy Lasers through Optical Polymer Films”. en. In: *Photonics* 9.10 (Oct. 2022). Number: 10 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 715. URL: <https://www.mdpi.com/2304-6732/9/10/715> (visited on 10/04/2022).
- [6] Ioan Dancus, Gabriel Cojocaru, et al. “10 PW Peak Power Laser at the Extreme Light Infrastructure Nuclear Physics – status updates”. In: *EPJ Web of Conferences* 266 (Oct. 2022).
- [7] Daniel Ursescu, Dan Matei, et al. “First HPLS Experiments at ELI-NP: Spectral Broadening in Thin Films”. en. In: *Frontiers in Optics* (2020), p. 2.

CAPITOL 5

Concluzii

În această lucrare, metoda Thin Film Compression (TFC) a fost dezvoltată, aplicată și caracterizată în patru campanii experimentale, demonstrându-și eficiența pentru utilizarea în facilități care utilizează pulsuri laser ultra-scurte și de înaltă energie.

Pentru a sprijini acest demers, a fost efectuat un studiu cuprinzător în *Introducere*, concentrându-se pe instalațiile laser existente, metodele lor de amplificare și duratele pulsurilor. În plus, a fost explorată starea actuală a post-compresiei atât la nivele scăzute și ridicate de energie. Această lucrare prezintă o analiză a posibilităților de a atinge puterea de vârf la nivel de Exawatt. Căile promițătoare includ dezvoltarea de noi tehnologii de rețele de difracție, explorarea regimului λ^3 , amplificarea și compresia pe bază de plasmă și integrarea post-compresiei cu amplificarea în cristale neliniare (WNOPCPA).

Post-compresia își are rădăcinile în două principii fundamentale: managementul dispersiei și optica neliniară. Optica neliniară cuprinde neliniaritățile (n_2) și auto-modularea de fază. Acești parametri au fost explorați în profunzime pentru a obține o perspectivă asupra modului în care pulsurile laser pot fi modulate în mod controlat pentru a obține o lărgire spectrală eficientă. Forma temporală a pulsului este definită în continuare prin sistemul de management al dispersiei, o componentă cheie pentru atingerea regimului cu un singur ciclu de oscilație.

Materialele optice utilizate pentru lărgirea spectrală au fost supuse unei caracterizări complete. Caracterizarea s-a concentrat pe măsurătorile efectuate la lungimea de undă centrală ($\lambda_{central} = 800$ nm), ceea ce este tipic pentru majoritatea laserelor Ti:safir, inclusiv cele utilizate în acest studiu.

Caracterizarea liniară a inclus măsurători legate de dispersie (GDD, Dispersia de ordin al treilea - TOD și faza spectrală), transmisie, rugozitatea suprafeței, compatibilitatea cu vidul și distorsiunile frontului de undă.

În plus, studiile de caracterizare neliniară au fost efectuate folosind tehnici bine definite, cum ar fi Z-scan sau I-scan, împreună cu metode bazate pe standardele ISO. Am introdus tehnici noi, cum ar fi Radius Z-scan și Image I-scan, concepute special pentru măsurarea și caracterizarea indicelui de refracție neliniară al diferitelor materiale optice. Aceste materiale au inclus sticle (FS, BK7), cât și opțiuni noi precum Zeonor, Zeonex OKP, film Apel, Topas, PolyCarbonate și PMMA. Tehnicile noi de măsurare a NRI au reprezentat o îmbunătățire față de tehnica tradițională de scanare Z-scan, oferind beneficii precum abatere standard redusă, stabilitate îmbunătățită și reproductibilitate.

Mai mult, configurația experimentală prezentată în Figura 3.2 a permis măsurarea concomitentă a neliniarităților și a pragului de distrugere indus de laser (LIDT), oferind un instrument versatil și eficient pentru caracterizarea materialelor optice.

Am adus contribuții semnificative la dezvoltarea a trei configurații complementare pen-

tru estimarea LIDT, și anume: analiza frecvențelor spațiale, analiza cu fasciculul mare (mm) și analiza Langmuir Probe-Target Current (LPTC).

Conceptul original pe care l-am dezvoltat, în spatele analizei frecvențelor spațiale, oferă informații despre orice defecte sau modificări ale profilului fasciculului în timpul iradierii cu laser. Poate fi folosit pentru a interpreta influența caracteristicilor fasciculului spațial asupra SPM și a fost dezvoltat conform standardelor LIDT ISO.

A doua metodă implică utilizarea profilelor de fascicul laser de mare putere cu distribuții diferite de energie pe suprafețele lor. Această caracteristică unică a fost valorificată constructiv pentru a iradia eșantioane cu N shot-uri într-un singur punct, crescând semnificativ setul de date statistice. Fiecare pixel din profilul fasciculului a reprezentat un loc iradiat, rezultând o expunere a peste 10^5 site-uri la teste LIDT N-on-1.

A treia metodă reprezintă o tehnică și mai eficientă din punct de vedere al sensibilității și al numărului de pulsuri folosite. Prin implementarea acestei metode, a fost demonstrată capacitatea de a estima pragul pentru un număr infinit de pulsuri utilizând testul R-on-1 cu un singur puls laser. Astfel a fost demonstrată sensibilitatea și potențialul ridicat.

Nelinariitățile măsurate și pragurile de distrugere au fost utilizate pentru a dezvolta un software ce simulează lărgirea spectrală în diferite materiale. Prin urmare, rezultatele lărgirii spectrale au fost analizate atât în domeniul temporal, cât și spectral, urmate de simularea efectelor după oglinzile CM asupra pulsului laser post-compresat de ieșire.

Expertiza dobândită atât din măsurători, cât și din simulări a fost valorificată în construirea și utilizarea a patru configurații experimentale. Aceste configurații au fost concepute pentru a realiza post-compresia pulsurilor laser ultra-scurte, reducând durata acestora de la 350 fs la 22 fs, producând în cele din urmă pulsuri laser de până la 11 fs.

Aceste rezultate evidențiază potențialul de a atinge regimul cu un singur ciclu de oscilație. Acest rezultat a fost demonstrat pentru duratele pulsurilor de intrare de 26 fs și 2 J energie, unde am aratat o compresie cu factor 5. Foarte important, acest studiu acoperă o gamă largă de nivele de energie, de la 150 mJ până la 7 J, subliniind relevanța acestei cercetări în domeniul energiilor înalte.

În această lucrare, prezint cea mai cuprinzătoare abordare metrologică pentru materiale optice și pulsuri laser post-compresate de înaltă energie. Impactul cumulativ al materialelor cu calitate optică, scurtarea duratelor pulsurilor, utilizarea oglinzii deformabile pentru îmbunătățirea punctului focal și cei doi factori cheie - Raportul Strehl temporal (TSR) și Raportul Strehl spațial (SSR) - contribuie la valoarea intensității în focus.

S-a demonstrat că cea mai scurtă durată a pulsului cu un TSR apropiat de unitate a necesitat atât compensarea GDD, cât și TOD. Aceste rezultate deschid calea pentru integrarea acestei tehnici în viitoarele experimente de interacție laser-materie, în special cele care se bazează pe intensități ce depășesc 10^{20} W/cm².

În concluzie, eforturile mele științifice de-a lungul acestor ani au cuprins diverse domenii, inclusiv ingineria laserului, dezvoltarea de configurații experimentale, caracterizarea pulsurilor laser, interacția laser-materie și detecția particulelor accelerate cu laser.

Lucrarea prezentată deține un potențial substanțial de aplicare în diverse alte facilități, demonstrând capacitatea de a crește puterea de vârf prin reducerea duratei de puls. Această concluzie este întărită de demonstrarea metodei în patru campanii experimentale.

5.1 Lista lucrărilor publicate

5.1.1 Publicații cotate ISI

Rezultatele publicate au un factor AIS acumulat de 13.5.

P.-G. Bleotu, A.M. Talposi, S. Popa, R. Ungureanu, D. Matei, S. Roder, V. Bagnoud, I. Dancus, S. Amarande, J. Fuchs, J. Wheeler, G. Mourou, D. Ursescu, "Four cycles, focused post-compressed 100 TW laser pulses", *Optica, in process*.

P.-G. Bleotu, S. Irimiciuc, A. Dumitru, D.G. Matei, R. Udrea, M.-D. Mihai, D. Craciun, O. Uteza, V. Craciun, D. Ursescu, "Exploring fs-laser irradiation damage sub-threshold behavior of dielectric mirrors via electrical measurements", *High Power Laser Science and Engineering, Submitted*

P.-G. Bleotu, J. Wheeler, S.Yu. Mironov, V. Ginzburg, M. Masruri, A. Naziru, R. Secareanu, D. Ursescu, F. Perez, J. DeSousa, D. Badarau, E. Veuillot, P. Audebert, E. Khazanov, and G. Mourou, "Post-compression of high energy, sub-picosecond laser pulses", *High Power Laser Science and Engineering*, 11, 2023. <https://doi.org/10.1017/hpl.2023.10> [**AIS=1.01; IF= 4.8**]

P.-G. Bleotu, Mihai, L., Sporea, D., Sporea, A., Straticiuc, M., Burducea, I., "Impact of 3MeV Energy Proton Particles on Mid-IR QCLs", *Nanomaterials* 13, 677, 2023. <https://doi.org/10.3390/nano13040677> [**AIS=0.71; IF= 5.3**]

Chien, A., Gao, L., Zhang, S., Ji, H., Blackman, E.G., Daughton, W., Stanier, A., Le, A., Guo, F., Follett, R., Chen, H., Fiksel, **G., Bleotu**, . . . , Takizawa, R., "Non-thermal electron acceleration from magnetically driven reconnection in a laboratory plasma", *Nature Physics*, 19, 254–262, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41567-022-01839-x> [**AIS=10.17; IF= 19.5**]

Wheeler, J.; **Bleotu, G.P.**; Naziru, A.; Fabbri, R.; Masruri, M.; Secareanu, R.; Farinella, D.M.; Cojocaru, G.; Ungureanu, R.; Baynard, E.; Demailly, J.; Pittman, M.; Dabu, R.; Dancus, I.; Ursescu, D.; Ros, D.; Tajima, T.; Mourou, G. Compressing High Energy Lasers through Optical Polymer Films. *Photonics*, 9, 715, 2022. <https://doi.org/10.3390/photonics9100715> [**AIS=0.43; IF= 2.4**]

P.-G. Bleotu, Wheeler, J., Papadopoulos, D., Chabanis, M., Prudent, J., Frodin, M., Mourou, G., Spectral broadening for multi-Joule pulse compression in the APOLLON Long Focal Area facility. *High Power Laser Science and Engineering*, 10, E9, 2022, doi:10.1017/hpl.2021.61 [**AIS=1.01; IF= 4.8**]

V.Aleksandrov, **P.-G. Bleotu**, R. Dabu, A. M Talposi, D. Matei, V. Iancu, A. Iazar, I. Dancus, R. Fabri, R. Secareanu, D. Ursescu et. al., "Upgrading design of a multi-TW femtosecond laser", *Romanian Reports in Physics*, 72, 3, 2020.

5.1.2 Proceedings

P.-G. Bleotu, S. Irimiciuc, A. Dumitru, D.G. Matei, R. Udrea, D. Craciun, I. Dancus, V. Craciun, D. Ursescu, Target current and spatial modulations analysis for LIDT measurements using fs laser irradiation, in: *Laser-Induced Damage in Optical Materials 2023*, SPIE, Dublin/Livermore, United States, 2023: p. 81. <https://doi.org/10.1117/12.2685157>

P.-G. Bleotu, A. Naziru, A.H. Okukura, S. Popa, D. Matei, A. Dumitru, C. Alexe, V.P. Iancu, A.-M. Talposi, V.C. Musat, I. Dancus, L.P. Caratas, B. Boisdeffre, T. Samoskoi, J. Takahisa, J. Wheeler, G. Mourou, D. Ursescu, LIDT station development with femtosecond pulses at ELI-NP, in: *Laser-Induced Damage in Optical Materials 2022*, SPIE, 2022. <https://doi.org/10.1117/12.2641616>.

D. Ursescu, D. Matei, M. Talposi, V. Iancu, V. Aleksandrov, **P.-G. Bleotu** et. al., "First HPLS Experiments at ELI-NP: Spectral Broadening in Thin Films", Frontier in Optics, 2020;

P.-G. Bleotu, L. Mihai, D. Sporea, "Setup for quantum cascade lasers characterization using the labview programming environment" Romanian Reports in Physics 71, 901, 2019.

5.1.3 Conferințe internaționale

P.Vasos, **P.-G. Bleotu** et al., "Magnetic resonance biomarkers for timely detection of high dose-rate radiation effects in cells", Flash Radiotherapy And Particle Therapy, 2023, Accepted.

G. Giubega, **P.-G. Bleotu**, et al., "Status of On-Going Experiments for Laser-Driven Bremsstrahlung Gamma Imaging at ELI-NP", PLASMA 2023, Poland, 2023.

L. Neagu, **P.-G. Bleotu** et al., "Diagnostics of ELI-NP - High Power Laser System including pulse front tilt correction using spatio-temporal metrology" LAPD20, Japan, 2023.

P.-G. Bleotu et al., Metrology of high energy post-compressed laser pulses, Workshop STAMPLASS, Magurele, 2023. (*2nd price* -poster competition)

P.-G. Bleotu et al., "LIDT station development with femtosecond pulses at ELI-NP", Rochester, New York, 2022.

I. Dancus, **P.-G. Bleotu** et al., "10 PW Peak Power Laser at the Extreme Light Infrastructure Nuclear Physics – status updates", EOSAM, 2022.

I. Dancus, **P.-G. Bleotu** et al., "10 PW laser systems facility at ELI-NP", ICUIL conference, South Korea, 2022.

L. Gao, **P.-G. Bleotu**, et al., "Direct measurement of non-thermal electron acceleration from magnetically driven reconnection in a laboratory plasma", APS conference, 2022

P.-G. Bleotu et al., "Post-compression experiments. Towards Exawatt lasers", ICLPR-ST conference, Romania, 2022.

A. Naziru, **P.-G. Bleotu**, et al., "Spectral Phase Characterization For Ultrashort Pulses Far From Fourier Limit Duration", ICLPR-ST conference, Romania, 2022

D. Ursescu, **P.-G. Bleotu** et al., "Prospective HPLS Developments: the Future of the Extreme Light Infrastructure", ICLPR-ST conference, Romania, 2022

P.-G. Bleotu et al., "Electron Beam Diagnosis Utilizing Fiber Bragg Gratings", PHO-TOPTICS22, Virtual conference, 2022

P.-G. Bleotu et al., "Spectra broadening for post-compression experiments. Towards the next class of Exawatt lasers", ERICE Summer School, Sicily, 2022

Y. Nakamiya, **P.-G. Bleotu** et al., "Experiment for mitigation of laser-induced contamination on the dielectric material with Oxygen injection at ELI-NP", IBWAP conference, 2022

A. Stancalie, **P.-G. Bleotu** et al., "Charged particle beam diagnostics utilizing custom designed optical fiber sensors", ICLPR-ST conference, Romania, 2022

P.-G. Bleotu et al., "Novel inspection technique for online determination of Laser Induced Damage Threshold", ELI Young Researchers DAYS conference, Magurele, 2022 (second place)

P.-G. Bleotu et al., "Experimental setup for fs-Laser Induced Damage Threshold measurements of optical films", 2022 Spring Meeting of the European Materials Research Society (E-MRS), VIRTUAL Conference, 2022

A. Naziru, **P.-G. Bleotu** et al., "Spectral Phase Characterization For Ultrashort Pulses Far From Fourier Limit Duration", High-Brightness Sources and Light-Driven Interactions Congress, 2022;

P.-G. Bleotu, et al., "Experimental setup for optical films Laser Induced Damage Threshold measurements", 13th International Conference on Physics of Advanced Materials (ICPAM-13) and the 4th Autumn School on Physics of Advanced Materials (PAMS-4) conference, Spain, 2021.

S. Zhang, **P.-G. Bleotu** et al.," Global field evolution in magnetic reconnection experiments using laser-powered capacitor coils", 62nd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics conference, November 9-13, 2020 Memphis, Tennessee;

P.-G. Bleotu et al.," Study of thin films Kerr non-linearity towards Exawatt lasers", 69th Lindau Nobel Laureate Meeting conference, Germany, 2019;

V. Aleksandrov, **P.-G. Bleotu**, D. Ursescu, Femtosecond Pulse Shortening Using Cascaded Quadratic Nonlinearities for High Temporal Contrast, CLEO Europe conference, Munich, Germany, 23-27 June, 2019

5.1.4 Patente

The collaborative work within Langmuir Probe -Target Current (LPTC) for LIDT was finalized with an invention brevet /patent.

1. S. Irimiciuc, V. Craciun, D. Ursescu and **P.-G. Bleotu** "Technique for laser induced damage threshold through synchrony measurements of compensation current and Langmuir Probe (LPTC)", no. A00534/29.09.2023

2. L. Mihai, R. Mihalcea, **P.-G. Bleotu**, M. Serbanescu and A. Stancalie "Method and in-field validation apparatus for radiometric calibration of high-spectral-resolution dual-optics spectroradiometric systems used for vegetation monitoring", no. A00240/16.05.2023

Bibliografie

- [1] ISO. *ISO 21254-2:2011*. en. URL: <https://www.iso.org/standard/43002.html>
(visited on 07/11/2023).

Mulțumiri

Dragă cititorule,

Dedic această teză profesorului laureat al Premiului Nobel Gérard Mourou, persoana care mi-a deschis această direcție și familiei mele care m-a susținut necondiționat să-mi împlinesc visele.

Aș dori să-mi exprim sincera mulțumire următoarelor persoane ale căror contribuții, sprijin și îndrumări au jucat un rol esențial în încheierea cu succes a acestei teze de doctorat.

Voi păstra mulțumirile în limba engleză pentru a fi disponibile și persoanelor din străinătate.

Coordinators of the thesis:

Daniel Ursescu and Julien Fuchs for their valuable mentorship and direction throughout this research.

Daniel Ursescu, my supervisor for both my Master's and Ph.D. theses, has been an exceptional mentor. He not only explained complex concepts and taught me, but also played a pivotal role in shaping me into a more adept and accomplished scientist. I am deeply thankful for his involvement in the post-compression field, for entrusting me with the role of co-Principal Investigator in three experiments, and for guiding me towards innovative experimental directions.

I am also indebted to Julien Fuchs, whose support and collaboration made this thesis possible under the cotutelle framework between the University of Bucharest and Institut Polytechnique de Paris. He not only welcomed me as a Ph.D. student but also engaged me in laser-matter experiments, further enriching my academic journey.

Professors and advisors:

I would like to express my deep appreciation to two mentors who have been instrumental in this journey. The first is the person who believed in me, guided me, supported me unconditionally, and to whom I dedicate this work: Professor Nobel Laureate Gérard Mourou.

I am also immensely thankful to Jonathan Wheeler, from whom I inherited the knowledge and expertise of the post-compression technique. He not only involved me in experiments but also dedicated countless hours to explain this interesting topic and assisted me in software development.

In addition, I extend my gratitude to Adrian Petris, Daniela Dragoman, Mihai Stafe, Niculae Puscas, Razvan Dabu, Emmanuel d'Humières for generously devoting their time and effort for reading and providing constructive feedback on this thesis. Their insights and support have been invaluable.

Scientific discussions and guidance:

I would like to thank to George Nemes, Jitsuno Takahisa, Vincent Bagnoud, Calin Ur, Victor Malka, Florin Negoita, Ovidiu Tesileanu, Cata Danil, Iani Mitu, Veselin Aleksandrov, Moana Pitmann, Sebastien le Pape, Eric Cormier for engaging in insightful scientific discussions that enriched or helped me to perform this work.

All of this work was made possible thanks to an exceptional team leader, Ioan Dancus, who facilitated travel for experiments, attendance at summer schools and conferences, and additional days of beamtime.

I am grateful to my scientific parents Maria and Gheorghe Dinescu for their unconditional support, pieces of advice and materials for my ideas.

Laboratory colleagues:

This thesis represents the collaborative work with an exceptional team, and I am grateful to the following individuals:

Stefan Popa, Maria Talposi, and Razvan Ungureanu for their expertise and support in spatial measurement, spatio-temporal coupling, spectrometer results, and various technical aspects of the experiments. Simon Roder for his work with temporal data provided by SPIDER. Vicentiu Iancu for wavefront measurement. Andrei Naziru for his technical support, providing the thin film roller mechanism, and the long working distance imaging system.

Dan Matei for designing the interface of the experimental setup in the optics laboratory and for all the device integration and synchronization during the experiments. Laurentiu Rusen for ns LIDT measurements in ISOTEST laboratory. Ion Valentin for all the TiO₂ materials and measurement. Gabriel Cojocaru for our collaborative work on perovskite oxides LIDT. Madalin Rosu and Yoshihide Nakamiya for their technical support within LIDT and SPM beamtimes. Stefan Irimiciuc, Valentin Craciun and Radu Udrea for their support within LPTC LIDT method, experimental work and paper writing. Sergey Mironov, Efim Khazanov and Vladislav Ginzburg for their contribution in the ELFIE campaign, for all the scientific discussion and for their valuable contribution in the post-compression method.

Andrei Stancalie, Laura Mihai, and Razvan Mihalcea for their ongoing support and collaboration within novel detection systems.

My former students, Alice Dumitru, for her contribution and help in building the experimental setups for spectral broadening and LIDT, as well as data analysis. Saidbek Norbaev for his contribution within LIDT measurements and his valuable friendship. Andrew Okukura and Vlad Musat for improving the large beam LIDT and the online image analysis algorithms.

Cristina Gheorghiu, Stefania Ionescu, and Victor Leca for their exceptional contributions in optical materials cleaning, roughness measurements, and plasma cleaning. Vojtech Horny and Paolo Tomassini for their expertise and simulations related to the perspectives of my work on post-compressed laser pulses. Optics manufacturers: LaserOptik, UltrafastInnovation, and MGM teams for their support and fruitful discussions.

The experiments conducted in Chapter IV and all the others in which I participated were supported by multiple laser teams, including Thales, ELI-NP: Operation Team (LSD), Dosimetry laboratory, APOLLON, LASERIX, ELFIE, TITAN, CETAL, INFLPR, and GSI. Travel expenses were covered by the University of Bucharest, IZEST, ELI-NP, Institut Français, and other scholarships.

Family and friends:

To my family: Robert Marian, Constantin and Elena Bleotu for all their support, love and efforts.

To my friends: Andreea S. Baltac, Ioana Fidel, Adrian Toader, Nicu Stan, Antonia Toma, Stefan Ataman, Alexandru Lazar, Mara Popovici, Nataliia Tokareva, Andrei Gra-

dinariu, Stefan and Cristina Gherghina, Rebeca A. Dumitru, Andrei C. Tudor, Alexandru and Nicoleta Diaconu, Emilia Matache, Ana-Maria Lupu, Chloe Ho, Chloé-Désirée Beugnies, Antoine Cavagna, Jaismeen Kaur.

In the end, the collective efforts of these people and many others have significantly contributed to the successful completion of this thesis, and I extend my deepest appreciation for their unwavering support and dedication.