

Raport stiintific

privind implementarea proiectului in perioada ianuarie – decembrie 2012

Activitatea A3. Implementarea sursei THz cu pulsuri scurte de mare intensitate bazata pe filamentarea in aer produsa de lungimea de pulsuri laser ultrascurte (unda fundamental).

Activitatea A4. Studiul experimental al intensitatii, formei, duratei si polarizarii campului THz

Activitatea A5. Studiul rolului pe care proprietatile filamentului de plasma il exercita asupra caracteristicilor radiatiei THz.

Activitatea A6. Studiul teoretic al imagisticii folosind ca sursa de iluminare un singur puls THz

Fiind una dintre ultimele regiuni ale campului electromagnetic (elmg) intrata in atentia stiintei si a tehnologiei, domeniul THz a devenit in ultimul timp cercetare de frontiera pentru fizica, chimie, biologie, stiinta materialelor, medicina si securitate.

Domeniile enumerate mai sus au generat foarte multe aplicatii care necesita surse THz de mare intensitate cu o largime de banda cat mai mare.

O metoda foarte atractiva de generare a pulsurilor THz de banda larga si intensitate ridicata este excitarea aerului sau a unor amestecuri de gaze nobile cu pulsuri laser de mare putere cu durate de sub 50 femtosecunde. Comparativ cu sursele THz de mare energie ce folosesc efectele nelinere ce apar in cristalele de LiNbO_3 ce sunt iradiate cu pulsuri laser avand frontul de incidenta inclinat, sursele THz ce folosesc interactia aer-puls optic sunt limitate numai de durata pulsului laser, nu au absorbtii fononice, nu prezinta dispersie, si acopera un domeniu spectral foarte larg, 0.2-30THz [1]. Cele trei geometrii de interactie care s-au impus in acest moment au fost prezentate in detaliu in faza precedenta: *i)* –excitarea cu o singura lungime de unda, crearea filamentului de plasma si generarea THz prin actiunea fortei ponderomotoare; *ii)* unda optica este focalizata pe un cristal foarte subtire de BetaBariumBorate (BBO), se genereaza armonica a II a care, ulterior, este mixata cu restul undei fundamentale, se genereaza filamentul de plasma si apoi radiatia THz prin fenomenul de mixare a 4 unde; *iii)* metoda descrisa anterior este modificata astfel incat sa se exercite un control separat al polarizarii si fazei relative a celor doua unde (fundamentala si armonica a 2 a). In plus, primului caz i se poate adauga generarea THz prin filamente lungi de plasma aflate in camp electric static. In aproximatia mixajului a patru unde, detectia radiatiei THz folosind ca senzor aerul sau diferite gaze se poate trata ca reciproca procesului de generare, adica doi fotoni ai undei fundamentale sunt mixati cu un foton THz pentru a da nastere unui foton in armonica a II a. Tehnica, recent descoperita, se numeste TFISH (THz field-induced second harmonic).

Activitatea A3 a proiectului de cercetare se refera la constructia montajului experimental de generare a radiatiei THz prin filamentare (metoda descrisa mai sus) si detectarea pulsurilor THz folosind spectroscopia THz in domeniul temporal.

Deoarece pentru generarea pulsurilor THz se folosesc pulsuri optice foarte scurte trebuie sa ne asiguram ca la trecerea acestora prin diferite medii optice (lentile, cristale dubloare, filtre, oglinzi dielectrice, oglinzi metalice, lame sfert de unda si lame jumataate de unda) durata pulsului ramane neschimbata astfel incat prin focalizarea pulsului optic si formarea filamentului generarea THz ramane la fel de eficienta. In figura 1 este prezentata schema montajului experimental. Distantele dintre elementele optice sunt importante din mai multe motive: detectia TDS impune un drum optic egal intre bratul care contine linia de intarziere si bratul care genereaza radiatia THz, fazele diferitelor unde trebuie corelate, etc.

Figura 1. Schema dimensionala a montajului experimental pentru generarea radiatiei THz

Aceste dimensiuni au rezultat din analiza propagarii fasciculelor optice si THz prin elementele optice ale montajului experimental. Am folosit doua metode de analiza: metoda "ray tracing" si metoda paraxiala. Rezultatul acestei analize se poate observa in figura 2. Montajul experimental a fost amplasat langa laserul de 17TW, laser care produce pulsuri cu durata de 25fs si energii de pana la 450mW. In figura 3 este prezentata fotografia montajului experimental. In afara de elementele montajului experimental au mai fost achizitionate aparatele care permit caracterizarea pulsurilor THz de mare amplitudine: celula Golay pentru masurarea directa a energie pulsurilor infrarosii in regiunea spectrala $300\mu\text{m}$, camera ultrarapida (200ps) pentru a studia dezvoltarea filamentelor produse de pulsurile laser, camera optice de inalta rezolutie pentru a dezvolta imagistica THz tip flash ("single shot").

Activitatea A4 a urmarit caracterizarea pulsurilor THz generate prin folosirea montajului experimental. Initial, pentru a carcteriza echipamentele folosite in derularea cercetarilor, aceste experimente au fost desfasurate pe un montaj THz TDS construit astfel incat sa folosim radiatie optica cu durata de 20fs si cu energie de 1-5 nJ. Generarea si detectia THz s-a produs prin folosirea antenelor fotoconductoare tip "fluture" si de tip matrice impreuna cu redresarea optica in cristale nelinere de tip ZnTe. Au fost testate diferite sisteme de amplificare "lock-in", a fost realizat in LabView programul de achizitie si control pentru intregul montaj experimental. In figura 4 se poate vedea spectrul temporal obtinut prin deplasarea liniei de intarziere iar in figura 5 transformata Fourier a acestuia.

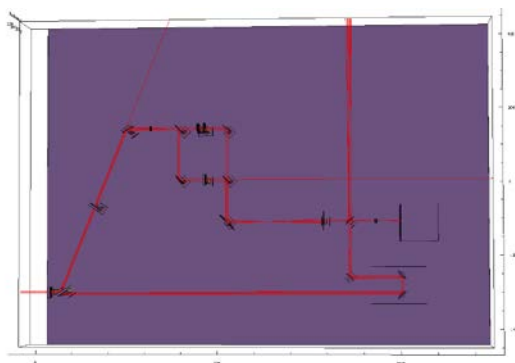
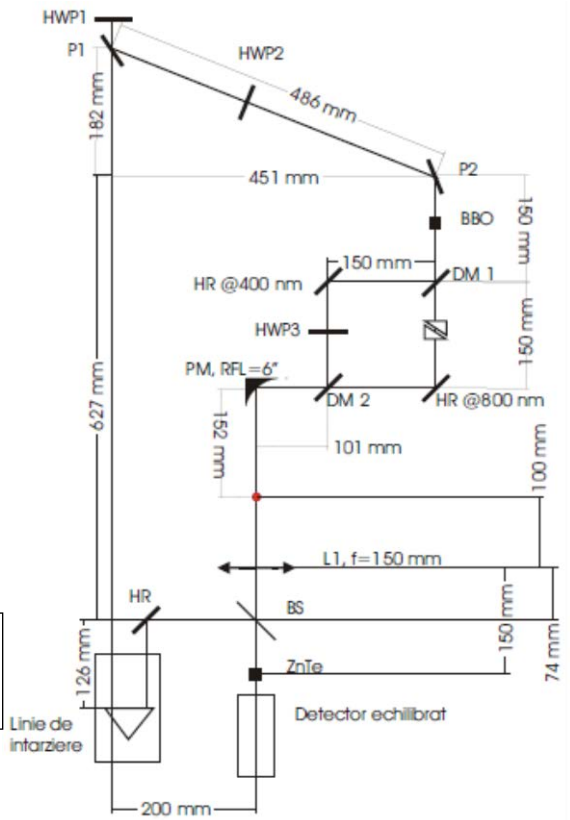


Figura 2. Ray-tracing simulation.

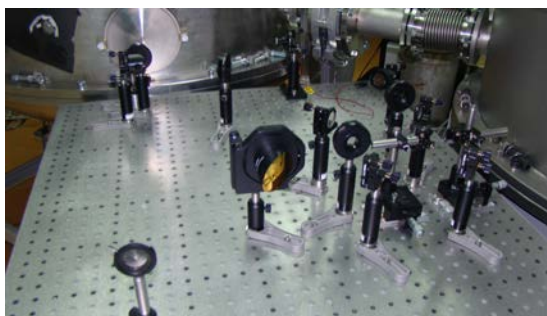


Figura 3. Montajul experimental THz -filamentare

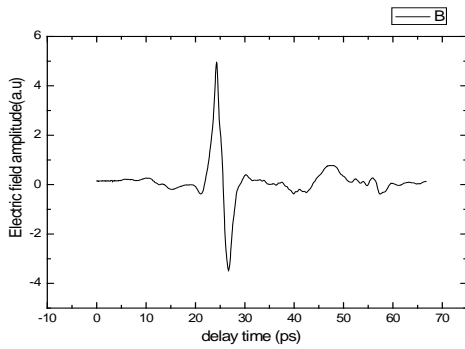


Figura 4. Spectrul temporal produs in montajul experimental de testare a echipamentului

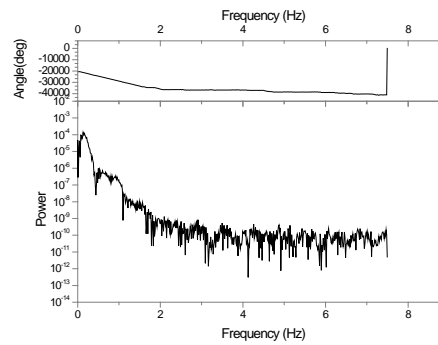


Figura 5. Transformata Fourier a spectrului temporal. Se observa ca faza este lineara numai pana la 2THz .

Activitatea 5. Fenomenul fizic al filamentarii este universal si apare in toate mediile transparente (gaze, lichide, solide). Dupa propagarea prin medii optice un puls laser (Ti:S , 800nm, fs) se converteste in lumina alba care in sectiune transversala arata ca un spot alb inconjurat de inele colorate. Filamentarea este fenomenul de propagare a unui puls laser pe distante mari (uneori zeci de metri) prin compensarea a doua fenomene opuse: autofocalizarea datorata variatiei indicelui de refractie functie de intensitatea pulsului laser si actiunea de defocalizare a plamei formate de puls in regiunea de propagare. Pentru ca acest fenomen sa se produca trebuie indeplinita relatia:

$$(\Delta n)_p \cong \Delta n_{Kerr} + \Delta n_{lens}$$

Adica:

$$\frac{4\pi e^2 N_e(t)}{2m_e \omega_0^2} \cong n_2 I + \Delta n_{lens}$$

Unde: I este intensitatea pulsului laser, n_2 este coeficientul nelinear al indicelui de refractie, Δn_{lens} este variatia longitudinala a indicelui de refractie, e reprezinta sarcina electronului, m_e masa electronului, ω frecventa plamei, N_e densitatea plamei.

Interactia pulsurilor laser ultracurte cu aerul sau cu gazele nobile include ionizarea gazelor si interactia pulsului laser cu plasma formata. Ratele de ionizare ale pulsului laser se pot calcula cu formula ADK. Pornind de la ecuatie de miscare a electronilor in plasma si tinand cont de curentul cuasi-static generat in urma pulsului laser se poate obtine ecuatiei unei elmg nou create (THz):

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{c \partial t^2} \right) \delta a = \frac{\omega_p^2}{c^2} \{ \delta a - \langle a_2(x_0, t_0) \rangle \}$$

Unde $\omega_p = 4\pi e^2 n_e / m_e$, n_e este densitatea electronilor in plasma. S-a demonstrat ca prin trimiterea unei secvente de doua pulsuri laser ultracurte (800nm) distantate temporal la mai putin de 3ns se formeaza doua filamente in aer obtinandu-se emisie THz cu un ordin de marime peste emisia uzuala ce foloseste fenomenul Cerenkov tranzient.

De asemenea, s-a demonstrat ca filamentarea multipla duce la interferente constructive foarte puternice crescand amplitudinea emisiei THz cu inca un ordin de marime. In fine, alte caracteristici ale filamentului care influenteaza atat amplitudinea cat si spectrul THz emis sunt diametrul si lungimea.

Experimental, folosind detectia electro-optica se poate verifica daca radiatia THz emisa in aer este polarizata . Posibilitatea detectiei polarizarii se datoreaza cristalului nelinier ZnTe al carui raspuns depinde de orientarea polarizarii campului THz si a polarizarii semnalului optic fata de axa optica a cristalului [0,0,1] prin relatia:

$$S_{\text{semnal}} \approx E_{\text{THz}} (\cos \varphi \sin 2\alpha + 2 \sin \varphi \cos 2\alpha)$$

Unde φ si α sunt unghiurile corespunzatoare orientarii radiatiei THz si fascicolului de proba fata de axa cristalului.

In figura 5 este prezentata fotografia unui filament in aer cu dimensiuni de 3mm lungime si jumătate de mm diametru.

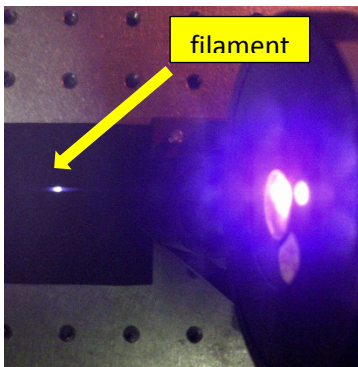


Figura 5. Filamentare generata de un puls laser de 5mJ, 800nm , 25 fs

Activitatea 6. Esantionarea formei unei THz necesita in mod uzual o serie de pulsuri THz si pulsuri de proba cu diferite intarzieri intre ele. Cu toate acestea, daca pulsul THz este suficient de intens, este posibila achizitia formei pulsului THz folosind un singur puls THz. Diferite metode pot fi aplicate pentru detectia formei pulsului THz folosind un singur puls. Aceste metode includ evaluarea formei pulsului THz prin distributia spectrala a pulsului de proba sau prin distributia spatiala a pulsului de proba. Tehnica de detectare folosind un singur puls asigura o reducere semnificativa a timpului de achizitie si extinde dramatic aria de aplicabilitate a radiatiei THz in imagistica obiectelor in miscare.

Conceptul se bazeaza pe modularea in frecventa a pulsului de proba. La fel ca intr-un montaj THz TDS standard, pulsul optic este impartit in doua parti, una folosita pentru excitare (producere THz) cealalta pentru detectia THz. Totusi nu exista o linie de intarziere intre pulsuri ci un sistem de modulatie in frecventa si alungire a pulsului de proba pana la cateva zeci de picosecunde. Modularea negativa a frecventei se face cu o retea de difractie care face ca frecventele albastre sa soseasca inaintea celor rosii. Rezultatul produs de retea de difractie este un puls mai lung cu o variatie lineara in timp a lungimii de unda. Pulsul optic si pulsul THz sunt mixate in cristalul nelinier de ZnTe. Conceptual pulsul modulat poate fi vazut ca o succesiune de pulsuri scurte fiecare cu o alta lungime de unda. Fiecare dintre aceste lungimi de unda codeaza o informatie despre o portiune diferita a pulsului THz. Un spectrometru separa spatial diferitele componente ale pulsului optic si deci reveleaza forma temporală a pulsului THz. CCD camera inregistreaza aceasta informatie care este comparata cu informatia data de camera in absenta pulsului THz. Pentru o viteza de achizitie maxima, pulsul THz si pulsul de proba pot fi expandate vertical cu o lentila cilindrica.

Presupunand ca pulsurile optice originale au o distributie Gaussiana cu frecventa central ω_0 si ca numai dispersia de ordinul doi este luata in considerare, campul electric al pulsului optic inainte de retea de difractie si dupa retea este:

$$E_0(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{T_0^2} - i\omega_0 t\right)$$

$$E_C(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{T_0^2} - i\alpha t^2 - i\omega_0 t\right)$$

unde T_0 si T_C sunt duratele pulsului inainte si dupa modulare, α este rata de modulare.

Dupa ce pulsul optic este modulat de pulsul THz campul electric al pulsului optic este:

$$E_m(t) = E_C(t) [1 + kE_{THz}(t - \tau)],$$

Unde k este factorul de modulare care indica campul electric al campului de proba care a fost afectat de pulsul THz. T denota intarzierea relativa intre pulsul de proba si pulsul THz. In cele mai multe cazuri kE_{THz} este mult mai mic decat 1. Modulatia campului de proba pentru diferite frecvente este:

$$\begin{aligned} N(\omega) &\equiv \frac{I(\omega)_{THzOn} - I(\omega)_{THzOff}}{I(\omega)_{THzOff}} \\ &= \frac{\int g(\omega - \omega) 2kE(t_\omega - \tau) \exp\left(-\frac{2t_\omega^2}{T_C^2}\right) d\omega}{\int g(\omega - \omega) \exp\left(-\frac{2t_\omega^2}{T_C^2}\right) d\omega} \\ &\propto 2kE_{THz}(t_\omega - \tau) \end{aligned}$$

Concluzii: Obiectivele activitatilor prevazute a fi desfasurate in anul 2012 au fost indeplinite. Cercetarile preliminare de folosire a imagisticii THz in biologie au fost prezentate la conferinta de specialitate TERA MIR 2012 (Workshop NATO on Terahertz and Mid IR, Turcia, Izmir) prin lucrarea intitulata "Using of THz Radiation in Related Protein Solutions Discrimination". Sunt in curs de elaborare 2 articole care folosesc rezultatele obtinute in cursul anului 2012.

Director proiect,

Traian Dascalu 