

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

(21) Paraiškos numeris: **2021 568**
(22) Paraiškos padavimo data: **2021-10-28**
(41) Paraiškos paskelbimo data: **2023-05-10**
(45) Patento paskelbimo data: **2023-08-10**

(73) Patento savininkas:
Vilniaus universitetas, Universiteto g. 3, LT-01513 Vilnius, LT
(72) Išradėjas:
Virgilijus VAIČAITIS, LT
Ona BALACHNINAITĖ, LT
Aidas MATIJOŠIUS, LT
(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:
Otilija KLIMAITIENĖ, 35, AAA Law, A. Goštauto g. 40B, Verslo centras „Dvyniai“, LT-03163 Vilnius, LT

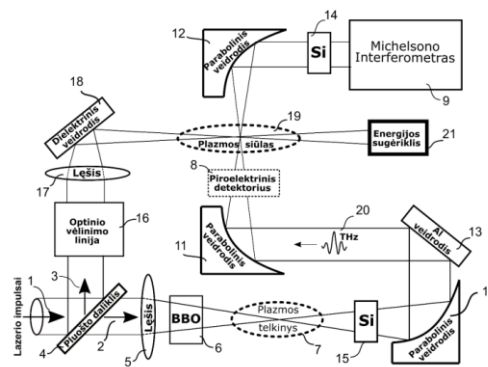
LT 7016 B

(54) Pavadinimas:

Plazmos tankio matavimo metodas ir sistema, naudojant plačiajuosčius terahercų dažnio elektromagnetinius impulsus

(57) Referatas:

Šis išradimas atskleidžia naują plazmos diagnostikos metodą, pagrįstą terahercų (THz) dažnio trumpų plačiajuosčių (0,1–50 THz) THz impulsų laikinės skyros spektroskopija. Tiek tiriamą plazmą (19), tiek THz spinduliuotę (20) galima generuoti ore femtosekundiniais lazerio impulsais (2) arba kitomis priemonėmis. Palyginus laisvai sklindančius ir per plazmą (19) perduodamus terahercų (THz) dažnio impulsus (20) bei jų spektrus, galima išmatuoti plazmos sugertį, kaip dažnio funkciją plačiame spektriniame diapazone, kuris turi apimti bandomosios plazmos (19) dažnį. Kadangi šalia šio dažnio vyksta stiprūs plazmos sugerties pokyčiai, tai leidžia tiesiogiai išmatuoti plazmos dažnį ω_p ir, atitinkamai, jos tankį n_e , kaip laiko ar kitų eksperimentinių parametrų funkciją.



1 pav.

TECHNIKOS SRITIS

Išradimas priklauso medžiagų metrologijos sričiai. Konkrečiau, tai plazmos dažnio ir tankio matavimo metodas, naudojant trumpus plačiajuosčius terahercų (THz) eilės dažnio elektromagnetinius (EM) impulsus.

TECHNIKOS LYGIS

Atliekant su plazma susijusius eksperimentus ir technologinius procesus, yra svarbu tiksliai kontroliuoti ir zonuoti svarbiausius plazmos parametrus, tokius kaip temperatūra, tankis, ir kitus [1] (*R. H. Huddletsone and S. L. Leonard, Eds., Plasma Diagnostic Techniques. New York: Academic, 1965*).

Vienas svarbiausių plazmos diagnostikos metodų yra paremtas elektromagnetinių (EM) bangų naudojimu plazmai zonuoti [2] (*M. A. Heald and C. B. Wharton, Plasma Diagnostics with Microwaves. New York: Wiley, 1965*). Tačiau, daugeliu taikymo atvejų šis metodas yra per sudėtingas, nes jį naudojant reikia vienareikšmiškai nustatyti EM bangos fazės pokyčius, kuriuos sukelia išplitusios plazmos lūžio rodiklio n realioji dalis, o tam reikia naudoti daug skirtingų dažnių EM spinduliuotės šaltinių.

Yra publikacijų, aprašančių kitus plazmos tankio matavimo metodus, naudojančius THz impulsus. Pavyzdžiui, publikacijose [3-5] ([3] *S. P. Jamison, J. Shen, D. R. Jones, R. C. Isaac, B. Ersfeld, and D. A. Jaroszynski, "Plasma characterization with terahertz time-domain measurements," J. Appl. Phys., vol. 93, pp. 4334-4336, Apr. 2003*); [4] *B.H. Kolner, P. M. Conklin, R.A. Buckles, N.K. Fontaine, and R. P. Scott, "Time - resolved pulsed-plasma characterization using broadband terahertz pulses correlated with fluorescence imaging," Appl. Phys. Lett., vol. 87, pp. 151501 -1-151501-3, 2005*; [5] *B. H. Kolner, R. A. Buckles, P. M. Conklin, and R. P. Scott, "Plasma Characterization With Terahertz Pulses," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 14, 505 (2008)*) atskleidžiama, jog plazma gali būti charakterizuojama, vienu metu panaudojus didelę EM spektro dalį plačiajuosčių terahercinių impulsų pavidalu, ir šie metodai taip pat leido įvertinti, netiesiogiai, plazmos tankį. Konkrečiau, naudojamo terahercinės laikinės spektroskopijos (THz-TDS) metodo principas yra panašus į mikrobangų interferometrijos metodą, kai EM banga praeina per plazmą, o elektronų tankio vertė nustatoma iš registruoto EM bangos fazės poslinkio. Kadangi THz-TDS

spektroskopijoje naudojami trumpi THz impulsai, plazmos dispersija praėjusioms EM bangoms sukuria nuo dažnio priklausančius fazių poslinkius, kurie iškraipo pradinį plačiajuostį impulsą. Remiantis šiais dažnių faziniais nuokrypiais, galima gauti plazmos dispersijos funkciją, kuri naudojama įvertinti elektronų tankį ir kitus plazmos parametrus, palyginus teorinį modelį su gautais eksperimentiniais duomenimis.

Artimiausias šiam išradimui, JAV patentas US5691642A, 1997.11.25, atskleidžia metodą ir įtaisą, skirtus matuoti plazmos charakteristikas, naudojant plačiajuosčių mikrobangų spektroskopinius matavimus. Metodas ir aparatas matuoja kameroje tiriamos plazmos kiekybines charakteristikas, žingsniais:

- sukuriamas kalibravimo spektrų rinkinys, matuojant elektromagnetinės energijos perdavimą per kalibravimo plazmą, esančią minėtoje kameroje, ir kiekvienas kalibravimo spektras, esantis minėtame kalibravimo spektro rinkinyje, gaunamas naudojant skirtingą etaloninių parametrų rinkinį, susijusį su minėtomis kiekybinėmis charakteristikomis;
- etaloninio parametro transformacijos nustatymas remiantis minėtais kalibravimo spektrais, minėtas etaloninių parametrų transformavimas, susijęs su išmatuotais elektromagnetinės energijos spektrais, perduodamais per minėtą kalibravimo plazmą, su minėtų etaloninių parametrų vertėmis;
- sukuriamas bandymo spektras, matuojant elektromagnetinės energijos perdavimą per minėtą tiriamąją plazmą; ir
- minėtų kiekybinių charakteristikų įvertinimas, analizuojant minėtą bandymų spektrą, naudojant minėtą etaloninių parametrų transformaciją.

Tačiau, šiuo metodu plazma zonduojama uždaroje kameroje, reikalingas sudėtingas išankstinis spektrų kalibravimas bei transformavimas tarp spektrų ir tiriamų kiekybinių plazmos charakteristikų, o tai pasižymi metodo sudėtingumu bei ribotumu įgyvendinti jį įvairiuose uždaviniuose.

Kituose straipsniuose [6, 7] ([6] D. J. Cook and R. M. Hochstrasser, *Intense terahertz pulses by four-wave rectification in air*, *Opt. Lett.* 25, 1210 (2000); [7] V. Vaicaitis, M. Ivanov, K. Adomavicius, Ž. Svirskas, U. Morgner, and I. Babushkin, *Influence of laser-preformed plasma on THz wave generation in air by bichromatic laser pulses*, *Laser Phys.* (2018)) atskleista, kad femtosekundiniais lazerio impulsais ore sukuriamą plačiajuostę THz EM spinduliuotę, daugumoje atvejų, turi dažnių juostą

apimančią diapazoną esantį virš ir žemiau plazmos dažnio. Todėl tokia spinduliuotė galėtų būti naudojama, kaip jautrus ir universalus zondas, zonuoti plačiame diapazone kintančius plazmos parametrus. Iki šiol, nepublikuota apie plazmos dažnio tiesioginius matavimus, naudojant plačiajuosčius THz impulsus.

IŠRADIMO ESMĖ

Šis išradimas atskleidžia metodą, paremtą terahercine (THz) laikinės skyros plazmos spektroskopija, kuri leidžia pilnai charakterizuoti dujinę plazmą plačiame jos 10 tankių diapazone. Metodo veikimo principas paremtas tuo, kad arti taip vadinamo plazmos dažnio, per plazmą sklindančios EM spinduliuotės sugertis plazmoje stipriai priklauso nuo EM spinduliuotės dažnio. Užregistravus plazmos sugerties priklausomybę nuo dažnio, galima lengvai rasti dažnių sritį, tiesiogiai susijusią su plazmos tankiu. Kadangi metodui nereikia išorinio kalibravimo, jis yra paprastesnis ir 15 jautresnis, nei iki šiol naudojami netiesioginio matavimo metodai, paremti THz impulsų, sklindančių plazma, elektrinio lauko pokyčių matavimu. Teorinis pagrindas. Jonizuotose dujose, plazmos dažnis ω_p yra apibrėžiamas formule:

$$\omega_p \equiv \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m}}$$

kur n_e yra laisvųjų elektronų tankis, o e ir m yra, atitinkamai, elektrono krūvis ir masė, kurie yra natūralūs plazmos diagnostavimo EM bangomis žymekliai (markeriai). Taigi, esant silpnam susidūrimo slopinimui, plazma yra smarkiai neskaidri žemiau dažnio ω_p ir skaidri virš jo. Tiksliau, nesant magnetinių laukų, bangos sklidimo ir slopinimo plazmoje konstantos k ir α gali būti išreikštos kaip, atitinkamai, $k = Re \{ \epsilon^{1/2} \} \omega / c$ ir $\alpha = Im \{ \epsilon^{1/2} \} \omega / c$, kur ϵ yra kompleksinė dielektrinė konstanta, išreiškiama formule:

$$\epsilon = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) - i \left(\frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)$$

čia, ν yra vidutinis judesio kiekio perdavimo susidūrimų greitis. Todėl, matuojant per plazmos tūrį sklindančių EM bangų sugertį ir fazės vėlinimą, galima nustatyti plazmos tankį ir susidūrimų dažnį. Be to, jei zondavimui naudojami trumpi EM impulsai, galima stebėti net greitus šių plazmos parametrų pokyčius. Kaip minėta, šis metodas iki šiol

jau buvo taikytas plazmai charakterizuoti. Tačiau, įprastai THz-TDS sistemų, naudojamų eksperimentuose, spektrinis diapazonas yra apribotas iki 3–4 THz, todėl daugumoje atvejų, informacija apie plazmos tankį būdavo išvedama iš sudėtingo plazmos lūžio rodiklio n , o tai reikalauja kruopštaus ir nuoseklaus pataškinio etaloninės bei per plazmą perduodamos THz impulsų bangų formų registravimo ir palyginimo. Akivaizdu, kad plačiajuosčių THz impulsų naudojimas ir plazmos sugerties (slopinimo konstantos k), kaip dažnio funkcijos registravimas leidžia tiksliau ir be išankstinio kalibravimo nustatyti plazmos dažnį ω_p ir kartu jos tankį n_e . Tačiau šis metodas reikalauja, kad plazmos dažnis patektų į zonduojančių THz impulsų spektrinį diapazoną, o tai reiškia poreikį naudoti itin plačiajuosčius zondavimo impulsus. Pavyzdžiui, impulsai, kurių spektrinis diapazonas yra nuo 0,1 iki 50 THz, maždaug atitinka kampinį dažnį ω nuo 0,628 THz iki 314 THz, o tai, jei plazmos dažnis ω_p patektų į šį diapazoną, leistų registruoti plazmos tankį n_e diapazone nuo $1,2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ iki $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Kaip minėta, tokio plataus spektro THz impulsus galima lengvai generuoti ore ir kitose dujose, panaudojus bichromatinius femtosekundinius lazerio impulsus, o impulsų spektrines savybes registruoti tiesiogiai įprasto THz spektrometro pagalba. Palyginus su THz-TDS sistemomis, kuriose THz impulsų bangos formos yra registruojamos taškas po taško matuojant silpnus artimos infraraudonos spinduliuotės zonduojančių impulsų pokyčius, keičiant vėlinimą THz impulso atžvilgiu, šiuo atveju, tiesioginis spektrinis matavimas yra daug greitesnis ir duoda tikslesnius rezultatus. Todėl šio išradimo esmė yra eksperimente plazmos zondavimui panaudoti THz impulsus, kuriuos ore sukuria femtosekundinio lazerio impulsai, o bandomąją plazmą ore - taip pat sukuria femtosekundinio lazerio pluošto dalis.

Šis metodas gali būti efektyviai pritaikytas pramonėje ir moksliniuose tyrimuose, įskaitant plazmos charakterizavimą ir stebėjimą tokomakuose, „wakefield“ greitintuvuose, ir spinduliuotės šaltiniuose, kurių veikimas paremtas lazerio ir plazmos sąveika.

BRĖŽINIŲ APRAŠYMAS

Išradimas paaiškintas brėžiniuose. Priedamos schemas ir brėžiniai yra išradimo aprašymo sudedamoji dalis ir pateikti kaip nuoroda į galimą išradimo įgyvendinimą, bet neturi riboti išradimo apimtį.

1 pav. Eksperimentinė sistema: Lazerio pluošto (1) impulsas pluošto dalikliu (4) dalinamas į du: vienas iš impulsų (vadinamas pagrindiniu impulsu (2)) per netiesinį beta-bario-borato (BBO) kristalą (6), generuojantį antrą harmoniką ir pakeičiantį šį impulsą dvispalviu, lęšiu (5) fokusuojamas ore ir pluošto židinyje sukuria plazmos telkinį (filamentą (7)), kuriame generuojama didelės skėsties THz dažnio spinduliuotė. Ji kolimuojama paraboliniu veidrodžiu (10), kolimuotas pluoštas (20) plokščiu Al dengtu veidrodėliu (13) nukreipiamas į kitą parabolinį veidrodį (11), kur fokusuojamas ir nukreipiamas į testuojamą plazmos siūlą (19). Po to praėjęs THz pluoštas vėl paraboliniu veidrodžiu (12) kolimuojamas ir nukreipiamas į Michelsono interferometrą (9) spektrinei analizei. THz spinduliuotės galia kontroliuojama pastatomu į THz pluošto kelią piroelektriniu detektoriumi (8). Matomą spinduliuotę blokuoja dvi Si plokštelės (15 ir 14), permatomos THz diapazone ir pastatytos atitinkamai prieš pirmąjį kolimuojantį veidrodį (10) ir interferometrą (9). Antrąjį impulsą (vadinamą prieš-impulsu (3)) valdo vėlinimo linija (16), lęšis (17) ir judantis veidrodis (18), kuris leidžia keisti sukurtos plazminės gijos (19) padėtį, palyginti su THz spinduliuote, kurią sukuria pagrindinis impulsas (2). Detektavimo posistemę sudaro parabolinis veidrodis (12), Si plokštelė (14) ir Michelsono interferometras (9).

2 pav. Michelsono interferometro schema. THz pluoštas (20) kolimuojamas paraboliniu veidrodžiu (22) ir nukreipiamas į ploną (2 mikronų storio nitroceliuliozės plokštelę) pluošto daliklį (23). Susidarę du THz pluoštai atsispindi nuo stacionaraus ir judančio metalu dengtų veidrodžių (25, 24) ir grįžta atgal į pluošto daliklį (23), kuris juos per fokusuojantį parabolinį veidrodį (26) nukreipia į piroelektrinį detektorių (27), registruojantį interferencinį signalą. Matomą spinduliuotę blokuoja ir triukšmų lygį sumažina prieš kolimuojantį veidrodį (22) pastatyta Si plokštelė (14).

3 pav. Tipiniai interferenciniai signalai (a) ir atitinkami THz spektrai (b) gauti THz spinduliuotei sklindant laisvai ore (juodos linijos) ir per testuojamą plazmą (taškinės linijos). Plazmos gija sukurta naudojant 10 cm židinio nuotolio lęšį ir yra THz pluošto židinio plokštumoje. Pagrindinio ir plazmą kuriančių (prieš impulso) impulsų energija atitinkamai buvo 5,2 ir 1,65 mJ. Spektrų moduliaciją sąlygoja panaudotų THz filtrų (Si plokštelių) ir interferometro pluošto daliklio (2 μm storio nitroceliuliozės plokštelės) sugertis.

4 pav. Tipiška per plazmos siūlą perduodamos THz spinduliuotės galios priklausomybė kaip vėlinimo funkcija tarp pagrindinio lazerio impulso ir prieš impulso,

sukuriančio testuojamos plazmos giją. Taškinė linija rodo eksponentinės funkcijos su konstanta 93 ps kitimą.

5 pav. Normuotas THz spektrinio intensyvumo skirtumas Δ , užregistruotas esant nulinio vėlinimo (a) ir 40 ps vėlinimo (b) sąlygoms tarp lazerio pagrindinio impulso ir prieš impulso: ištisinės linijos yra vieno matavimo rezultatas, o taškinės linijos atitinka 10-ties matavimų vidurkius, rodyklės rodo plazmos dažnio padėtis.

6 pav. Eksperimentiškai išmatuotas plazmos dažnis (a) ir tankis (b), kaip vėlinimo tarp lazerio impulsų funkcija. Taškai atitinka eksperimentinius rezultatus, o kreivės yra eksponentinių funkcijų aproksimacijos.

BRĖŽINIAI - pažymėtų objektų aprašymas

- 1 lazerio impulsas;
- 2 pagrindinis impulsas;
- 3 prieš impulsas;
- 4 pluošto daliklis;
- 5 pagrindinį impulsą fokusuojantis lęšis;
- 6 beta-bario-borato (BBO) kristalas;
- 7 plazmos telkinys ore, kuriame generuojama THz spinduliuotė;
- 8 piroelektrinis detektorius;
- 9 Michelsono interferometras su integruotu detektoriumi;
- 10, 11, 12 THz pluoštą kolimuojantys ar fokusuojantys paraboliniai veidrodžiai;
- 13 Al dengtas veidrodis, nukreipiantis THz pluoštą;
- 14, 15 Silicio (Si) plokštelės, skirtos blokuoti matomą spinduliuotę ir sumažinti optinių triukšmų lygį;
- 16 Optinio vėlinimo linija skirta pagrindinio impulso ir prieš-impulso laikinei sinchronizacijai (poslinkio platforma, kuri leidžia keisti prieš-impulso vėlinimą laike atžvilgiu pagrindinio impulso);
- 17 prieš impulsą fokusuojantis lęšis;
- 18 dielektrinis veidrodis, valdantis prieš impulso sklaidimo kryptį;

- 19 prieš impulsu kuriamos testuojamos plazmos siūlas;
- 20 THz pluoštas;
- 21 Pluošto energijos sugėriklis;
- 22, 26 paraboliniai pluoštą kolimuojantys ir fokusuojantys veidrodžiai;
- 23 plėvelinis THz pluošto daliklis (2 mikronų storio nitroceliuliozės plėvelė);
- 24 judantis kompiuteriu valdomas metalu dengtas veidrodis;
- 25 stacionarus metalu dengtas veidrodis;
- 27 piroelektrinis detektorius.

DETALUS IŠRADIMO APRAŠYMAS

Eksperimentinė sistema. Eksperimentiniame metodo įgyvendinimo variante panaudotas femtosekundinis lazeris, lazerio pluošto valdymo elementai (lęšiai, veidrodėliai ir kt.), bei THz dažnio spinduliuotės energijos registravimo sistema.

Eksperimente naudota 1 kHz pasikartojimo dažnio femtosekundinė Ti: safyro faziškai moduluotų impulsų stiprinimo lazerinė sistema („*Legend elite duo HE+*“, „*Coherent Inc.*“), generuojanti 35–40 femtosekundžių trukmės (matuojamos „*full width at half maximum*“ (FWHM) lygyje) šviesos impulsus, kurių centrinis bangos ilgis yra 790 nm, su maksimalia impulso energija 8 mJ. Lazerio generuojami impulsai (1) pluošto dalikliu (4) buvo padalyti į dvi dalis (pagrindinis impulsas (2) ir prieš impulsas (3), kurių energija atitinkamai 5,2 ir 1,65 mJ, 1 pav.). Pagrindinis pluoštas buvo fokusuojamas į aplinkos orą maždaug 30 cm židinio nuotolio lęšiu (5) per netiesinį 100 μm storio BBO kristalą ((6), I-as tipas, pjovimo kampai: $\theta \approx 29^\circ$ ir $\phi \approx 90^\circ$). Todėl pagrindinis impulsas susideda iš pirmosios ir antrosios lazerio harmonikų impulsų ir pluošto (2) sąsmaukoje ore sukuria plazmos telkinį (7), kur indukuojamos plazmos srovės, generuojančios plačiajuosčius THz impulsus. BBO kristalo (6) azimutinis kampas ir jo vieta optimizuoti, kad būtų pasiektas maksimalus THz spinduliuotės efektyvumas (pagal [8, 9] ([8] M. D. Thomson, M. Kress, T. Löffler, and H. Roskos, "Broadband THz emission from gas plasmas induced by femtosecond optical pulses: from fundamentals to applications," *Laser Photonics Rev.* 1(4), 349-368 (2007); [9] V. Vaičaitis, V. Smilgevičius, and V. Jarutis, "Phase relations between focused

bichromatic laser pulses in terahertz wave generation from gas plasma”, *Opt. Commun.*, 284, 2206-2209 (2011)). Sukurtų THz impulsų energija išmatuota, naudojant kalibruotą piroelektrinį detektorių (8), įstatomą į THz pluoštą. THz pluoštas kolimuojamas ir fokusuojamas, naudojant aliuminiu dengtus parabolinius veidrodžius (10, 11, 12), o jo kryptis keičiama plokščiu aliuminiu (Al) dengtu veidrodžiu (13).

Matuoti THz bangų spektrus naudojamas THz Michelsono interferometras (9) kartu su jame integruotu detektoriumi ((27), 2 pav.). Į interferometrą ateinantis THz pluoštas (20) filtruojamas Si plokštele (14), paraboliniu veidrodžiu (22) kolimuojamas ir dalinamas į du pluoštus 2-jų mikronų storio nitroceliuliozės plėveliniu dalikliu (23). Praėję ir atspindėti nuo šio daliklio (23) - abu pluoštai atsispindi nuo judančio (24) ir stacionaraus (25) veidrodžių ir tame pačiame daliklyje vėl suvedami į vieną pluoštą, kuris patenka į antrą parabolinį veidrodį (26), fokusuojantį šį pluoštą į piroelektrinį detektorių (27). Plokščias vienos interferometro atšakos veidrodis (24) pastatytas ant kilnojamojo kompiuterio valdomos platformos. Stumdant šį veidrodį (24) ir matuojant detektoriuje (27) galią, galima užregistruoti THz impulso interferometrinį pėdsaką. THz impulsų spektrai gauti, atlikus šių interferometrinių pėdsakų Furjė transformaciją.

Priešais Michelsono interferometro (9) įėjimą pastatytas THz filtras (0,5-1 mm storio Si plokštelė (14), (1 pav.) skirtas aukšto dažnio dedamajai pašalinti ir optinio diapazono triukšmų lygio sumažinimui. Analogiška Si plokštelė (15) taip pat įdėta prieš pirmąjį kolimuojantį veidrodį (10) (1 pav.). Prieš impulsas (3) pirmiausia patenka į optinio vėlinimo liniją (16), skirtą laikinei sinchronizacijai su pagrindiniu impulsu (2), po to fokusuojamas lęšiu (17) ir dielektriniu veidrodžiu (18) nukreipiamas statmena kryptimi pagrindinio lazerio pluošto (2) atžvilgiu tam, kad sukurtų plazminį siūlą (19), besikertantį su THz spinduliuotės pluoštu (20), generuojamu pagrindinio lazerio impulso (1 pav.). Likusi prieš impulso energija saugumo tikslais nuslopinama lazerio pluošto energijos sugėrikliu (21). Santykinis dviejų impulsų (pagrindinio impulso ir prieš impulso) vėlinimas ir padėtis keičiami motorizuotomis ir kompiuteriu valdomomis slenkančiomis platformomis. Plazmos telkinio fluorescencinės gijos (19) ilgis buvo apie 1 cm, prieš impulso energiją nustačius 1,5 mJ.

Eksperimento rezultatai. Tipiniai interferenciniai pėdsakai ir atitinkami sukurtos THz spinduliuotės amplitudės spektrai, turintys visą reikalingą matavimams informaciją, parodyti 3 pav. Spektrai apskaičiuoti interferogramų Furjė transformacijomis ir daugumoje atvejų pakankamai reikšmingas signalas gali būti

stebimas iki 60 THz dažnio.

Nustatyta, kad THz signalas sumažėja, praėjęs per sukurtos plazmos giją. Tačiau, dėl didelių ore susidarančių THz impulsų energijos svyravimų sunku tiesiogiai ir tiksliai išmatuoti THz spinduliuotės slopinimo koeficientą kaip dažnio funkciją. Kita vertus, plazmos poveikis per ją perduodamos THz spinduliuotės galiai aiškiai priklauso nuo pagrindinio impulso ir prieš impulso sekos vienas kito atžvilgiu laike (4 pav.): THz signalo amplitudė nesikeičia, kai pagrindinis impulsas siunčiamas iki prieš impulso. Tačiau THz signalo amplitudė pakinta, kai pagrindinis impulsas laike seka po prieš impulso. Pastaruoju atveju, po pradinio sumažėjimo, THz signalas lėtai atsistatė su maždaug šimto pikosekundžių laiko konstanta, pakankamai gerai atitinkančia balistinę plazmos išsiplėtimą ir laisvą elektronų skilimo greitį (pagal [10, 11] ([10] *H. Wen, D. Daranciang, and A. M. Lindenberg, „High-speed all-optical terahertz 15 polarization switching by a transient plasma phase modulator”, Appl. Phys. Lett., 96, 161103 (2010); [11] Y. Minami, M. Nakajima, and T. Suemoto, „Effect of preformed plasma on terahertz-wave emission from the plasma generated by two-color laser pulses”, Phys.Rev. A 83, 023828 (2011)).*

Išsamesnė per plazmą perduotų THz impulsų spektrinių savybių analizė gali būti atliekama, apskaičiavus normuotą THz spektrų intensyvumų skirtumą $\Delta = (I_{in} - I_{out}) / (I_{in} + I_{out})$, kur I_{in} ir I_{out} atitinka išsiųsto THz impulso ir per plazmą praėjusio THz impulso spektrinius intensyvumus. Pastebėta, kad iš vieno matavimo, dėl didelių spektro intensyvumo svyravimų, patikimų rezultatų gauti nepavyks. Tačiau, atlikus kelis matavimus - jų vidurkis gali parodyti tikslią plazmos dažnio vietą, pavyzdžiui, 5 paveiksle matomi akivaizdūs plazmos sugerties pokyčiai, gauti suvidurkinus 10-ties matavimų rezultatus.

Šiuo metodu buvo užregistruotas plazmos dažnio ir tankio slopinimas didinant vėlinimą tarp pagrindinio lazerio impulso ir prieš impulso (6 pav.). Pastebėta, kad šie abu plazmos parametrai (dažnis ir tankis) mažėja esant maždaug 35 pikosekundžių konstantai, kuri apie 3 kartus skiriasi nuo perduodamos THz spinduliuotės slopinimo plazmoje konstantos (4 pav.). Taip pat pastebėta, kad esant nedideliame vėlinime tarp minėtų impulsų, didžiausias lazerio sukurtos plazmos tankis užregistruotas apie $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, tai yra, didesnis nei oro molekulių tankis ($2,5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$), taigi, eksperimento metu beveik visos oro molekulės buvo jonizuotos. Tuo tarpu mažiausias registruotas plazmos tankis buvo apie 10^{18} cm^{-3} . Atitinkamai, užregistruotų didžiausio ir mažiausio

plazmos tankių santykis gautas apie 30 - tai rodo pakankamai didelį matavimo šiuo metodu dinaminį diapazoną.

Kiti galimi metodo ir sistemos įgyvendinimo variantai. Aukščiau aprašyta sistemos realizacija atskleidžia laboratorijos sąlygomis atliktą autonominį eksperimentinį metodo įgyvendinimo variantą, iliustruojantį metodo veikimą ir techninį efektą. Tačiau, išradimo apimtis neribojama vien šiuo eksperimentiniu variantu, o turi platesnę apimtį. Esminė išradimo savybė, skirianti jį nuo kitų metodų, yra: plazmos telkinio zondavimas trumpu pakankamai plačiajuosčiu THz impulsu, savo spektru dengiančiu plazmos dažnių juostą, bei šio THz impulso dažnių spektro sugerties testuojamoje plazmoje matavimas.

Todėl galimi ir kiti metodo bei sistemos realizacijos variantai. Pavyzdžiui, prieš impulsas nėra būtinas, jei plazmos telkinys jau iš anksto sukurtas ir palaikomas kitomis priemonėmis. Šiuo atveju, pakaktų femtosekundiniu lazeriu generuoti tik pagrindinį zonduojantį impulsą ir matuoti THz impulso, praėjusio plazmos telkinį, spektrinius pokyčius. Toks metodo realizacijos variantas galimas, pavyzdžiui, plazmos generatoriuose (pvz., tokamakuose).

Lazerio, generuojančio femtosekundinius šviesos impulsus, tipai irgi gali būti įvairūs ir skirtingi. Esminė lazerinės sistemos savybė, yra kad ji generuotų tinkamos trukmės, dažnio ir energijos femtosekundinius šviesos impulsus.

Netiesinis kristalas (6), kuriantis lazerio impulso antrąją harmoniką, taip pat gali būti naudojamas ne tik beta-bario-borato BBO kristalas, bet ir kiti įvairūs (iš kitų medžiagų pagaminti) netiesiniai kristalai, generuojantys šviesos impulso antrąją harmoniką ir leidžiantys sukurti lazeriu indukuotoje plazmoje pakankamo efektyvumo THz signalą.

THz zonduojančio impulso savybes tirti gali būti naudojamas Michelsono interferometras, arba bet kuris tam tinkamas THz dažnių intervalo spektrometras.

Eksperimentinėje realizacijoje įvardintos prieš impulso ir pagrindinio impulso energijų konkrečios reikšmės. Tačiau, energijų vertės ir jų proporcijos gali ir skirtis, priklausomai nuo eksperimento sąlygų, o esminė savybė, kad prieš impulsas yra skirtas sukurti dujų plazmos telkinį (siūlą, filamentą), o pagrindinis impulsas yra skirtas zonuoti plazmos telkinį THz dažnių diapazone ir matuoti spektrinę sugertį.

Išvados. Atliktas metodo veikimo ir numatyto techninio efekto eksperimentas

parodė, kad femtosekundiniais lazerio impulsais ore ir kitose dujose generuojami plačiajuosčiai THz impulsai gali būti naudojami tiesiogiai matuoti plazmos dažnį ω_p ir tankį n_e . Metodas paremtas tuo, kad plazma yra nepermatoma žemiau ir skaidri virš plazmos dažnio ω_p , o tai tiesiogiai susiję su plazmos tankiu n_e . Todėl šiuo metodu minėtus plazmos parametrus galima išmatuoti be išorinio ar skaitmeninio kalibravimo, taigi, matavimo metodo žingsniai ir funkcijos yra gana paprasti ir tiesioginiai. Šiuo metodu pirmą kartą tiesiogiai išmatuotas plazmos, sukurtos femtosekundiniais lazerio impulsais, tankis ir stebėtas eksponentinis jo mažėjimas. Eksperimentų rezultatai parodė, kad net silpnai sufokusuoti vidutinės energijos femtosekundiniai lazerio impulsai gali jonizuoti visas oro daleles, o tai gali būti naudinga kuriant oro jonizacijos teorijas ir vykdant bandymus.

Pramoninis taikymas. Šis metodas gali būti efektyviai pritaikytas tiek pramonėje, tiek ir moksliniuose tyrimuose, įskaitant plazmos charakterizavimą ir stebėjimą tokomakuose, „*wakefield*“ greitintuvuose ir spinduliuotės šaltiniuose, kurių veikimas paremtas lazerio ir plazmos sąveika.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Metodas matuoti dujų plazmos dažnį ω_p ir tankį, apimantis šiuos žingsnius:

- plazmos (19) zondavimą elektromagnetine THz dažnių (THz EM) spinduliuote (20),
- plazmą (19) zondavusios THz EM spinduliuotės (20) spektro registravimą,
- plazmą (19) zondavusios THz EM spinduliuotės (20) dažnio spektro pokyčių nustatymą ir plazmos (19) dažnio ω_p bei tankio įvertinimą,

b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad

- THz EM spinduliuotė (20) yra plačiajuosčiai THz impulsai, kurių dažnių spektro juosta apima ženkliai virš ir žemiau jais zonduojamos plazmos (19) dažnių ω_p ruožo,
- matuojami plazmą (19) zondavusio plačiajuosčio THz impulso (20) dažnių spektro pokyčiai, o plazmos (19) dažnis ω_p nustatomas iš daugiau nei vieno matavimų spektrų vidurkio, jo spektre identifikavus sparčių plazmos (19) sugerties pokyčių sritį.

2. Metodas pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad plačiajuosčiai THz impulsai (20) yra kuriami femtosekundinio lazerio impulsais (2), juos fokusuojant per netiesinį beta-bario-borato (BBO) kristalą (6) į zoną, kurioje indukuojama šiuos plačiajuosčius THz impulsus generuojanti plazma - plazmos telkinys (7).

3. Metodas pagal 1 ir 2 punktus, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad

- generuojami femtosekundiniai lazerio impulsai (1), kurie dalikliu (4) atskiriami į prieš impulsą (3) ir pagrindinį impulsą (2), kur
 - prieš impulsas (3) fokusuojamas ore, kad sukurti ore plazmos siūlą (19), o
 - pagrindinis impulsas (2) kreipiamas į plazmos telkinio (7) regioną per netiesinį BBO kristalą (6), kurio azimutinis kampas ir vieta optimizuoti, kad efektyviai sukurti zonduojantį THz impulsą (20), kuris nukreipiamas

per tiriamos plazmos siūlą (19),

- THz impulsas (20), praėjęs plazmos siūlą (19), registruojamas THz spektrometru (9), atliekama jo spektrinė analizė ir nustatoma maksimalių spektrinių pokyčių dažnių sritis.

4. Metodas pagal 1 ir 3 punktus, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad THz spektrometras (9) yra Michelsono interferometras su piroelektriniu detektoriumi (27), kuriais registruojamas THz impulso (20) interferencinis pėdsakas, ir suskaičiuojama jo Furje transformacija.

5. Metodas pagal 1 ir 4 punktus, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad plazmos siūlas (19) sukuriamas oro ar kitų dujų pagrindu, jas jonizavus sufokusuoto lazerio prieš impulso (3) energija, o THz impulsui (20) generuoti reikalingas papildomas plazmos telkinys (7), kuris analogiškai sukuriamas lazerio pagrindinio impulso (2) energija.

6. Sistema matuoti dujų plazmos dažnį ω_p metodu pagal 1–5 punktus, apimanti mažiausiai:

- lazerinę sistemą, generuojančią femtosekundinius impulsus (1, 2, 3) ir
- netiesinį BBO kristalą (6), skirtą dvigubinti dalies femtosekundinio impulso (2) dažnį ir sukurti plazmos telkinyje (7) generuojamą zonduojantį plačiajuostį THz impulsą (20), kurio dažnių spektro juosta apima ženkliai virš ir žemiau zonduojamos plazmos (19) dažnių ω_p juostos.

7. Eksperimentinė sistema matuoti dujų plazmos dažnį ω_p metodu pagal 1–5 punktus, apimanti mažiausiai šiuos komponentus:

- lazerinę sistemą, generuojančią femtosekundinius impulsus (1), impulsų pluošto dalikliu (4), minėtus lazerio impulsus (1) padalijančiu į prieš impulsą (3) ir pagrindinį impulsą (2),
- BBO kristalą (6), skirtą generuoti antrąją lazerio harmoniką,
- kompiuteriu valdomą slenkančią platformą (16), kuri pritaikyta keisti vėlinimą

tarp pagrindinio impulso (2) ir prieš impulso (3),

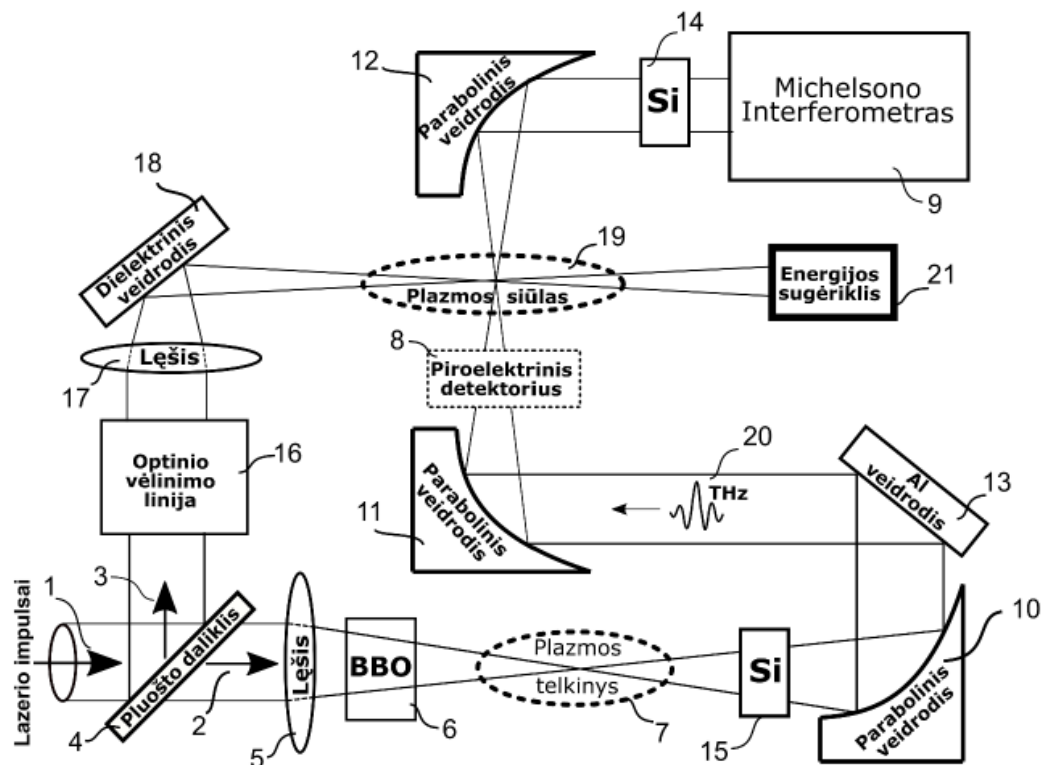
- Michelsono interferometrą (9) su interferencinio pėdsako detektoriumi (27), kur šioje eksperimentinėje sistemoje

- lazerinė sistema yra suderinta generuoti femtosekundinius impulsus (1), kuriuos pluošto daliklis (4) atskiria į prieš impulsą (3) ir pagrindinį impulsą (2), kur prieš impulsas (3) jonizuoja dujas, sukurdamas plazmos siūlą (19), o pagrindinis impulsas (2) nukreipiamas per netiesinį BBO kristalą (6) į papildomą plazmos telkinį (7), kuriame sukuriama zondavimo plačiajuosčiai THz impulsai (20),

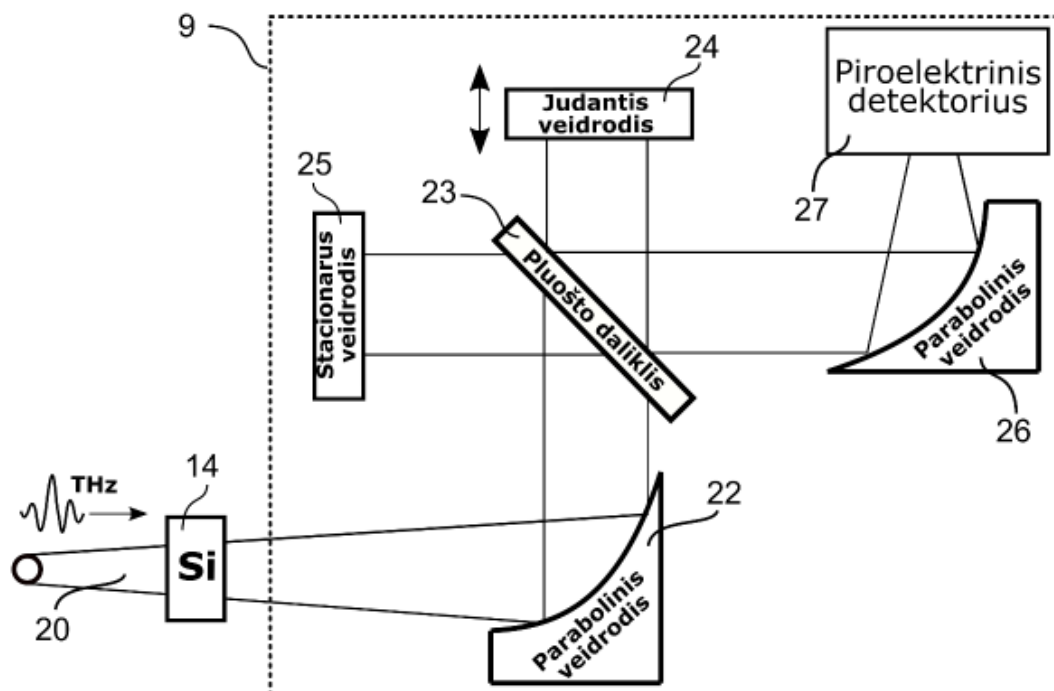
- kur tiriamos plazmos siūlą (19) praėjęs THz impulsas (20) nukreipiamas į Michelsono interferometrą (9), kuriame sukuriama ir piroelektriniu detektoriumi (27) registruojamas THz impulso (20) interferencinis pėdsakas,

- kompiuteriu valdoma slenkanti platforma (16) keičia vėlinimą tarp prieš impulso (3) ir pagrindinio impulso (2),

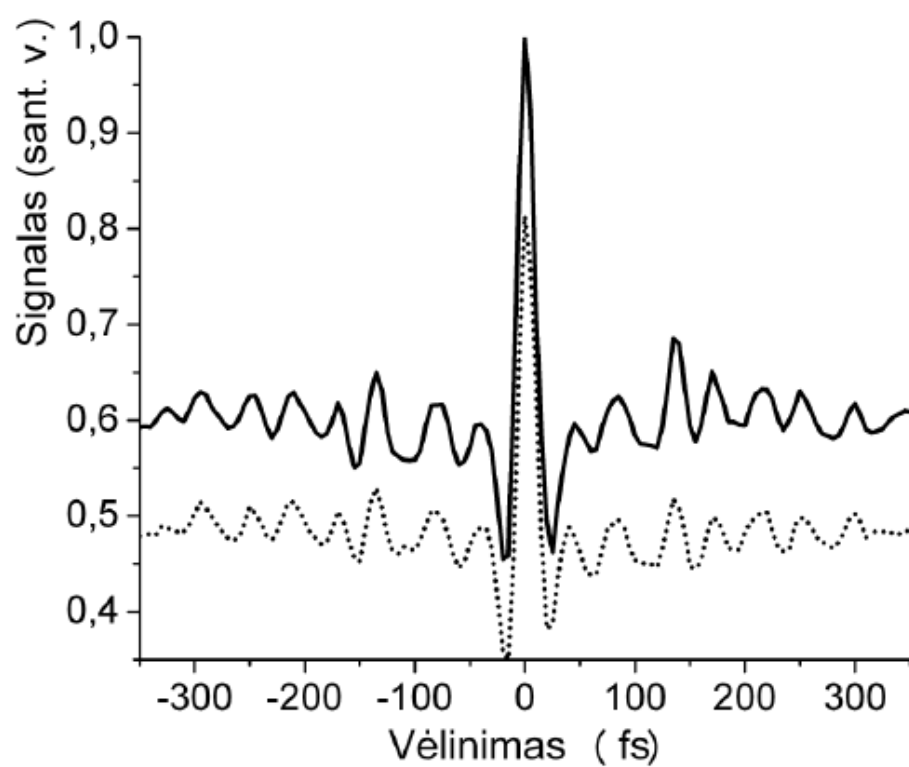
- THz impulso (20) spektras ir jo sugertis nustatomi, suskaičiavus THz impulso (20) interferencinio pėdsako Furje transformaciją.



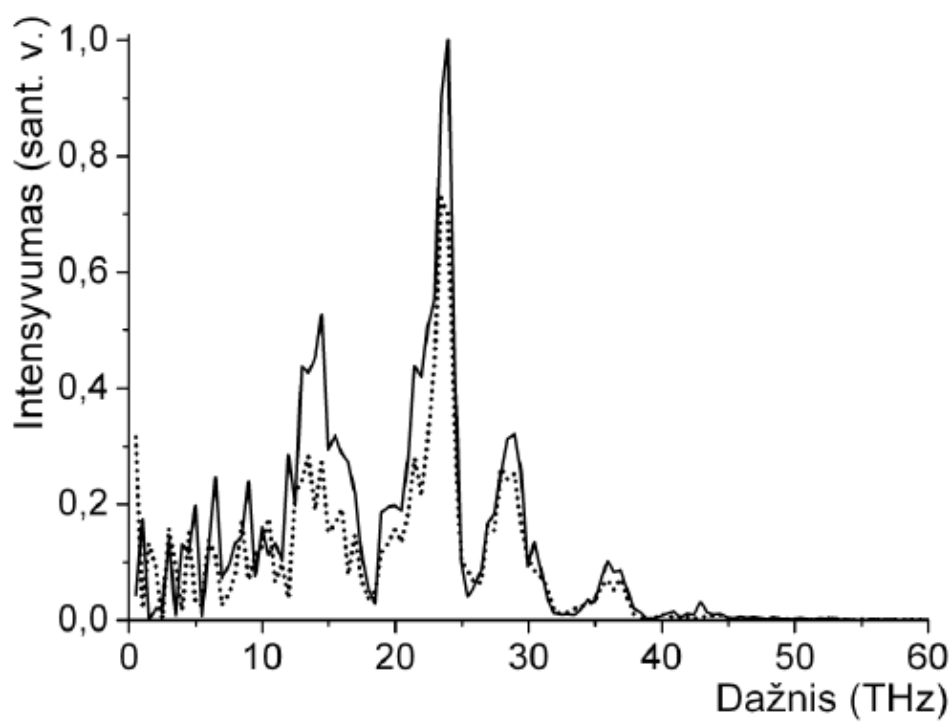
1 pav.



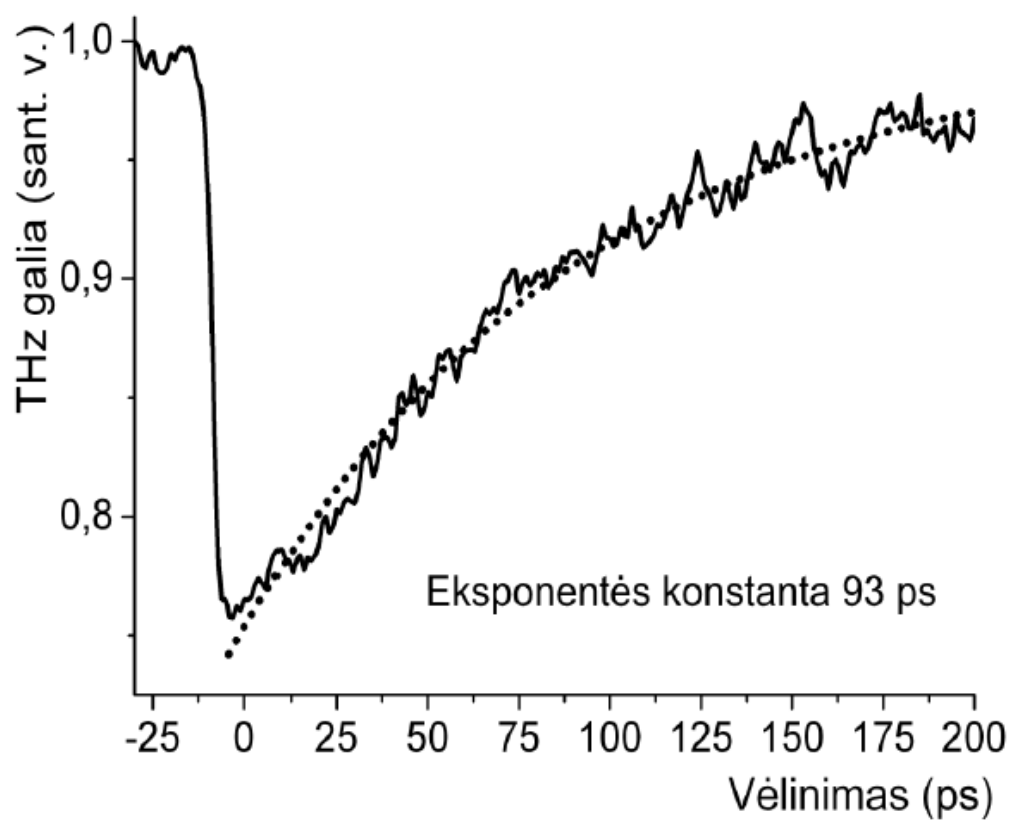
2 pav.



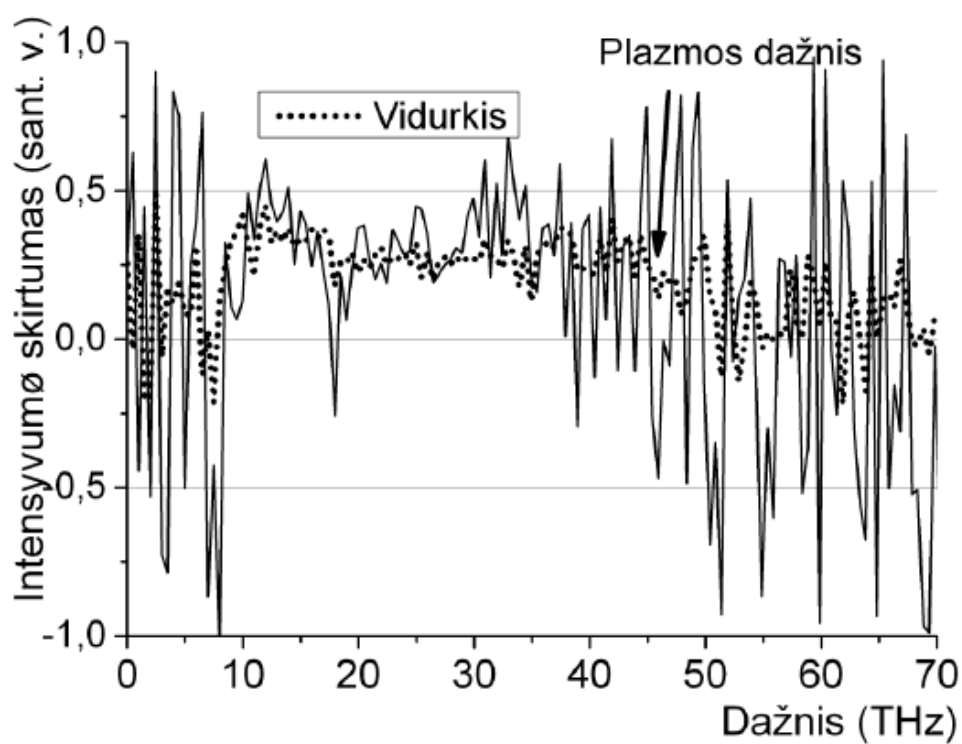
a)



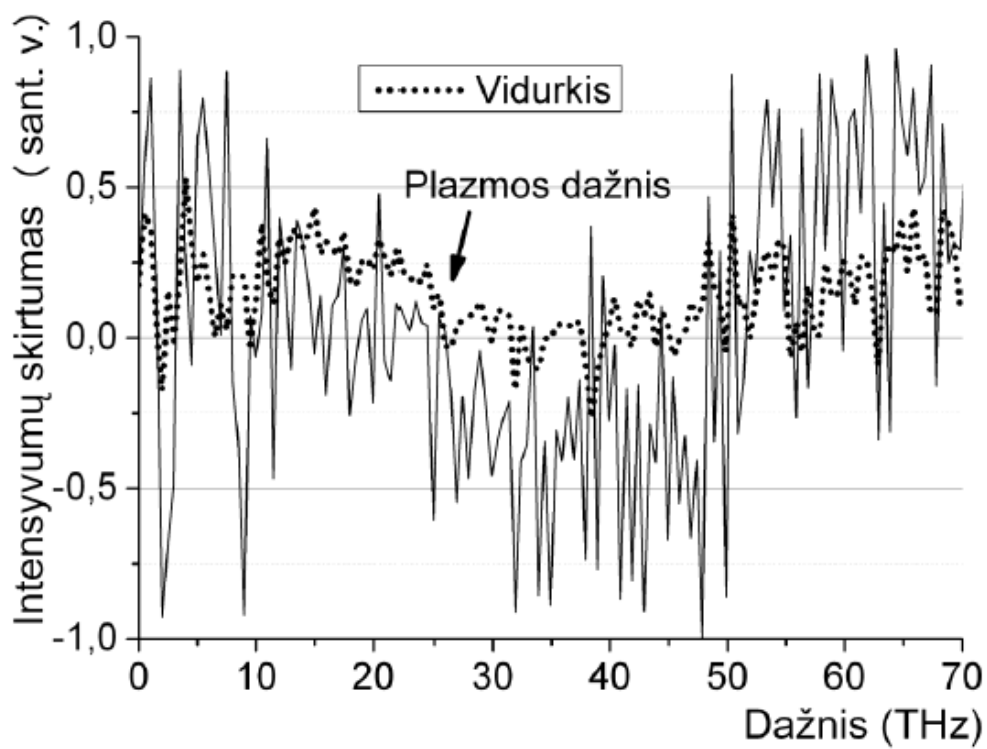
b)



4 pav.

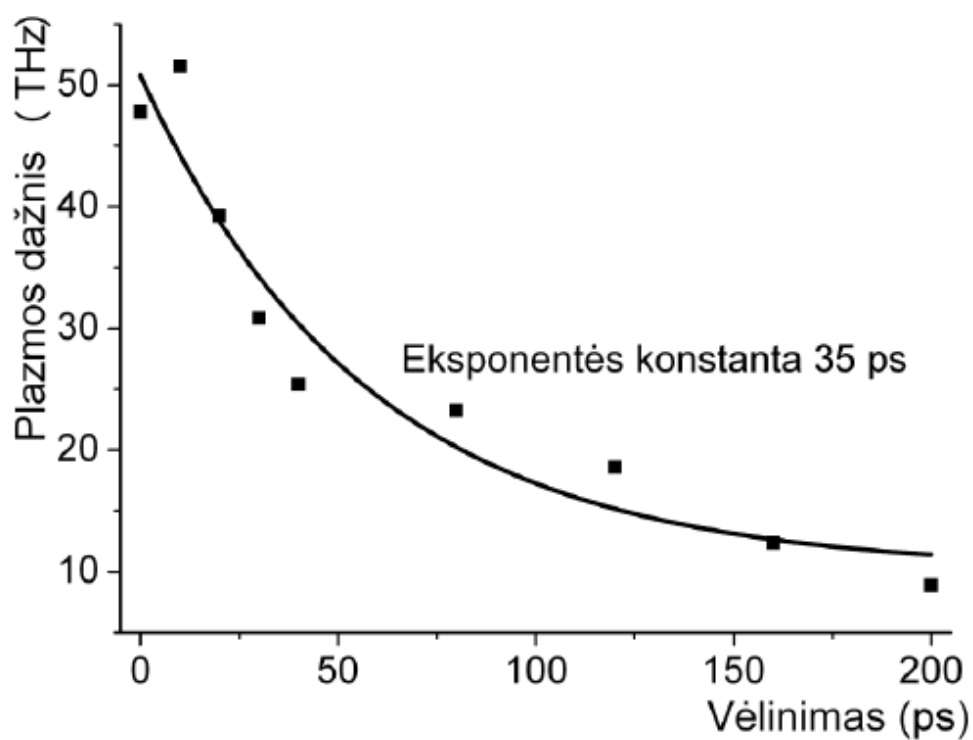


a)

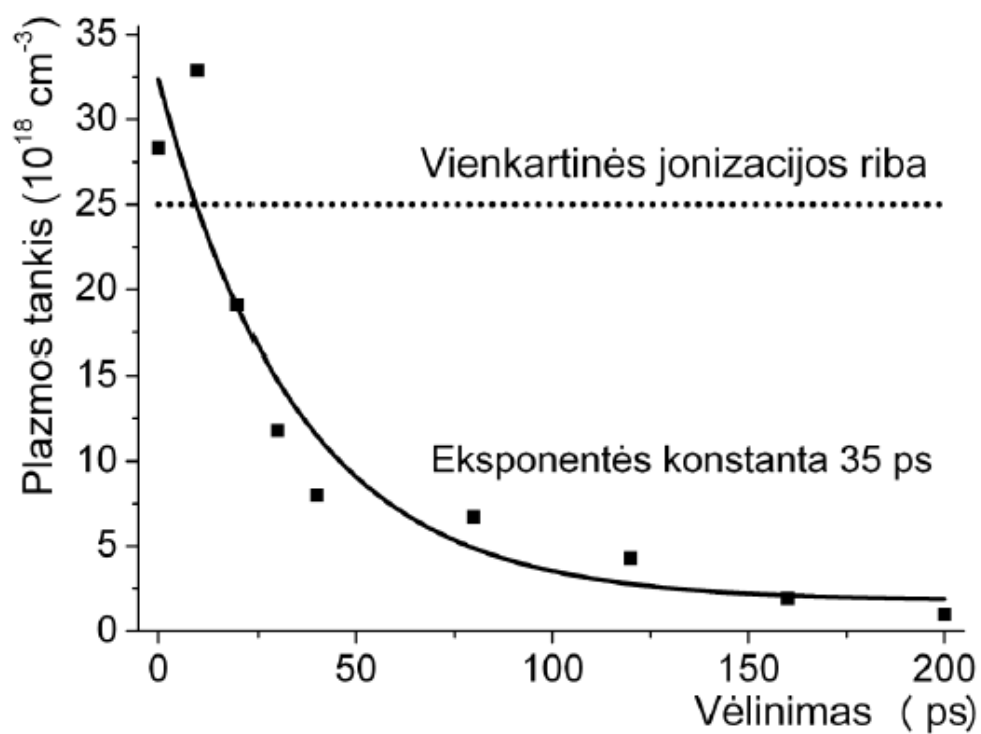


b)

5 pav.



a)



b)

6 pav.