

Raport stiintific sintetic

pe intreaga perioada de executie a proiectului 2011-2016

Pulsuri TeraHertzi ultraintense obtinute in plasma generata de pulsuri laser ultracurte , de mare intensitate

Ca domeniu al spectrului electromagnetic, incomplet exploatat datorita dificultatilor tehnologice, domeniul de frecventa 0,1 – 10 THz a devenit un subiect interesant pentru cercetare in fizica si extrem de activ cu privire la aplicatii in chimie, biologie, stiintele materialelor si medicina. Recent, progresele semnificative in domeniul stiintei si tehnologiei THz au deschis o gama larga de potentiale oportunitati in cercetare pentru aplicatii incluzand analiza codului genetic, imagistica la nivel celular, senzorii chimici/biologici, detectarea componentelor explozive, imagistica tomografica, etc. Acestea au ridicat cercetarea THz de la o obscuritate relativa la o stiinta in plin avant aflata la granita mai multor domenii de cercetare.

Acest proiect si-a propus sa continue cercetarea asupra generarii radiatiei THz prin focalizarea in aer a pulsurilor laser ultracurte, ca sursa THz ce produce campuri electrice intense de ordinul MV/m, si realizarea de experimente preliminare de imagistica utilizand un singur puls THz. Obiectivele principale au ca scop producerea unor rezultate cu impact major asupra obinerii emisiei undelor THz ultraintense cu aplicatii in arii variate:

- A. Dezvoltarea si optimizarea emisiei pulsurilor THz ultracurte, intense si de banda larga prin filamentarea intr-o culoare sau in doua culori a pulsurilor ultracurte(femtosecunde) in diferite medii gazoase.
- B. Studiul radiatiei THz (forma pulsului, continutul spectral,polarizare) produsa prin filamentare laser sau multifilamentare.
- C. Dezvoltarea metodelor pentru realizarea imagisticii THz 2D de inalta rezolutie in experimente de tip "single-shot".

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

Cu scopul de a dezvolta si optimiza emisia pulsurilor THz s-a realizat un studiu teoretic cu privire la generarea radiatiei THz de banda larga prin focalizarea pulsurilor ultracurte in diferite medii gazoase. Exista trei configuratii diferite ale interactiei pulsuri-optice gaz (aer sau gaze inerte) pentru generarea radiatiei THz intense in aer. Figura 1 ilustreaza schematic cele trei geometrii principale pentru emisia undelor THz prin focalizarea unui fascicul optic in aer. Prima aproximatie reprezinta focalizarea unui fascicul laser de 800 nm sau 400 nm cu durata pulsului de 100 fs in aer in vederea crearii plasmei necesare formarii radiatiei THz, asa cum este prezentat in figura 1(a). A doua aproximatie in care dupa lentila de focalizare este plasat un cristal de beta-BBO (beta borat de bariu) este prezentata in figura 1(b). Cea de-a treia configuratie, prezenta in figura 1(c), combina fasciculele de 800nm si 400 nm (fundamental si armonica sa secundara) cu ajutorul unei oglinzi dicroice care asigura controlul coerent al radiatiei THz prin interferenta constructiva sau distructiva a doua fascicule.

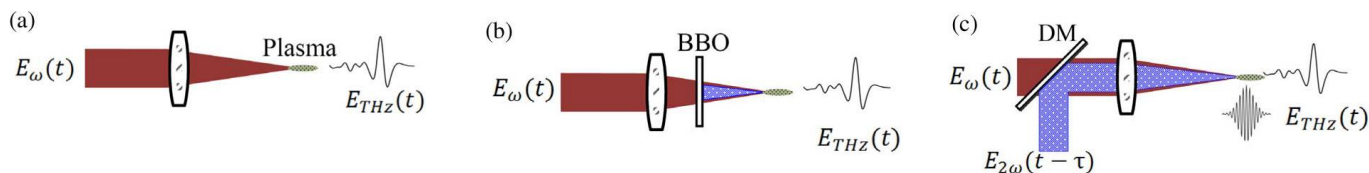


Figura 1. Diagramele celor trei setup-uri experimentale. (a) Un fascicul optic pulsant ($E_{\omega}(t)$) generează plasma, în aer, în focarul lentilei; acest filament de plasma ionizat optic emite radiație THz de bandă largă, în care generarea de unde THz este datorată forței ponderomotore. (b) Introducerea unui cristal optic neliniar, cum ar fi un cristal de beta BBO de 100 micrometri grosime, după lentila, generează armonica a doua care se va co-propaga cu unda fundamentală, fiind apoi mixate printr-un proces optic neliniar de ordin trei pentru a crea unde intense THz. (c) O oglindă dicroică combină cea de-a doua armonica cu unda fundamentală. Faza, amplitudinea și polarizarea ambelor fascicule pot fi controlate individual. Când fasciculul fundamental este mixat cu cea de-a doua armonica a sa, se observă unde foarte intense THz. Polarizarea unei THz poate fi controlată prin schimbarea fazei, adică prin intermediul timpului de întârziere, dintre cele două unde optice.

În cazul unei singure unde (proces denumit filamentare într-o culoare), generarea radiației THz este atribuită distribuției spațiale neomogene a energiei ponderomotore a electronilor liberi în regim relativist sau mixarea a patru unde în aer.

În cazul filamentării în două culori, emisia radiației THz este datorată asimetriei câmpului laser rezultat prin mixarea câmpului laser fundamental (800 nm) cu câmpul laser al armonicii a doua (400 nm).

În urma acestui studiu s-a observat că emisia undelor THz prin plasma indusă laser cu două culori (800 și 400 nm) poate fi controlată coerent prin faza relativă dintre cele două fascicule optice (800 și 400 nm). Acest lucru face posibilă modularea undelor THz intense folosind metoda optică, fenomen care era considerat imposibil până nu de mult.

Spectrul de emisie THz se schimbă dacă se schimbă faza relativă dintre cele două fascicule; spectrul radiației THz emise fiind dependent de faza. Chiar dacă susceptibilitatea neliniară de ordin trei a gazului este ridicată aceasta nu garantează o eficiență sporită a emisie THz.

Cunoscând condițiile de generare a undelor THz, s-a trecut la etapa de construcție a montajului experimental atât fizic cât și utilizând programe specializate pentru analiza trecerii pulsurilor optice foarte scurte prin elementele optice utilizate în montaj (lentile, cristale dubloare, filtre, oglinzi dielectrice, oglinzi metalice, lame sfert de undă și lame jumătate de undă) astfel încât durata pulsului să rămână neschimbată. Aceasta caracteristică este foarte importantă pentru procesul de filamentare dar și pentru eficientizarea emisie.

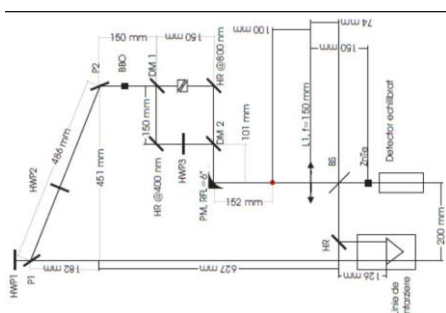


Figura 2. Schema dimensională a montajului experimental pentru generarea radiației THz

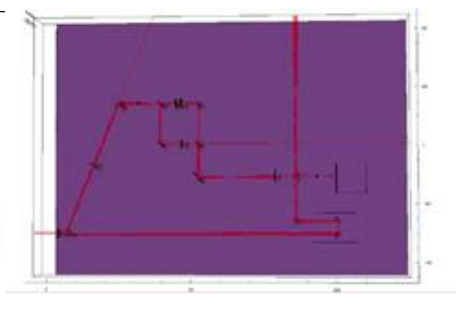


Figura 3. Ray-tracing simulation.

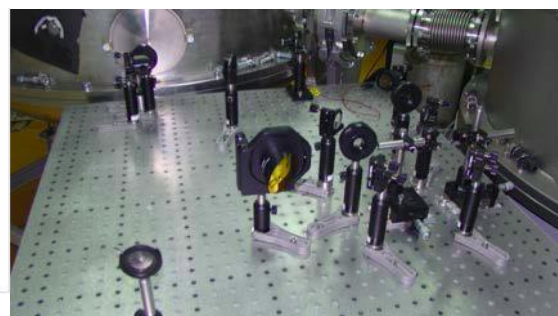


Fig.4 Montajul experimental THz filamentare

În figura 2 este prezentată schema montajului experimental. Dimensiunile prezente au rezultat din analiza propagării fasciculelor optice și THz prin elementele optice ale montajului experimental. Distanțele dintre elementele optice sunt importante din mai multe motive: detecția TDS impune un drum optic egal între bratul care conține linia de întârziere și bratul care generează radiația THz, fazele diferitelor unde

trebuie correlate, etc. Rezultatul analizei utilizand metoda "ray tracing" se poate observa in figura 3. 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 4 este prezentata fotografia montajului experimental.

Folosind un montaj THz TDS construit astfel incat sa folosim radiatie optica cu durata de 20fs si cu energie de 1-5 nJ, pulsurile THz au fost caracterizate. In figura 5 se poate vedea spectrul temporal obtinut prin deplasarea liniei de intarziere iar in figura 6 transformata Fourier a acestuia.

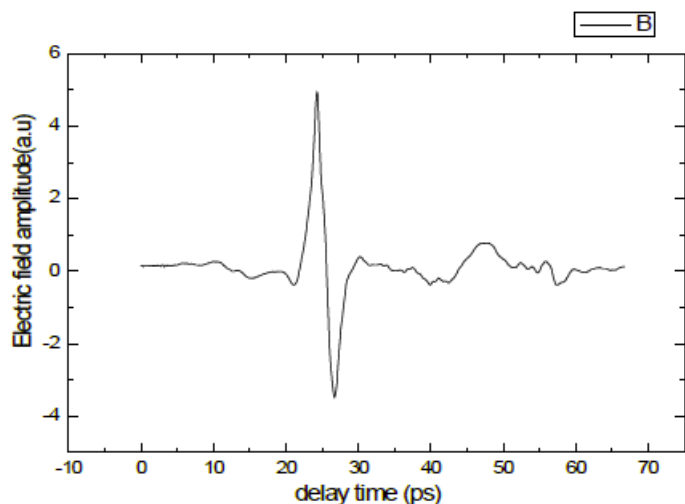


Figura 4. Spectrul temporal produs in montajul experimental de testare a echipamentului

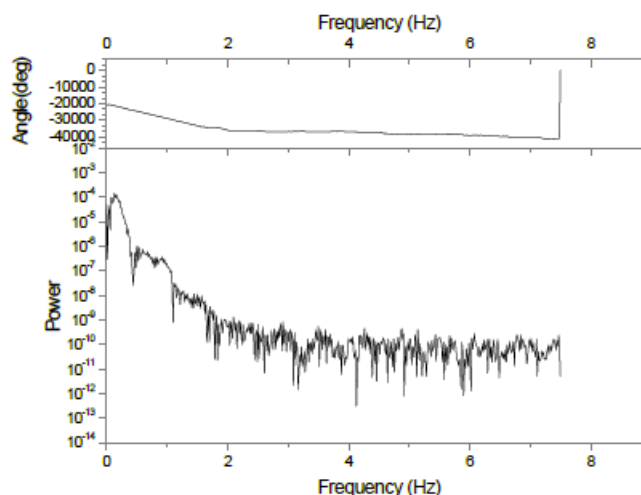


Figura 5. Transformata Fourier a spectrului temporal. Se observa ca faza este lineara numai pana la 2THz .

S-a realizat totodata si un studiu referitor la rolul pe care proprietatile filamentului indus laser il exercita asupra caracteristicilor radiatiei THz. Fiecare caracteristica, precum difractia, defocalizarea spatio-temporala, dispersia vitezei de grup, efectul de lentila Kerr, autofocalizarea, colapsarea, fotoionizarea, defocalizarea provocata de plasma, rezervorul de energie de fond, auto-filtrarea modurilor spatiale, etc, au fost discutate amanuntit in vederea impiedicarii colapsului si limitarii intensitatii campului THz.

Mecanismele fizice care stau la baza generarii radiatiei THz au fost descrise cu ajutorul a doua modele: modelul mixajului de patru unde si modelul curentului de drift. Primul model descrie fenomenul din punct de vedere macroscopic iar cel de-al doilea din punct de vedere microscopic.

Utilizand montajul din figura 3, s-a desfasurat o munca experimentală intensă care a avut ca scop determinarea parametrilor experimentali care sa permita generarea pulsurilor THz de banda larga si energie mare cu parametri controlabili. Dificultatile experimentale, legate indeosebi de duratele foarte mici ale pulsurilor laser si necesitatea suprapunerii lor atat spatial cat si temporal, au fost depasite prin imaginarea unor metode de investigare noi (ex. determinarea suprapunerii temporale prin generarea armonicii a 3 a in aer). Activitatile desfasurate sunt listate mai jos:

a) determinarea efectului diametrului fascicolului laser si al aperturii numerice a lentilelor de focalizare asupra formei si continutului spectral al filamentului

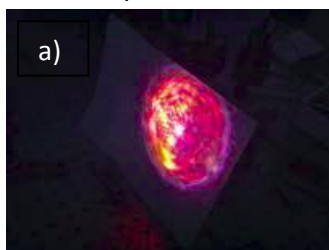
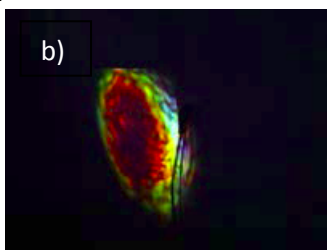
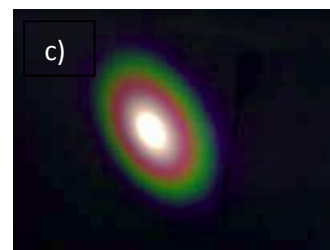


Fig.6 a) Filamentare in aer



b) Emisie supercontinuuă in aer



c) Emisie supercontinuuă in quart

S-a observat ca pentru aperturi numerice mai mari de 0,025 nu s-a obtinut decat fenomenul de fotoionizare in aer(fig 6a) si pentru aperturi numerice mai mici de 0,025 s-a pus in evidenta emisia supercontinuu atat in aer cat si in quart. (fig.6b si c).

b) metoda de optimizare a suprapunerii temporale a pulsului laser FW si SH.

Pentru emisia radiatiei THz prin filamentare laser in doua culori este importanta suprapunerea temporala si spatiala a fasciculului fundamental si a armonicii a doua. Pentru realizarea suprapunerii temporale a fasciculului fundamental si a armonicii a doua s-a modificat montajul experimental existent (fig.7) prin introducerea unui linii de intarziere pe bratul fasciculului fundamental, drumurile geometrice ramanand egale pe cele doua brate.

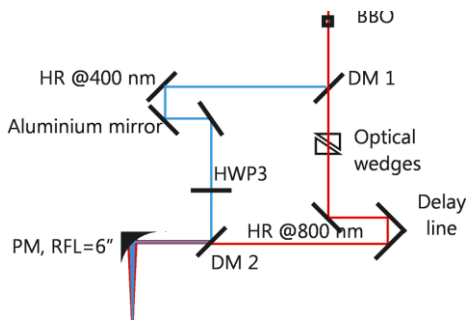


Fig.7 Sistemul utilizat pentru obtinerea suprapunerii temporale a celor doua fascicule

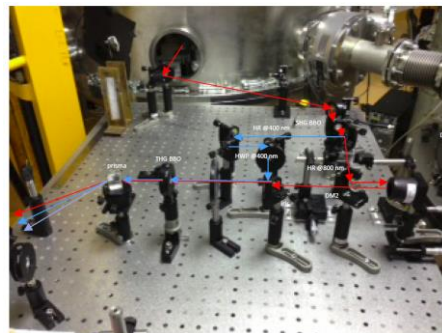


Fig.8 Sistemul utilizat pentru generarea de sumare de frecventa

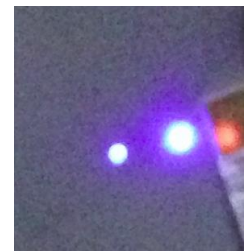


Fig.9 Generarea de armonica a treia

Suprapunerea temporala a celor doua fascicule a fost pusa in evidenta prin fenomenul de mixare a trei unde (fig.8 si fig.9). Prin procesul de mixare a trei unde intr-un cristal neliniar rezulta generarea armonicilor atat pentru o unda cat si pentru cealalta, generarea sumei si diferentei de frecventa si rectificarea optica. Toate aceste unde nu sunt generate neaparat decat daca este indeplinita conditia de acord de faza. Pentru a realiza aceasta cerinta a fost nevoie de anumite conditii de lucru legate de polarizarile fasciculelor laser si elementele optice folosite (prisma de quart si unghiul de taiere al cristalului de beta borat de bariu).

c) metodica de realizare a suprapunerii spatiale a pulsurilor optice FW si SH.

Suprapunerea spatiala s-a realizat utilizand o apertura in apropierea focarului lentilei astfel incat fotodioda din spatele acesteia sa masoare maximul amplitudinii semnalului. Dupa ce s-a facut alinierea fasciculului fundamental, armonica a doua a fost suprapusa peste FW cu ajutorul ultimelor oglinzi de pe bratul care dirijeaza pulsul optic cu lungimea de unda de 400nm.

d) detectia THz FS EOS esantionarea electrooptica in spatiul liber

Dupa suprapunerea temporala si spatiala a celor doua fascicule s-au aliniat oglinzile parabolice. Prima oglinda parabolica s-a folosit pentru colimarea radiatiei THz iar cea de-a doua oglinda pentru focalizarea radiatiei THz pe cristalul de ZnTe. A doua oglinda parabolica este gaurita astfel ca putem trece fasciculul fundamental prin ea in vederea realizarii detectiei electro-optice. Pentru detectia electro-optica mai este necesara o linie de intarziere pe bratul care conduce pulsul optic FW folosit pentru detectie. Pe masuta de translatie am pus doua oglinzi pe care le-am aliniat cu un laser cu HeNe astfel incat fasciculul optic FW sa nu se deplaseze stanga-dreapta sau sus jos.

Pentru detectia radiatiei THz trebuie ca fasciculul THz si cel IR sa fie suprapuse temporal. Aceasta suprapunere s-a realizat inregistrand figura de interferenta a celor doua fascicule fundamentale de pe cele doua brate (emisie si detectie)cu ajutorul unei camere CCD (fig.10), tinand cont de lungimea de coerenta dintre radiatia THz si fasciculul IR. Camera web a fost pozitionata in locul cristalului de ZnTe

Dupa realizarea suprapunerii temporale a radiatiei THz si a fasciculului IR, am echilibrat cele doua fotodiode ale detectorului si am introdus cristalul de ZnTe in vederea detectarii radiatiei THz. Ulterior s-a realizat programul pentru deplasarea liniei de intarziere precum si programul de achizitie a datelor.

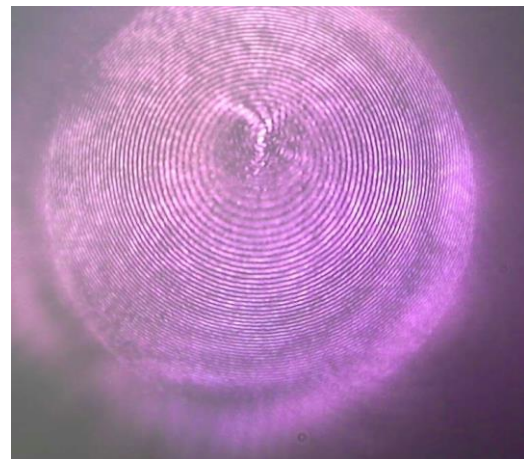


Fig.10 Interferenta celor doua fascicule fundamentale (80 fs durata pulsurilor) dupa propagarea prin sectiunea care genereaza pulsuri THz si prin sectiunea de detectie THz

Specificatiile pulsurilor THz masurate in urma realizarii tuturor activitatilor descrise mai sus, sunt:

- energia pulsurilor THz: $1.7 \mu\text{J}/\text{pulse}$
- taria campului THz: $600\text{kV}/\text{cm}$
- domeniu spectral: $0.2 - 8 \text{ THz}$ ($3 \text{ mm} - 37.5 \mu\text{m}$)
- polarizare S-polarizata

Desi intensitatea unei terahertzi a fost imbunatatita substantial prin utilizarea tehnologiei a doua lungimii de unda (folosind atat unda fundamentala cat si a II armonica) eficienta de conversie globala este inca foarte scazuta. Mare parte din energia pulsului laser nu este convertita in radiatie THz. Astfel, exista o necesitate esentiala pentru cresterea eficientei de conversie prin emisia coerenta a radiatiei THz prin filamentare multipla. Trenurile de pulsuri THz de mare putere, datorate intarzierii intre doua pulsuri optice, au fost obtinute prin rectificare optica sau focalizarea in aer a fasciculului fundamental. Scopul experimentelor a fost producerea de pulsuri THz de energie mare din multiple filamente de plasma consecutive.

Filamente multiple intarziate unul fata de celalalt in domeniul 1-100 ps sunt generate prin focalizarea pulsurilor laser ultra-scurte in aer. Deoarece tehnologia din ziua de azi ce vizeaza laserii in pulsuri ultra-scurte nu poate livra laseri in pulsuri cu energii mari care sa aiba o asemenea rata de repetitie, atunci pulsurile laser, provenite de la fasciculul fundamental si de la cea de-a doua armonica a sa, au fost impartite in cateva sub-pulsuri, fiecare avand destula energie sa produca filamentare. Sunt cateva optiuni pentru generarea sub-pulsurilor dintr-un singur puls laser. O optiune este impartirea continutului spectral al pulsului in doua regiuni si inserarea unui decalaj temporal intre ele (fig11). Astfel se obtin doua sub-pulsuri laser mai lungi decat pulsul laser original. O alta metoda se bazeaza pe reflexii multiple pe ansamblu format dintr-un divizor de fascicule pelicula ce prezinta un coeficient de reflexie sensibil la polarizarea fasciculului laser si o oglinda (fig.12).

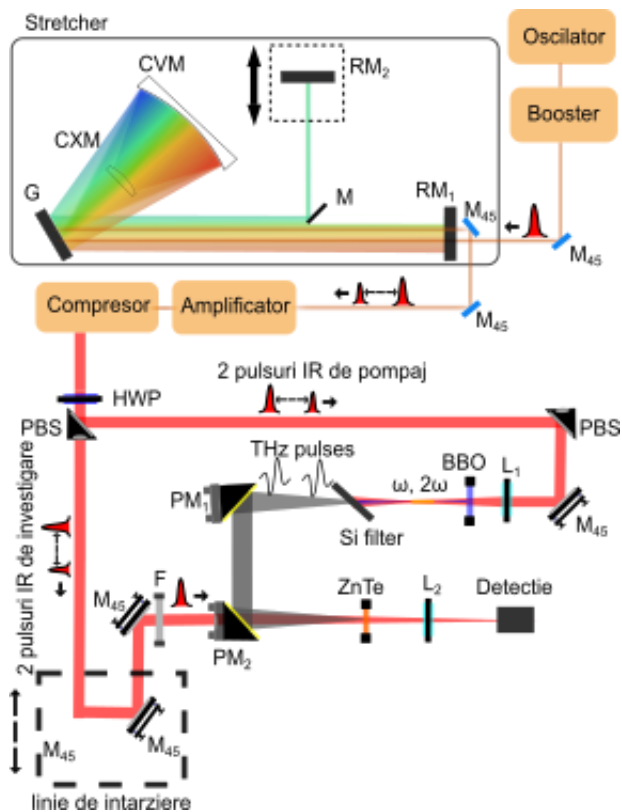


Fig.11 Montaj experimental folosit pentru generarea a doua pulsuri THz consecutive; RM_1 si RM_2 – oglinzi de tip roof, G – retea de difracție, CXM – oglinda convexa, CVM- oglinda concava, M – oglinda de banda larga cu reflectivitate mare, F – filtru trece banda, HWP- lama semiunda, PBS – divizor de fascicule, M_{45} – oglinda plana aurita, BBO – cristal de Beta Barium Borate, Si – filtru de siliciu, PM – oglinda parabolica aurita, ZnTe – cristal de ZnTe, L_1 si L_2 – lentile, Detectie – detector echilibrat Z-Omega ABL-100.

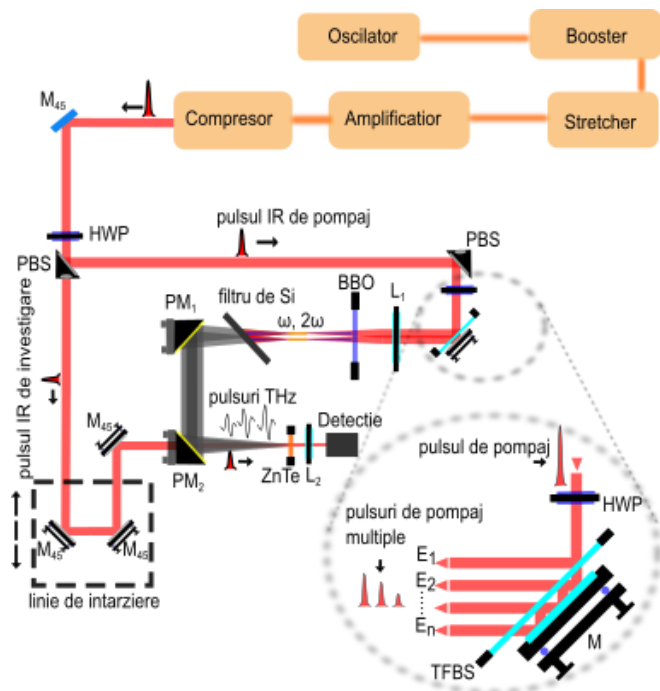


Fig.12 Montaj experimental folosit pentru generarea radiatiei THz folosind metoda TFBS; HWP- lama semiunda, PBS – divizor de fascicule, M_{45} – oglinda plana aurita, TFBS – divizor de fascicule de tip pelicula, BBO – cristal de Beta Barium Borate, Si – filtru de siliciu, PM – oglinda parabolica aurita, ZnTe – cristal de ZnTe, L_1 si L_2 – lentile, Detectie – detector echilibrat Z-Omega ABL-100.

Prima abordare experimentală utilizează divizarea spectrală a fasciculului în interiorul strecher-ului optic a sistemului laser CPA (fig.11). Largimea spectrului de 40 nm a pulsului fundamental este împartită în două părți prin inserarea parțială a unei oglinzi mobile în domeniul spectral al fasciculului. Un decalaj temporal între cele două fascicule este obținut cu ajutorul unei linii de întârziere. Folosind această configurație este posibilă atât modificarea bilanțului energetic între sub-pulsuri prin ajustarea poziției spectrale a oglinzii cât și durata decalajului temporal. Cum fiecare puls laser constă din două sub-pulsuri, sunt produse două filamente coliniare, fiecare generând un puls THz cu aceeași întârziere temporală ca și sub-pulsurile fasciculului fundamental. Această metodă a fost aplicată cu succes și în alte lucrări. S-a constatat că ajustarea raportului energetic al sub-pulsurilor laser determină modificarea raportului energiilor pulsurilor THz. Deoarece filamentele consecutive au loc în aceeași regiune, această metodă este adecvată pentru studierea interacțiunii dintre plasma primului filament și câmpul THz emis de al doilea, deoarece timpul de întârziere (de la una până la sute de ps) este mai mic decât timpul necesar pentru relaxarea completă a ionizării, care este estimat a fi de ordinul zecilor de nanosecunde.

Un ansamblu format dintr-un divizor de fascicule pelicula sensibil la polarizare și o oglindă dielectrică cu reflectivitate mare a fost folosit, în vederea obținerii sub-pulsurilor optice dintr-un singur puls laser, în cea de-a doua abordare experimentală (fig.12). Mai multe sub-fascicule paralele sunt sintetizate din fasciculul principal, rezultând în sub-pulsuri consecutive separate egal în timp. Distribuția de energie între diferite fascicule optice este controlată cu ajutorul unei lame semi-onde în timp ce întârzierea poate fi ajustată prin distanța dintre divizorul de fascicule pelicula și oglindă. Doar pulsurile optice ce au o putere mai mare decât puterea de prag vor genera filamente de plasma. Cu creșterea energiei totale, mai

multe sub-pulsuri depasesc pragul de filamentare si in consecinta mai multe pulsuri THz pot fi observate. Intensitatea fiecarui puls THz depinde de energia sub-pulsului care formeaza filamentul. Energia totala THz emisa prin filamente multiple consecutive a fost masurata si comparata cu energia THz generata de un singur filament pentru aceeasi energie totala de pompaj. Rezultatele arata ca peste o anumita energie de pompaj, energia THz furnizata de pulsurile multiple depaseste energia produsa de un singur filament, pentru aceeasi energie de pompaj. Saturarea generarii radiatiei THz este puternic corelata cu conditia filamentului de plasma.

Pulsuri THz consecutive de mare energie separate de intervale de timp intre una si sute de picosecunde au fost generate pentru prima oara prin filamentare in doua culori in aer. Pulsurile THz au fost generate prin filamente de plasma consecutive produse de sub-pulsuri laser cu un raport energetic si un decalaj temporal controlat. Aceste metode folosite pentru divizarea pulsului laser, numite taierea spectrala si TFBS, ofera diferite caracteristici pulsurilor THz multiple. Metoda taierii spectrale produce doua filamente coliniare cu intarziere variabila care permite studiul influentei primului filament asupra radiatiei THz emise de cel de-al doilea. Metoda TFBS arata o cale de a trece peste energia de saturare a emisiei THz care are loc intr-un filament produs de un singur puls laser. Pulsurile THz de mare energie ce acopera domeniul de picosecunde promit a avea aplicatii mari in genetica, medicina si post-accelerarea protonilor accelerati cu laser. 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.

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. Astfel, 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 unui sau mai multor pulsuri laser cu lungimi de unda diferite, sunt prezentate. Tehnica, numita emisia fluorescenta intensificata de radiatia THz (THz-REEF) este de mare interes la momentul actual.

Utilizand montajul experimental descris in figura 12, fara a mai utiliza polarizorul necesar pentru producerea de pulsuri multiple, s-au realizat masuratori ale intensitatii fluorescentei plasmei cu ajutorul unui tub fotomultiplicator. Sa ajuns la concluzia ca 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 temporală 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 unde THz. Datorita emisiei omnidirectionale a fluorescentei si absorbtiei minime a radiatiei THz in aer, aceasta tehnica face posibila spectroscopia THz

la distanta. Aceasta metoda de detectie putand fi utilizata si pentru sursele de radiatie THz generate folosind metodele descrise mai sus.

Pentru optimizarea eficientei de emisie a undelor THz, fie ca sunt produse prin filamentarea in doua culori folosind un singur puls laser de pompaj fie ca sunt produse folosind pulsuri laser multiple, un studiu teoretic si experimental a fost realizat privind dimensionarea pulsurilor THz.

Studiul teoretic a investigat campul electromagnetic generat de suprapunerea unei fundamentale si armonica a II a. Acesta depinde de amplitudinea pulsului laser fundamental care trece prin cristalul nelinear BBO (Beta Barium Borat) si poate fi descompusa in doua unde ortogonale, $E_{\omega o}$ si $E_{\omega e}$, polarizate in lungul axei ordinare ($\hat{o}$) si respectiv extraordinare ($\hat{e}$) a cristalului, de amplitudinea armonicii a doua a pulsului optic ce ia nastere prin acord de faza de tipul I si este polarizata in lungul axei $\hat{e}$, de α (unghiul dintre polarizarea fasciculului fundamental si axa $\hat{e}$ a cristalului), de φ (intarzierea de faza dintre $E_{\omega e}(t)$ si $E_{\omega o}(t)$ dupa propagarea prin cristalul de BBO cu grosimea l) si deasemenea de θ (faza relativa dintre $E_{\omega e}$ si $E_{2\omega}$)

Variind cei trei parametri (α, θ si φ) putem optimiza emisia radiatiei THz. In practica, putem controla θ schimbând pozitia cristalului de BBO fata de locul de formare al plasmei, iar intarzierea de faza φ o controlam prin inclinarea cristalului; prin rotirea cristalului BBO (variaza α) controlam raportul $E_{\omega e}/E_{2\omega}$. In figura 13a se poate observa cum campul THz generat prin mixarea celor doua fascicule, fundamental si armonica a doua, cu polarizari paralele este mai mare decat in cazul in care polarizarile fasciculelor sunt perpendiculare. Pentru ambele cazuri, emisia maxima de radiatie THz se obtine pentru $\theta = \pi/2$. Din figura 13b putem spune ca pentru $\alpha = 55^\circ$ si $\theta = 20^\circ$ valoarea maxima a campului THz se obtine pentru $\varphi = 30^\circ, 150^\circ, 210^\circ$ si 330° .

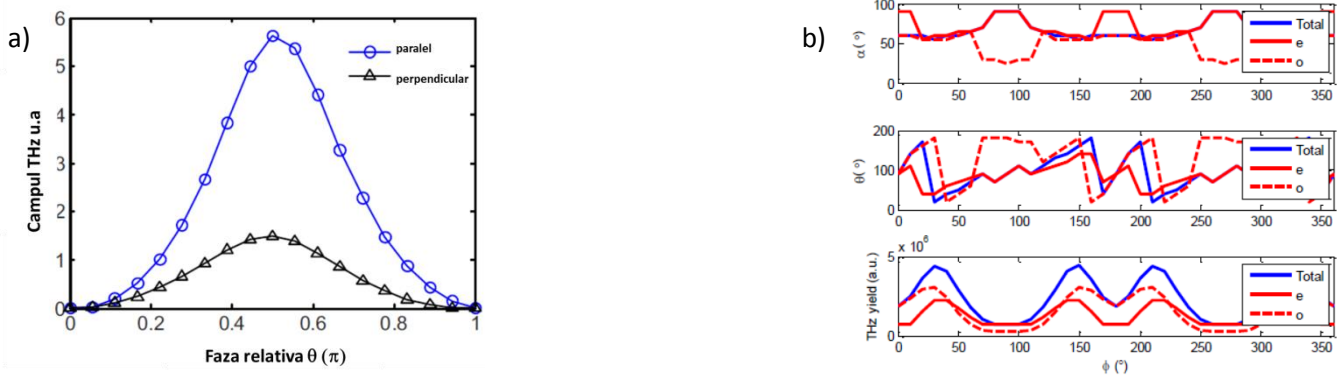


Fig.13a) Campul THz versus θ pentru polarizarea paralela (cercuri albastre) si ortogonala (triunghiuri negre) intre campurile ω si 2ω . 13b) Valorile optime ale lui α si θ pentru maximizarea generarii radiatiei THz pentru anumite valori ale lui φ .

Punerea in evidenta a acestor rezultate s-a realizat cu ajutorul detectiei electro-optice. In figura 14 este descris montajul experimental folosit pentru dimensionarea pulsurilor THz. Fasciculul laser fundamental este impartit de un divizor de fascicule in doua brate, astfel ca bratul cu energia cea mai mare pe puls este folosit pentru realizarea armonicii a doua si ulterior pentru generarea radiatiei THz iar celalalt brat este utilizat pentru detectia electro-optica a radiatiei THz. Detectia electro-optica este un proces neliniar de ordin doi in care un camp electric aplicat induce o schimbare a indicilor de refractie intr-un material electro-optic proportionala cu campul aplicat. Aceasta schimbare afecteaza elipticitatea unui fascicul laser circular polarizat ce se copropaga prin acelasi material si este masurata cu ajutorul unui cub Wolaston ce separa cele doua componente cu polarizari ortogonale ale fasciculului de proba. Doi

fotodetectori intr-o schema diferentiala echilibrata masoara diferenta de intensitate dintre cele doua componente. Variind intarzierea intre pulsul laser de proba si pulsul THz, cu ajutorul unui retroreflector pozitionat pe o linie de intarziere, se obtine evolutia temporala a campului THz. Ca mediu electro-optic s-a folosit un cristal de ZnTe cu grosime de 1mm pentru a avea un raport semnal zgomot mai mare.

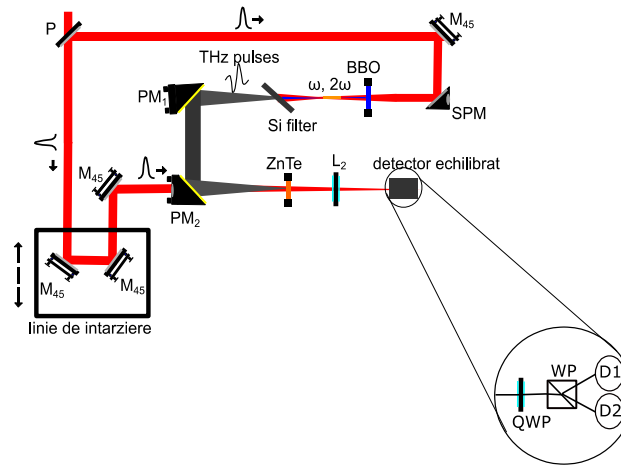


Fig.14 Montaj experimental folosit pentru dimensionarea pulsurilor THz; P – divizor de fascicule, M_{45} – oglinda plana aurita, SPM – oglinda parabolica argintata, Si – filtru de siliciu, PM – oglinda parabolica aurita, ZnTe – cristal de ZnTe, L_2 – lentila, QWP – lama sfert de unda, WP – polarizor wolaston, D1 si D2 fotodiode

In medalion este prezentat montaj experimental utilizat pentru detectia campului electric al pulsurilor THz. Cu ajutorul unei oglinzi parabolice gaurite, atat pulsurile THz cat si pulsurile optice sunt directionate spre cristallul electro-optic de ZnTe orientat pe directia (110). Radiatia THz este focalizata pe cristallul ZnTe iar fasciculul laser este colimat. Dupa cristall, fasciculul de proba trece printr-o lama sfert de unda ce face ca polarizarea fasciculului de proba sa fie circulara. Un polarizor wolaston separa componentele cu polarizari ortogonale si le trimite pe doua fotodiode care masoara diferenta de intensitate dintre cele doua componente. Astfel ca, fara radiatie THz aplicata pe cristall semnalul dat de cele doua fotodiode este zero iar prin aplicarea campului THz, polarizarea circulara a fasciculului de proba devine eliptica si diferenta de intensitate dintre cele doua componente este direct proportionala cu campul THz aplicat.

Folosind formalismul Jones si cunosc teoretic diferenta de faza indusa de cristallul de ZnTe putem gasi semnalul maxim THz variind atat directia de polarizare a pulsului THz cat si directia de polarizare a pulsului de investigat. In fig.15 sunt reprezentate grafic rezultatele teoretice si experimentale pentru diferite directii ale polarizarii radiatiei THz.

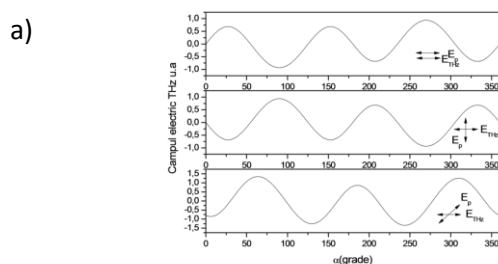


Fig.15a) Dependenta campului electric THz de directia de polarizare a campului optic

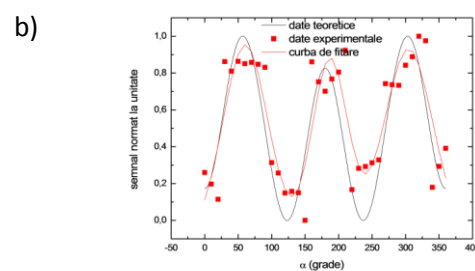


Fig.15b) Datele teoretice si experimentale pentru cazul in care fasciculul de proba este polarizat liniar la 45° iar radiatia THz este polarizata orizontala

Din fig.15a) reiese ca semnalul maxim THz se obtine pentru cazul in care unghiul $\theta = \alpha + 45$ iar datele experimentale pentru acest caz (fig.15b) sunt in concordanta cu cele teoretice dar pun in evidenta si faptul ca axa (001) a cristalului de ZnTe face un unghi de 10 grade cu axa z.

Cunoscand parametrii pentru care emisia THz este maxima si polarizarea fascicului de proba, putem spune ca stim care este polarizarea radiatiei THz si ce conditii trebuie indeplinite pentru a obtine cel mai bun raport semnal zgomot in cazul detectiei electrooptice.

Un alt obiectiv al acestui proiect l-a reprezentat dezvoltarea metodelor pentru realizarea imagisticii THz 2D de inalta rezolutie in experimente de tip "single-shot".

Imagistica THz presupune crearea unor imagini bidimensionale folosind ca sursa undele THz. Fata de schemele clasice bazate pe scanarea suprafetelor cu fascicule THz focalizate si detectarea semnalului transmis sau reflectat de un element de suprafata, tehnicile „single-shot” au ca obiectiv crearea unei imagini folosind iluminarea cu un singur puls THz, cu energie mare, cu durata foarte mica -deci un continut spectral extrem de larg- ceea ce ofera o serie de avantaje.

Folosind, pentru generarea pulsurilor THz de energie mare, acelasi montaj experimental prezentat in figura 3, s-au efectuat mai multe masuratori folosind in locul detectiei electrooptice o camera CCD. In medalionul figurii 3 se pot observa elementele optice ce constituie detectorul echilibrat utilizat in detectia electrooptica. Metoda de imagistica single-shot implica acelasi principiu (pune in evidenta schimbarea polarizarii fascicului de investigat atunci cand radiatia THz este prezenta pe cristalul birefringent) doar ca in locul fotodiodelor utilizam o camera CMOS. In acest caz, imaginea cristalului este proiectata pe camera CMOS (Photonics Science) utilizand o lentila. Ca si in esantionarea electrooptica conventionala, o lama sfert de unda si un cub wolaston au fost asezate intre lentila si camera rezultand o pereche de imagini corespunzatoare polarizarilor ortogonale. Acest lucru permite detectia intregului profil spatial al campului THz prezent pe cristalul electrooptic.

Procesul prin care se obtine spotul THz este dupa cum urmeaza: mai intai, sunt achizitionate imaginile de esantionare electrooptica cu campul THz prezent pe cristal unde in partea stanga si dreapta a imaginii sunt prezente cele doua stari de polarizare I_+ si I_- exact ca in esantionarea conventionala (figura 16b). Totodata au fost achizitionate imagini si in absenta campului THz corespunzatoare starii I_0 (figura 16a). Imaginile cu semnal au fost scazute si apoi impartite la imaginile referinta pentru a obtine imaginile rezultate unde starile din stanga si din dreapta corespund lui $\Delta I_-/I_0 = I_- - I_0/I_0$ si respectiv $\Delta I_+/I_0 = I_+ - I_0/I_0$. Cum era de asteptat, semnalul THz este opus in semn in cazurile $\Delta I_-/I_0$ si $\Delta I_+/I_0$. Mai mult, impartirea la imaginea referinta suprima variatiile spatiale in fascicul datorate difractiei. In cele din urma, cele doua stari sunt scazute una din cealalta pentru a obtine imaginea echilibrata $\Delta I/I_0 = \Delta I_+/I_0 - \Delta I_-/I_0$. Acesta etapa dubleaza semnalul dar in acelasi timp reduce si fluctuatiile de putere. Ca si in cazul esantionarii electrooptice conventionale, masuratorile se realizeaza variind intarzierea temporală între fasciculul de pompaj si cel de investigat iar imaginile rezultate contin informatii referitoare la amplitudinea si semnul lui $E_{THz}(x,y) \propto \arcsin(\frac{1}{2}\Delta I/I_0)$. Fiecare imagine poate fi ridicata la patrat numeric si se poate obtine profilul intensitatii.

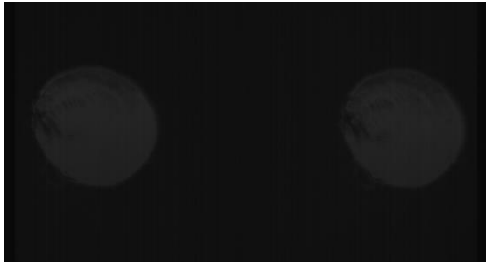


Fig.16a) Imaginea de referinta

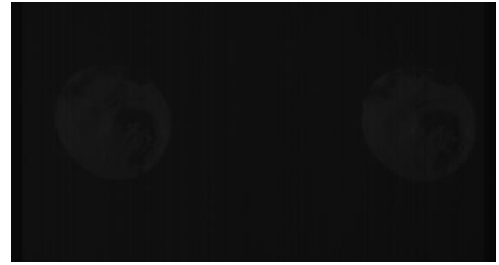


Fig.16b) Imaginea cu cele doua stari de polarizare ortogonale atunci cand exista camp THz pe cristalul ZnTe

Pentru ca punerea in evidenta a elipticitatii polarizarii fasciculusului infraros nu poate fi observata cu usurinta, a fost folosit un program de specialitate pentru procesarea imaginilor. Prin schimbarea intarzierii temporale intre fasciculusul de proba si cel de investigat putem evidenta modul in care radiatia THz interactioneaza cu pulsul de investigat. Schimbarea intensitatii de varf a campului THz fata de intarzierea fasciculusului de proba serveste ca o calibrare distanta/timp pentru extragerea formei de unda temporale a radiatiei. In figura 17 se regasesc imaginile (echilibrate) pentru doua intarzieri temporale care evidentiaza minimumul si maximum radiatiei THz din evolutia temporala a pulsului.

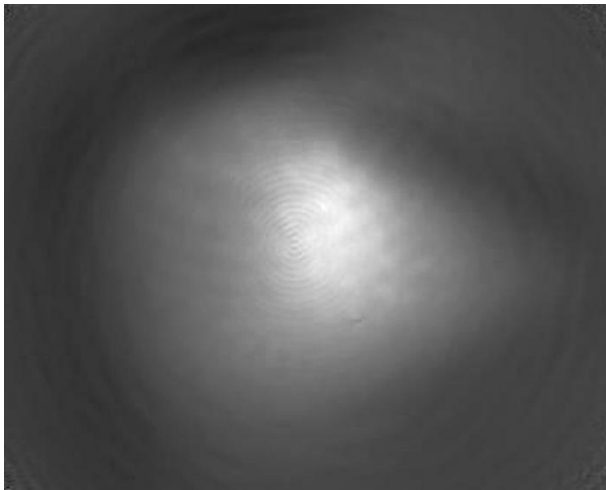


Fig.17a) Imaginea (echilibrata) pentru diferenta temporala de 300 fs corespunzatoare maximumului de THz din evolutia temporala a pulsului.

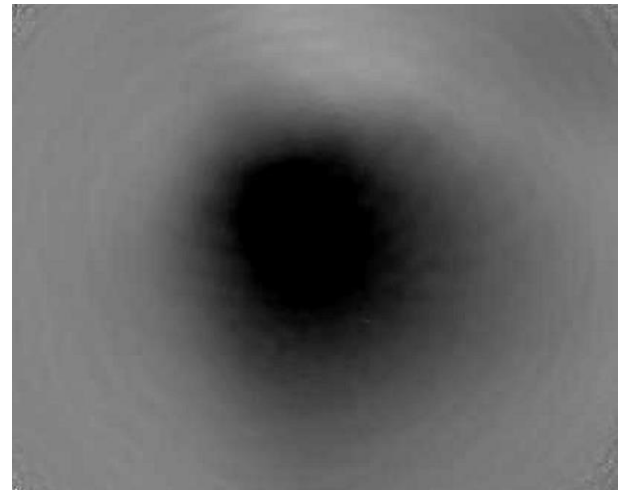


Fig.17b) Imaginea pentru diferenta temporala de 200 fs corespunzatoare minimumului de THz din evolutia temporala a pulsului

Cunoscand functia de calibrare si intarzierea temporala introdusa intre pulsurile optice putem extrage forma temporala a undei THz dintr-o singura imagine. In figura 18 putem observa evolutia temporala a pulsului THz.

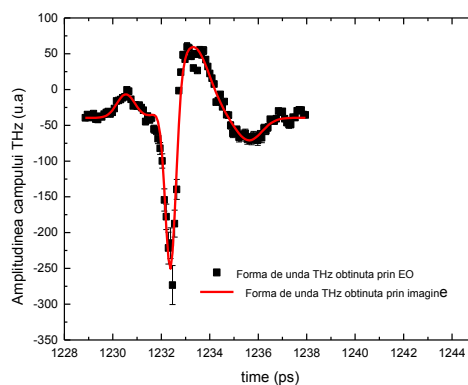


Figura 18. Evolutia temporala a pulsului THz

Rezultatele obtinute in timpul proiectului au fost diseminate prin participarea la 14 conferinte si publicarea a 6 lucrari stiintifice in reviste prestigioase cu factor de impact peste 2 dar si prin inregistrarea unui brevet. Mentionam ca avem date experimentale in curs de interpretare, iar publicarea lor se va face cu indicarea acestui proiect ca sursa principala de finantare.

Director proiect,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'V. Hamila', is positioned below the title 'Director proiect,'.