

## **Raport stiintific**

*privind implementarea proiectului in perioada ianuarie-decembrie 2015*

*Obiectivele proiectului si activitatile prevazute in anul 2015*

***Obiectiv: Dezvoltarea metodelor pentru producerea imaginilor THz 2D de inalta rezolutie folosind iluminarea cu un singur puls THz***

***Activitate: Experimente pentru determinarea influentei radiatiei THz asupra spectrelor UV-VIS emise de plasma indusa laser***

## **CUPRINS**

- 1. INTRODUCERE**
- 2. STUDIUL INFLUENTEI RADIATIEI THz ASUPRA SPECTRELOR UV-VIS EMISE DE PLASMA INDUSA LASER**
- 3. CONCLUZII**
- 4. REFERINTE**

## Introducere

In ultima vreme, radiatia THz are tot mai multe aplicatii datorita dezvoltarii a numeroase tehnici atat pentru generarea cat si pentru detectia acesteia. Sursele de emisie a radiatiei THz de banda larga si energie mare se impart in doua categorii: surse bazate pe laseri si surse bazate pe acceleratoare de particule. Cel mai des folosite sunt sursele care utilizeaza radiatia laser deoarece sursele bazate pe acceleratoare de particule fac parte din facilitati mari si sunt greu de accesat. Datorita faptului ca largimea de banda ale dispozitivelor THz precum antenele fotoconductoare si cristalele electrooptice este limitata de modurile fononice intrinseci iar rezolutia spectrala este limitata de reflexia multipla care apare la interfata detector-aer, s-au cautat alternative pentru a depasi aceste limitari folosind fenomenul de interactie a pulsurilor optice ultracurte cu plasma localizata. Astfel, au fost dezvoltate atat tehnici de emisie a pulsurilor THz de mare energie si banda larga cat si metode de detectie care folosesc ca mediu de interactie aerul evitandu-se in acest fel absorbtiiile fononice. Prin folosirea pulsurilor laser mai scurte si mai intense, domeniul spectral al pulsului THz poate fi extins pana la valori de peste 100THz la valori ale campului electric al pulsului THz de peste  $10^6$ V/m. Aceste progrese sunt deosebit de interesante pentru studierea dinamicii materialelor dar si in biologie, medicina, aviatie, etc. Spectroscopia THz de banda larga a probelor aflate la distanta mare fata de sistemul de emisie/detectie este o mare provocare pentru cercetatori deoarece raportul semnal/zgomot este foarte mic in prezenta vaporilor de apa din atmosfera. Pentru a realiza analiza spectroscopica THz la distanta (metri sau zeci de metri) este necesar sa se genereze si sa detecteze radiatia THz langa obiectul de investigat. Generarea radiatiei THz la distante de ordinul metrilor fata de ultimul element optic din sistem se poate face prin focalizarea unui fascicul laser ultracurt in aer sau alte medii gazoase urmata de filamentare si de interactia pulsului optic cu plasma aflata in filament, (1). Detectia la distanta a undelor THz a ramas in studiu pentru a fi rezolvata deoarece exista doua dificultati majore: absorbtia puternica a radiatiei THz de catre vaporii de apa din atmosfera si necesitatea colectarii semnalului THz in directia inapoi pe directia de emisie. Metodele de detectie THz conventionale, incluzand antena fotoconductoare, esantionare electro-optica si detectia coerenta in aer-plasma (ABCD) nu sunt solutii potrivite deoarece necesita detectori langa proba si colecteaza semnalul pe directia inainte. O metoda de detectare a radiatiei THz, care evita absorbtia puternica in vaporii de apa, este bazata pe interactia pulsurilor THz cu plasma generata de catre pulsurile optice intense. Fluorescenta plasmei indusa laser, modulata de unda THz, poate fi folosita ca sonda pentru investigarea informatiei cuprinse in semnalul THz. Datorita transparentei ridicate a atmosferei in domeniul UV si emisiei omnidirectionale a fluorescentei, aceasta tehnica poate fi folosita pentru analiza pulsurilor THz la distante mari.

Interactia dintre undele electromagnetice si plasma indusa laser a fost intens investigata in majoritatea regiunilor spectrale inclusiv domeniul microundelor, vizibil si razelor X. Influenta campului electric extern asupra emisiei ultraviolet (UV) a filamentelor laser a fost prima oara studziata de Sugiyama et al [2]. Aceasta tehnica este foarte sensibila la campul electric aplicat plasmei induse laser, campul electric minim detectat fiind de 5V/cm. Zhou et al [3] a investigat modulatia fluorescentei induse cu un puls laser la lungimea de unda de 532nm folosind un alt puls laser cu lungimea de unda de 1064 nm si cu durata de cateva nanosecunde. S-a observat ca valoarea maxima a amplitudinii si timpul de viata al emisiei UV sunt amplificate de fasciculul de proba al carui camp accelereaza electronii pre-existenti in plasma si ii multiplica prin efect de avalansa.

In acest raport prezentam rezultatele obtinute in vederea realizarii unui sistem de detectie la distanta a radiatiei THz bazat pe interactia dintre pulsul THz si plasma realizata prin focalizarea unuia sau mai multor pulsuri laser cu lungimi de unda diferite. Tehnica, numita emisia fluorescenta intensificata de radiatia THz (THz-REEF) este de mare interes la momentul actual.

## Studiul influentei radiatiei THz asupra spectrelor UV-VIS emise de plasma indusa laser

Schema experimentelor privind determinarea influentei radiatiei THz asupra spectrelor UV-VIS emise de aerul ionizat asimetric prin filamentarea cu pulsuri laser avand lungimi de unda diferite este prezentata in Fig.1. Montajul experimental a fost realizat astfel incat suprapunerea temporala a fasciculului laser (unda fundamentala si a armonicii a doua), creata prin propagarea pulsului laser cu durata de 80 fs si energia de 1mJ printr-un cristal  $\beta$ BBO de tipul I, sa aiba loc in zona filamentului. Campul laser in planul focal al oglinzii parabolice poate fi exprimat ca:

$$E_{opt}(t) = E_{\omega}(t) + E_{2\omega}(t) \\ = A_{\omega 0}(t) \cos(\omega t) + A_{2\omega 0} \cos(2\omega t + \phi_{\omega, 2\omega}) \quad (1)$$

unde  $A_{\omega 0}(t)$ ,  $A_{2\omega 0}(t)$  sunt anvelopele pulsurilor laser, unda fundamentala si armonica a doua. Faza relativa  $\phi_{\omega, 2\omega}$  este controlata de un compensator de faza liniar, descris in ref. (4), format dintr-o pereche de pene subtiri (30 X 20 mm, 2,89 grade si 0,2 mm grosime minima) care prezinta o acuratete a controlului de faza la nivelul attosecundelor si o lama  $\lambda/2$  pentru unda fundamentala si  $\lambda$  pentru armonica a doua.

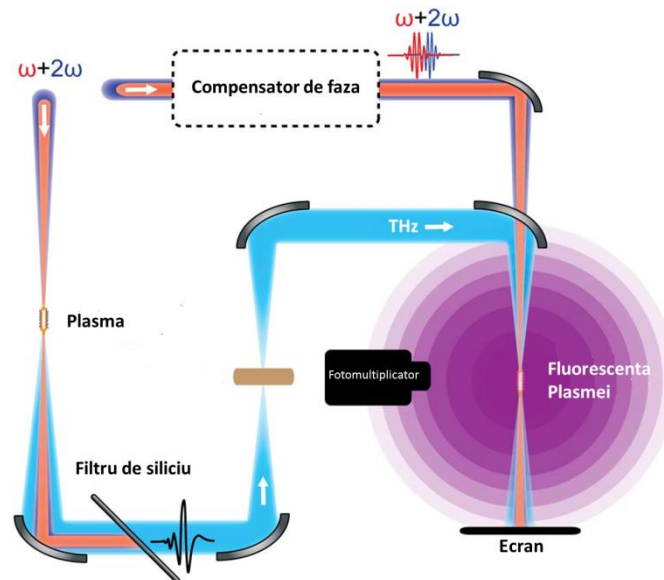


Fig.1 Montajul experimental al sistemului de spectroscopie THz. Generarea si detectia radiatiei THz sunt realizate cu ajutorul filamentelor de plasma induse laser. Albastru deschis reprezinta radiatia THz, culoarea rosie, fasciculul laser fundamental la 800 nm, fasciculul laser la 400 nm este reprezentat prin culoarea albastru inchis, iar fluorescena plasmei cu mov.

Raportul de energie dintre unda fundamentala si armonica a doua depinde de energia pulsului optic de pompaj. Cea mai mare parte din energia pulsului care intra in sistem este utilizata pentru emisia de radiatie THz prin filamentare in doua culori. Folosind doua perechi de oglinzi parabolice fasciculul THz generat de filament este directionat catre plasma generata de fasciculul de proba. Un tub fotomultiplcator cu un filtru la 354nm $\pm$ 10 nm a fost utilizat pentru monitorizarea florescena azotului la 357nm in timp ce intre pulsul optic si pulsul THz este introdusa o intarziere temporala.

In procesul de ionizare indusa laser, electronii eliberati din molecule sau atomi au o viteza de drift constanta dupa trecerea pulsului laser. Viteza de drift este determinata de faza campului laser in momentul crearii electronului liber. In cazul de fata, campul optic total al celor doua pulsuri, fundamentala si armonica a doua, genereaza electroni ionizati cu o viteza de drift asimetrica, conform ecuatiei (1) si Fig.2. Distributia vitezei de drift si traiectoriile electronilor pot fi controlate prin polarizarea si faza relativa dintre cele doua campuri optice  $\phi_{\omega, 2\omega}$ . Dupa trecerea pulsurilor laser avand lungimi de unda diferite, campul electric al pulsului THz aplicat plasmei modifica impulsul electronului

ionizat prin accelerare sau decelerare, in functie de viteza initiala a electronului. Deoarece, atat amplitudinea cat si directia campului THz afecteaza fluorescenta plasmei, informatia unei THz este codificata in schimbarea spectrului de fluorescenta la diferite intarzieri de timp  $t_d$  intre pulsul THz si pulsurile optice. Forma de unda THz poate fi regasita prin masurarea emisiei de fluorescenta dependenta de timp cand viteza electronilor este aliniata atat paralel cat si antiparalel cu campul THz,  $E_{THz}(t)$ .

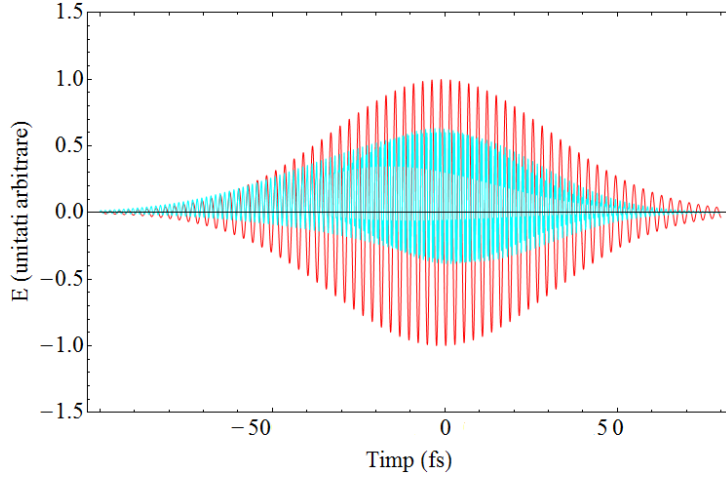


Fig.2 Albastru deschis, campul electric total al celor doua pulsuri, fundamental si armonica a doua, rosu, campul electric al fasciculului fundamental. Datorita asimetriei campului optic total electronii ionizati au o viteza de drift asimetrica.

Intensitatile fluorescetei ( $\Delta I_{FL}$ ) la diferite diferente de faza relative au fost inregistrate pentru diferite intarzieri temporale  $t_d$ , intre pulsul THz si pulsurile optice suprapuse. Distributia vitezei electronilor ionizati  $\rho(v(0), \Delta\phi_{\omega,2\omega})$  este puternic asimetrica pentru faza care genereaza cel mai mare fotocurent (schimbare de faza relativa  $\phi_{\omega,2\omega} = \pm(2l+1)\pi/2$ ), dar aproape simetrica pentru cea mai mica valoare a fotocurentului generat ( $\phi_{\omega,2\omega} = \pm l\pi$ ). Diferitele forme ale intensitatii fluorescetei indica modul in care distributia vitezei de drift a electronului initial  $\rho(v_e, \Delta\phi_{\omega,2\omega})$  afecteaza incalzirea electronului de catre campul THz si transferul energetic in coliziunea inelastica electron-molecula.  $\Delta I_{FL}(t_d, \pi/2)$  si  $\Delta I_{FL}(t_d, -\pi/2)$  s-au gasit a fi simetrice in jurul  $\Delta I_{FL}(t_d, 0)$ .

Informatia referitoare la evolutia temporala a campului THz poate fi obtinuta direct prin diferenta intensitatilor fluorescetei  $\Delta I_{FL}(\Delta\phi_{\omega,2\omega} = \pi/2)$  si  $\Delta I_{FL}(\Delta\phi_{\omega,2\omega} = -\pi/2)$ , datele teoretice fiind in concordanta cu masuratorile experimentale. Pentru interpretarea dependentei de faza a  $\Delta I_{FL}$ , s-a folosit un model semiclassical descris in ref. (5), al incalzirii electronului de catre unda THz, transferului de energie intre electron si molecula si ionizarea paturilor superioare. Deoarece masa electronului  $m_e$  este mult mai mica decat masa moleculara, energia medie transferata de electroni moleculelor la fiecare coliziune este  $(\frac{2m_e}{M})m_e v_i^2/2$  si este de ordinul meV la o temperatura a electronului de  $1 \times 10^5$  K. Emisia de fluorescenta intensificata datorita transferului de energie pe o perioada mai lunga de timp poate fi exprimata ca :

$$\Delta I_{FL}(\Delta\phi_{\omega,2\omega}) \propto n_e \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} (m_e v^2(0) + 2m_e v(0)\Delta v_1) \times \rho(v(0), \Delta\phi_{\omega,2\omega}) dv(0)/2 + m_e \sum_{i=1}^{\infty} \Delta v_i^2 \right] \quad (2)$$

unde  $n_e$  este densitatea electronilor si  $\Delta v_i = -\int_{t_i-\tau}^{t_i} e E_{THz}(t) dt / m_e$ . Termenul  $m_e v^2(0)$  este energia transferata din energia cinetica a electronului initial ce depinde de valoarea intensitatii pulsului laser. Urmatorul termen reprezinta acceleratia inainte de prima coliziune. Termenul  $m_e \sum_{i=1}^{\infty} \Delta v_i^2$  este energia transferata de la campul THz extern. Aplicand simetria  $\rho(v_e, \pi/2) = \rho(-v_e, -\pi/2)$  ecuatiei 2, obtinem:

$$\begin{aligned} & \Delta I_{FL}(\Delta\phi_{\omega,2\omega} = \pi/2) - \Delta I_{FL}(\Delta\phi_{\omega,2\omega} = 0) \\ & = -[\Delta I_{FL}(\Delta\phi_{\omega,2\omega} = -\pi/2) - \Delta I_{FL}(\Delta\phi_{\omega,2\omega} = 0)] \end{aligned} \quad (3)$$

Cum timpul de relaxare al electronului  $\tau$  ( $\sim 350$  fs) la presiunea atmosferica este mic in comparatie cu ciclul pulsului THz ( $\sim 1.5$  ps), campul THz poate fi considerat aproape constant intre coliziunile vecine. Informatia formei de unda THz obtinuta prin diferenta intensitatilor fluorescentei este descrisa prin relatia:

$$\begin{aligned} & \Delta I_{FL}(\Delta\phi_{\omega,2\omega} = -\pi/2) - \Delta I_{FL}(\Delta\phi_{\omega,2\omega} = \pi/2) \\ & \propto n_e \rho(v_e, 0) e \tau v_e(0) E_{THz} \propto E_{THz} \end{aligned} \quad (4)$$

Pentru validarea acestui model, forma de unda THz obtinuta prin diferenta a fost comparata cu forma de unda masurata cu ajutorul unui cristal de ZnTe cu grosimea de 1mm prin esantionare electro-optica (EO) si cu forma de unda obtinuta prin THz-REEF S-a observat ca formele de unda masurate prin REEF sunt in concordanta cu cele obtinute teoretic si prin EO.

**Concluzii:** Formele de unda THz obtinute folosind proprietatile fizice intrinseci ale THz-REEF din plasma indusa laser in doua culori sunt in concordanta cu formele de unda masurate prin alte metode, in cazul de fata EO folosind un cristal de ZnTe. Dependenta temporala a THz-REEF poate fi modificata prin schimbarea fazei relative intre campurile celor doua pulsuri si polarizarile lor, oferind o abordare unica pentru detectia amplitudinii si fazei undei THz. Datorita emisiei omnidirectionale a fluorescentei si absorbtiei minime a radiatiei THz in aer, aceasta tehnica face posibila spectroscopia THz la distanta.

#### **Bibliografie:**

1. *Remote THz wave sensing in Ambient Atmosphere.* **Dai, J M, și alții.** 4, 2009, Terahertz Science and Technolgt, Vol. 2, pg. 131-143.
2. *Laser filament induced corona discharges and remote measurements of electric fields.* **Sugiyama, K, și alții.** 2009, Optics Letters, pg. 2964-2966.
3. *Revival of femtosecond laser plasma filaments in air by nanosecond laser.* **Zhou, B, și alții.** 14, 2009, Optics Express, Vol. 17, pg. 11450-11456.
4. *Terahertz wave generation from gas plasma using a phase compensator with attosecond phase-control accuracy.* **Dai, J și Zhang, X -C.** 2009, App. Phys. Letter, Vol. 94.
5. *Broadband terahertz wave remote sensing using coherent manipulation of fluorescence from asymmetrically ionized gases.* **Liu, J, și alții.** 2010, Vol. 4, pg. 627-631.

Colectiv de lucru  
Oana Grigore  
Mihai Dinca  
Razvan Ungureanu  
Gabriel Cojocar

Director de proiect,  
Traian Dascalu