

(12) **PARAIŠKOS APRAŠYMAS**

(21) Paraiškos numeris: **2023 510**
(22) Paraiškos padavimo data: **2023-03-06**
(41) Paraiškos paskelbimo data: **2024-09-10**

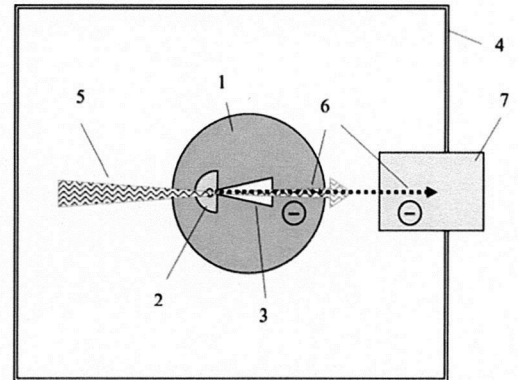
(71) Pareiškėjas:
Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras, Savanorių pr. 231, LT-02300 Vilnius, LT
(72) Išradėjas:
Vidmantas TOMKUS, LT
Juozas DUDUTIS, LT
Gediminas RAČIUKAITIS, LT
Miglė MACKEVIČIŪTĖ, LT
(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:
Virgina Adolfina DRAUGELIENĖ, 8, UAB TARPINĖ, A.P.Kavoliuko g. 24-152, LT-04328 Vilnius, LT

(54) Pavadinimas:

Elektronų injektavimo ir greitinimo būdas ir įrenginys, skirti lazeriniams plazmos greitintuvams

(57) Referatas:

Išradimas yra susijęs su elektronų greitinimu lazeriniais plazmos greitintuvais. Konkrečiai, šis išradimas yra susijęs su greitinamų elektronų energijos padidinimu ir elektronų pluošto energijos dispersijos bei divergencijos sumažinimu, pagrįstu elektronų kiekio ir injektavimo vietos į plazmos bangą suderinimu su plazmos bangos ilgiu, faze ir lazerinės spinduliuotės laikiniu bei erdviu suderinimu su plazmos bangos ilgiu, dujų taikinio formavimui panaudojant mikrofluidinį lustą. Išradimu siekiama padidinti greitinamų elektronų energiją ir sumažinti elektronų pluošto energijos dispersijos bei divergenciją, elektronų greitinimui panaudojant mažesnės impulso energijos ultratrumpuosius femtosekundinės impulso trukmės lazerius, veikiančius kilohercų pasikartojimo dažniu.



1 pav.

Elektronų įjektavimo ir greitinimo būdas ir įrenginys, skirti lazeriniams plazmos greitintuvams

Technikos sritis

Išradimas yra susijęs su elektronų greitinimu lazeriniais plazmos greitintuvais. Konkrečiai, šis išradimas yra susijęs su greitinamų elektronų energijos padidinimu ir elektronų pluošto energijos dispersijos bei skėsties sumažinimu, pagrįstu elektronų kiekio ir įjektavimo vietos į plazmos bangą suderinimu su plazmos bangos ilgiu, faze ir lazerinės spinduliuotės laikiniu bei erdvinio suderinimu su plazmos bangos ilgiu, dujo taikinio formavimui panaudojant mikrofluidinį lustą.

Technikos lygis

Žinomi elektronų greitinimo būdai įrenginiuose, naudojančys lazerinės spinduliuotės suformuotas plazmos bangas dujiniuose taikiniuose. 10^{18} W/cm² lazerio intensyvumo elektromagnetinis laukas elektronus gali pagreitinti iki reliatyvistinių energijų. Petavatiniai lazeriai, kurių smailinis intensyvumas siekia 10^{22} – 10^{23} W/cm², leidžia pagreitinti ne tik elektronus, bet ir protonus bei sunkesnius jonus [T. Tajima, K. Nakajima, and G. Mourou, "Laser Acceleration," *Rivista del Nuovo Cimento* 40(2), 33–133 (2017)]. Lazerinių plazmos greitintuvų (LPG) sukuriama 100 GV/m – 1 TV/m plazmos elektrinis laukas daugiau kaip 3 eilėmis viršija didžiausią radijo dažnio greitintuvuose naudojamą 200–400 MV/m lauką. LPG pagreitina elektronų pluoštus iki šimtų MeV – kelių GeV energijos. [E. Esarey, P. Sprangle, and J. Krall, "Laser acceleration of electrons in vacuum," *Physical Review E* 52(5), 5443–5453 (1995)]. Ultratrumpųjų femtosekundinės impulsų trukmės kilohercinio pasikartojimo lazeriai leidžia sumažinti lazerinių greitintuvų kaštus ir gabaritus. [J. Faure, D. Gustas, D. Guénot, A. Vernier, F. Böhle, M. Ouillé, S. Haessler, R. Lopez-Martens, and A. Lifschitz, "A review of recent progress on laser-plasma acceleration at kHz repetition rate," *Plasma Physics and Controlled Fusion* 61(1), 014012 (2019)]. Tačiau dėl ribotos impulso energijos tokiais lazeriais sunku elektronus pagreitinti iki tam tikriems taikymams reikalingos 150–200 MeV energijos. Įvairūs elektronų įjektavimo būdai aprašyti pvz. [J. P. Couperus, R. Pausch, A. Köhler, O. Zarini, J. M. Krämer, M. Garten, A. Huebl, R. Gebhardt, U. Helbig, S. Bock, K. Zeil, A. Debus, M. Bussmann, U. Schramm, and A. Irman, "Demonstration of a beam loaded

nanocoulomb-class laser wakefield accelerator," Nature Communications 8(1), (2017)].

Patentų paraiškose KR20100134982A, KR20030012781A1 atskleidžiami elektronų injecktavimo ir greitinimo valdymo būdai, keičiant dujų čiurkšlių koncentraciją ir formuojant mažėjančios koncentracijos gradientą lazerio pluošto sklaidimo kryptimi. Patento paraiškoje US2018168024A1 atskleistas elektronų injecktavimo būdas, panaudojant viršgarsinių dujų srautų smūgines bangas, o patento paraiškoje CZ2021247A3 atskleistas įrenginys ir būdas, naudojantis dujų čiurkšlę jonizaciniam elektronų injecktavimui, ir atskirą dujų kamerą elektronų greitimui, kur lazerio spinduliuotę nukreipus į dujinį taikinį ir dujoms sąveikaujant su lazerio spinduliuote, susiformuoja plazmos banga, į kurią injektuojami elektronai ir jie greitunami elektriniame lauke dujų kameroje.

Elektronų greitimui naudojant kilohercinio pasikartojimo dažnio kelių ciklų ultratrumpuosius femtosekundinius lazerio impulsus, optimalus plazmos bangos ilgis siekia tik 5-8 μm , o lazerio pluoštas fokusuojamas į 3-5 μm spindulio radiusą. Dėl to mikrotūtas, skirtas dujų čiurkšlių ir plazmos kanalų formavimui tokiu tikslumu, mechaniškai sunku pagaminti. Elektronai injektuojami per visą plazmos bangos ilgį, greitinimo atstumas nėra optimalus, pasiekiamos mažesnės pagreintų elektronų energijos, o elektronų energijos dispersija yra didelė.

Sprendžiama techninė problema

Išradimu siekiama padidinti greitnamų elektronų energiją ir sumažinti elektronų pluošto energijos dispersiją bei skėstį, elektronų greitimui panaudojant mažesnės impulso energijos ultratrumpuosius femtosekundinės impulso trukmės lazerius, veikiančius kilohercų pasikartojimo dažniu.

Išradimo esmės atskleidimas

Uždavinio sprendimo esmė pagal pasiūlytą išradimą yra tokia: elektronų injecktavimo ir greitinimo būde, skirtame lazeriniams plazmos greitintuvams, apimantis lazerio spinduliuotės nukreipimą į dujinį taikinį, kur dujoms sąveikaujant su lazerio spinduliuote susiformuoja plazmos banga, elektronų injecktavimą į susiformavusią plazmos bangą ir jų greitinimą plazmos bangos elektriniame lauke, kur dujų taikinį suformuoja, naudojant mikrofluidinį lustą su dvejomis tūtomis, į kurias tiekia

skirtingų rūšių dujas, kurios suformuoja atitinkamai viršgarsines dujų čiurkšles, skirtas kintamos koncentracijos plazmos kanalo suformavimui lazerio spindulio sklaidimo kryptimi, ir elektronų kiekio, injektuojamo į plazmos bangą, ir injektavimo vietos nustatymui.

Mikrofluidinio lusto dujiniame taikinyje susiformuoja plazmos kanalas, kuriame plazmos koncentracija yra suderinta su lazerio intensyvumu pluošto sklaidimo kryptimi, impulso trukme, bangos ilgiu, fokusuojamos spinduliuotės pluošto vieta, diametru, o elektronų kiekis, injektuojamas į plazmos bangą ir injektavimo vieta suderinti su plazmos bangos, sukeltos plazmos kanale faze, parenkant dujų slėgio skirtumą tarp slėgių minėtuose pirmoje tūtoje ir antroje tūtoje ir jų sienelių kampus α , β atžvilgiu vertikalės, nepriklausomai nuo plazmos kanalo parametrų.

Minėtos lazerinės impulsinės spinduliuotės impulso trukmė yra ribose nuo 5 iki 30 fs, impulso energija yra ribose nuo 5 iki 200 mJ ir bangos ilgis yra ribose nuo 380 iki 1100 nm, o lazerio spinduliuotės, nukreiptos į lazerinį plazmos greitintuvą optinė sistema sukonstruota taip, kad sufokusuotų Gauso profilio pluoštą arba suformuotų iš dalies nedifraguojantį lazerio Gauso-Beselio pluoštą.

Plazmos kanalo formavimui naudojamų dujų koncentracija siekia $8 \cdot 10^{18} - 1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, o lazerio spinduliuotė lazerinės plazmos greitintuve fokusuojama į $2.5 \text{ } \mu\text{m} - 25 \text{ } \mu\text{m}$ skersmenį dujiniame taikinyje.

Elektronų greititimui naudojamos pilnai jonizuotos mažo atominio skaičiaus dujos, tokios kaip helis ar vandenilis, įpurškiamos per antrą tūtą ir suformuojančios pastovaus, mažėjančios ar didėjančios koncentracijos dujų čiurkšlės išilginį plazmos kanalo profilį lazerio spindulio sklaidimo kryptimi, o elektronų injektavimui naudojamos didesnio atominio skaičiaus dujų, tokių kaip azoto, turinčių nejonizuotų elektronų, mišinys su heliu ar vandeniliu, įpurškiamas per pirmą mikrotūtą ir suformuojančios dujų čiurkšlę.

Elektronų injektavimo į plazmos bangą vieta keičiama, derinant dujų slėgį skirtingų dujų tiekimo pirmoje ir antroje tūtose, ir koncentracijos gradientą tarp tūtų suformuotų čiurkšlių, bei pirmos ir antros tūtų sienelių kampus α , β bei antrosios tūtos pokrypio kampą γ , nusakančius smūginių bangų susidarymo vietą ir

koncentracijos gradiento susiformavimą, o injektuojamų elektronų kiekis derinamas, parenkant papildomai jonizuojamų didesnio atominio skaičiaus dujų jonizacijos energiją ir keičiant dujų mišinio procentinę sudėtį.

Išilginis mažėjančios dujų koncentracijos plazmos koncentracijos profilis lazerio sklidimo kryptimi gali būti suformuojamas, panaudojant smūginės bangos atspindį nuo antrosios tūtos vertikalios sienelės, o čiurkšlės yra sumaišomos antrosios tūtos vertikalios sienelės, platėjančios sienelės ar kakliuko zonose.

Išilginis plazmos koncentracijos profilis lazerio sklidimo kryptimi gali būti pritaikytas plazmos bangos fazės paderinimui, greitinimo nuotolio padidimui, bei didesnio ryškio antrinės betatrono spinduliuotės generacijai.

Kitas pagal pasiūlytą išradima techninis sprendimas yra elektronų injektavimo ir greitinimo įrenginys, skirtas lazeriniams plazmos greitintuvams, apimantis dujų taikinį, kuriame dujoms sąveikaujant su lazerio spinduliuote susiformuoja plazmos banga, į kurią injektuojami ir kurioje greitunami elektronai, kur dujų taikinyje yra mikrofluidinis lustas, turintis dvi tūtas, skirtas dviejų skirtingų rūšių dujoms tiekti ir atitinkamai viršgarsinėms čiurkšlėms suformuoti, kurios skirtos kintamos koncentracijos plazmos kanalams suformuoti lazerio spindulio sklidimo kryptimi, ir elektronų kiekiui, injektuojamam į plazmos bangą ir injektavimo vietai nustatyti.

Pirmos tūtos, skirtos elektronų injektavimui, diametras yra nuo 50 iki 500 mikronų, antros tūtos, skirtos elektronų greitinimui, ilgis yra nuo 100 mikronų iki 10 centimetrų, o pereinamosios zonos plotis tarp dviejų čiurkšlių, susiformavusios dėl smūginių bangų yra mažesnis nei apytiksliai 5 mikronai.

Mikrofluidinis lustas dujų čiurkšlių formavimui pagamintas iš monolitinio optiškai skaidrios medžiagos, ruošinio 3D lazerinio apdorojimo būdu.

Optiškai skaidri medžiaga, iš kurios pagamintas mikrofluidinis lustas dujų čiurkšlių formavimui yra lydytas kvarcas arba safyras.

Išradimo naudingumas

Pasiūlytame išradime dujų taikinį, skirtą elektronų iniektavimo ir greitinimo valdymui, suformuoja, panaudojant mikrofluidinį lustą, pagamintą 3D lazerinio apdirbimo būdu iš optiškai skaidrių medžiagų. Panaudojant pagal išradimą pasiūlytą būdą ir įrenginį, ženkliai padidinama pagreitintų elektronų energija, sumažinama elektronų energijų dispersija ir elektronų pluošto skėstis. Elektronus taikant VHEE (*Very High Energy Electron*) – didelės energijos elektronų radijo terapijai – galima pasiekti reikiamą 150 – 200 MeV energiją, o maža elektronų pluoštelio energijos dispersija ir maža skėstis leidžia tiksliau paveikti vėžines ląsteles ir apsaugoti sveikus audinius. Didesnės energijos ir mažos energijų dispersijos elektronai generuoja didesnės energijos ir didesnio ryškio antrinę Rentgeno spinduliuotę, reikalingą medžiagų diagnostikai. Elektronus pagreitinti galima, panaudojant mažesnės impulso energijos ultratrumpuosius femtosekundinės impulso trukmės lazerius, veikiančius kilohercų pasikartojimo dažniu. Reikiamus elektronų pluoštelio parametrus galima pasiekti mažesnėmis sąnaudomis, nedidinant greitinimui reikalingo įrenginio kaštų, o kaupiamoji radijo terapijos dozė ir antrinės spinduliuotės ryškis pasiekiamas dėl didesnio lazerio impulsų pasikartojimo dažnio.

Detaliau išradimas paaiškinamas brėžiniais, kur

1 pav.– pavaizduotas elektronų lazerinio plazmos greitintuvo įrenginys, kuriame dujinio taikinio formavimui naudojamas mikrofluidinis lustas.

2 pav.- pavaizduotas lazerinio plazmos greitintuvo mikrofluidinio lusto išilginis pjūvis su lygiagrečiai sklindančių dujų čiurkšlių formavimo schema.

3 pav.- pavaizduotas lazerinio plazmos greitintuvo mikrofluidinio lusto išilginis pjūvis su susikertančių dujų čiurkšlių formavimo schema.

4 pav.- pavaizduotas lazerinio plazmos greitintuvo mikrofluidinio lusto išilginis pjūvis su mažėjančios dujų koncentracijos formavimo schema, panaudojant smūginės bangos atspindį nuo vertikalios tūtos sienelės ir čiurkšlių sumaišymą tūtos vertikalios sienelės zonoje.

5 pav. - pavaizduotas lazerinio plazmos greitintuvo mikrofluidinio lusto išilginis pjūvis su mažėjančios dujų koncentracijos formavimo schema, panaudojant

smūginės bangos atspindį nuo vertikalios tūtos sienelės ir čiurkšlių sumaišymą platėjančios tūtos zonoje.

6 pav. - pavaizduotas lazerinio plazmos greitintuvo mikrofluidinio lusto išilginis pjūvis su mažėjančios dujų koncentracijos formavimo schema, panaudojant smūginės bangos atspindį nuo vertikalios tūtos sienelės ir čiurkšlių sumaišymą tūtos kakliuko zonoje.

7a pav.- pavaizduotas lazerinio plazmos greitintuvo mikrofluidinio lusto, skirto pastovios dujų koncentracijos kanalo formavimui, vaizdas iš viršaus.

7b pav.- pavaizduota dujų koncentracijos priklausomybė nuo atstumo lazerio spinduliuotės sklaidimo kryptimi pagal 7a pav.

8a pav. - pavaizduotas lazerinio plazmos greitintuvo mikrofluidinio lusto, skirto mažėjančios dujų koncentracijos kanalo formavimui, vaizdas iš viršaus.

8b pav. pavaizduota dujų koncentracijos priklausomybė nuo atstumo lazerio spinduliuotės sklaidimo kryptimi pagal 8a pav.

9a pav. - pavaizduotas lazerinio plazmos greitintuvo mikrofluidinio lusto, skirto didėjančios dujų koncentracijos kanalo formavimui, vaizdas iš viršaus.

9b pav.pavaizduota dujų koncentracijos priklausomybė nuo atstumo lazerio spinduliuotės sklaidimo kryptimi pagal 9a pav.

10a pav. - pavaizduotas lazerinio plazmos greitintuvo mikrofluidinio lusto (2 pav.), išilginis pjūvis su OpenFoam programine įranga apskaičiuotu dujų koncentracijos skirstiniu.

10b pav. - dujų koncentracijos priklausomybė nuo atstumo lazerio spinduliuotės sklaidimo kryptimi 0.5 mm virš tūtos žiočių pagal 10a pav.

11a pav.- pavaizduotas lazerinio plazmos greitintuvo mikrofluidinio lusto (2 pav.) realizacijos pavyzdžio modelis.

11b pavaizdotas 3D lazerine technologija pagamintas mikrofluidinio lusto pavyzdys.

Išradimo realizavimo pavyzdys

Elektronų inekravimo ir greitimo būde naudojamas dviejų skirtingų rūšių dujų taikiny, skirtas lazeriniams plazmos greitintuvams, kuriame sąveikaujant su lazerio spinduliuote susiformuoja plazmos bangos, ir į plazmos bangą inekravuoti elektronai greitunami plazmos bangos elektriniame lauke. Elektronų inekravija ir greitinimas atliekami, panaudojant mikrofluidinį lustą, kuriame tiekiamos dviejų skirtingų rūšių dujos ir suformuojamos viršgarsinės dujų čiurkšlės.

Lazerinė spinduliuotė sklisdama per dujinį taikinį, jonizuoja dujas ir suformuoja plazmos bangą. Dėl pandemotorinės jėgos, susidarančios elektronams svyruojant lazerio impulso elektriniame lauke, elektronai išstumiami iš didžiausio stiprumo elektrinio lauko centro. Susiformuoja plazmos burbulas, kurio viduje susidaro nuskurdinta elektronais jonizuotų atomų zona. Tam tikromis sąlygomis, elektronai gali būti pagauti į plazmos burbulo vidų ir pagreitinti stipriame plazmos bangos elektriniame lauke. Plazmos burbulo dydis priklauso nuo dujų koncentracijos čiurkšlėje. Esant didesniai dujų slėgiui, jonizuotų dujų koncentracija bus didesnė o plazmos burbulo diametras mažesnis. Mažėjančios koncentracijos (*down-ramp*) dujų čiurkšlėje, plazmos burbulo dydis kinta, jis plečiasi mažėjant slėgiui ir elektronai, esantys už plazmos burbulo, gali būti efektyviai pagauti į plazmos burbulą ir pagreitinti. Slėgio kitimui dujų čiurkšlėje gali būti naudojamos smūginės bangos, susidarančios viršgarsiniam dujų čiurkšlių srautui atsitrenkus į kliūtį ar susikertant dviem viršgarsinių čiurkšlių srautams. Tokiu būdu galima paderinti elektronų inekravijos į plazmos burbulą vietą. Elektronų greitinimui dujų taikinyje naudojamos lengvos jonizuotos helio ar vandenilio dujos, kurios suformuoja reikiamos koncentracijos plazmos kanalą. Elektronų inekravimui dujų taikinyje naudojamos sunkesnės, didesnio atominio skaičiaus pvz. azoto dujos, kuriose papildomai jonizuojami gilesnių lygmenų elektronai. Jonizacija vyksta ten, kur lazerio intensyvumas yra didžiausias ir jonizuoti elektronai tiesiogiai patenka į plazmos burbulo vidų. Tokiu būdu galima keisti greitintamų elektronų krūvį, tačiau, jei elektronai yra inekravojami viso lazerio spindulio sklaidimo dujų taikinyje laiką, čiurkšlės pradžioje ir gale inekravuoti elektronai yra greitunami skirtingu atstumu ir jų energijos išbarstymas yra didelis.

Išradimu siekiama injektuoti elektronus į plazmos bangos pradžią, naudojant vieną dujų čiurkšlę su sunkesnių ir lengvesnių dujų mišiniu ir mažo atominio skaičiaus dujų čiurkšlę elektronų greitinimui. Kombinuojant jonizacinį ir mažėjančios koncentracijos injektavimą, galima pasiekti didelę injektuotų elektronų koncentraciją plazmos bangos pradžioje, o slėgių skirtumu ir/ar smūgine banga tiksliai fiksuoti injekcijos vietą. Elektronus injektavus plazmos bangos pradžioje, elektronai greitunami maksimalų atstumą, pasiekiami didesnė energija ir sumažėja elektronų energijų išbarstymas. Keičiant greitinimo kanalo dujų koncentraciją, plazmos bangos ilgį galima priderinti prie lazerio impulso erdvinių ir laikinių parametru nepriklausomai nuo greitinamų elektronų krūvio ir injektavimo vietos.

Pasiūlytas elektronų injektavimo ir greitinimo įrenginys (Pav.1) susideda iš mikrofluidinio lusto 1 su dvejomis tūtomis (2, 3), kurios suformuoja dujinį taikinį iš viršgarsinių dujų čiurkšlių. Mikrofluidinis lustas 1 sumontuotas vakuuminėje kameroje 4. Lazerinė spinduliuotė 5, sklisdama per dujinį taikinį, jonizuoja dujas ir suformuoja plazmos bangą. Į plazmos bangą injektuojami ir greitunami elektronų pluošteliai 6, kurie nukreipiami į eksperimentinę kamerą 7 ir gali būti panaudoti antrinės spinduliuotės generacijai, diagnostikai ir radioterapijai. Elektronų injektavimui (Pav. 2) naudojamos didesnio ir mažesnio atominio skaičiaus dujų, pvz. 1% azoto ir helio mišinys, tiekiamas į luste 1 esančią tūtą 2, kuri suformuoja čiurkšlę 11. Mažesnio atominio skaičiaus dujos, pvz. helis ar vandenilis, tiekiamos į luste 1 esančią tūtą 3, kuri suformuoja čiurkšlę 12, naudojamą elektronų greitinimui. Tūta 3 gali turėti tiesią sienelės atkarpą 10, į kurią atsitrenkęs dujų srautas 12 pakeičia kryptį ir toliau sklinda lygiagrečiai dujų srautui 11 bei suformuoja mažėjančios koncentracijos gradientą, reikalingą elektronų injektavimui į plazmos bangos pradžią. Vienodi tūtų 2 ir 3 sienelių 8 ir 9 pokrypio kampai α ir β vertikalės atžvilgiu leidžia sumažinti dujų slėgio kritimą čiurkšlių susikirtimo zonoje ir tiksliau nustatyti injektuojamų elektronų kiekį ir vietą. Injektavimo vietą galima keisti, smūgines bangas suformuojant dvejomis susikertančiomis čiurkšlėmis (Pav. 3) bei keičiant tūtų kanalų kampus α , β ir tūtos pokrypio kampą γ vertikalės atžvilgiu. Išilginis mažėjančios dujų koncentracijos plazmos koncentracijos profilis lazerio sklidimo kryptimi gali būti formuojamas, panaudojant smūginės bangos atspindį nuo vertikalios tūtos sienelės 10, o lengvųjų dujų ir dujų mišinio čiurkšlės gali būti sumaišomos tūtos vertikalios sienelės (Pav.4), plėtėjančios sienelės (Pav. 5) arba kakliuko zonoje (Pav. 6). Elektronų greitinimui lazerio spinduliuotės sklidimo

kryptimi gali būti naudojamos pastovios (Pav. 7), mažėjančios (Pav. 8), ar didėjančios (Pav. 9) tūtos 3 suformuoti dujų koncentracijos kanalai. Tokie išilginiai plazmos koncentracijos kanalų profiliai gali būti pritaikyti plazmos bangos fazės paderinimui, greitinimo nuotolio padidinimui, bei didesnio ryškio antrinės betatrono spinduliuotės generacijai.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Elektronų injektavimo ir greitinimo būdas, skirtas lazeriniams plazmos greitintuvams, apimantis:

- lazerio spinduliuotės (5) nukreipimą į dujinį taikinį, kur dujoms sąveikaujant su lazerio spinduliuote susiformuoja plazmos banga ,
- elektronų injektavimą į susiformavusią plazmos bangą ir jų greitinimą plazmos bangos elektriniame lauke, besiskiriantis dujų taikinį suformuoja, naudojant mikrofluidinį lustą (1) su dvejomis tūtomis (2) ir (3), į kurias tiekia skirtingų rūšių dujas, kurios suformuoja atitinkamai viršgarsines dujų čiurkšles (11) ir (12), skirtas kintamos koncentracijos plazmos kanalo suformavimui lazerio spindulio sklaidimo kryptimi, ir elektronų kiekio, injektuojamo į plazmos bangą, ir injektavimo vietos nustatymui.

2. Būdas pagal 1 punktą, besiskiriantis tuo, kad mikrofluidinio lusto (1) dujiniame taikinyje susiformuoja plazmos kanalas, kuriame plazmos koncentracija yra suderinta su lazerio intensyvumu pluošto sklaidimo kryptimi, impulso trukme, bangos ilgiu, fokusuojamos spinduliuotės pluošto vieta, diametru, o elektronų kiekis, injektuojamas į plazmos bangą ir injektavimo vieta suderinti su plazmos bangos, sukeltos plazmos kanale faze, parenkant dujų slėgio skirtumą tarp slėgių pirmoje tūtoje (2) ir antroje tūtoje (3) ir jų sienelių (8) ir (9) kampus α , β atžvilgiu vertikalės, nepriklausomai nuo plazmos kanalo parametrų.

3. Būdas pagal bet kurį iš 1-2 punktų, besiskiriantis tuo, kad minėtos lazerinės impulsinės spinduliuotės (5) impulso trukmė yra ribose nuo 5 iki 30 fs, impulso energija yra ribose nuo 5 iki 200 mJ ir bangos ilgis yra ribose nuo 380 iki 1100 nm, o lazerio spinduliuotės (5) nukreiptos į lazerinį plazmos greitintuvą optinė sistema sukonstruota taip, kad sufokusuotų Gauso profilio pluoštą arba suformuotų iš dalies nedifraguojantį lazerio Gauso-Beselio pluoštą.

4. Būdas pagal bet kurį iš 1-3 punktų, besiskiriantis tuo, kad plazmos kanalo formavimui naudojamų dujų koncentracija siekia $8 \cdot 10^{18} - 1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, o lazerio spinduliuotė lazerinės plazmos greitintuve fokusuojama į $2.5 \text{ } \mu\text{m} - 25 \text{ } \mu\text{m}$ skersmenį dujiniame taikinyje.

5. Būdas pagal bet kurį iš 1-4 punktų, kuriame elektronų greitinimui naudojamos pilnai jonizuotos mažo atominio skaičiaus dujos, tokios kaip helis ar vandenilis, įpurškiamos per antrą tūtą (3) ir suformuojančios pastovaus, mažėjančios ar didėjančios koncentracijos dujų čiurkšlės (12) išilginį plazmos kanalo profilį lazerio spindulio sklaidimo kryptimi, o elektronų injektavimui naudojamos didesnio atominio skaičiaus dujų, tokių kaip azoto, turinčių nejonizuotų elektronų, mišinys su heliu ar vandeniliu, įpurškiamas per pirmą mikrotūtą (2) ir suformuojančios dujų čiurkšlę (11).

6. Būdas pagal bet kurį iš 1-5 punktų, kuriame elektronų injektavimo į plazmos bangą vieta keičiama, derinant dujų slėgį skirtingų dujų tiekimo pirmoje ir antroje tūtose (2) ir (3), ir koncentracijos gradientą tarp tūtomis suformuotų dujų čiurkšlių (11) ir (12), bei tūtų (2) ir (3) sienelių (8) ir (9) kampus α , β bei antrosios tūtos (3) pokrypio kampą γ , nusakančius smūginių bangų susidarymo vietą ir koncentracijos gradiento susiformavimą, o injektuojamų elektronų kiekis derinamas, parenkant papildomai jonizuojamų didesnio atominio skaičiaus dujų jonizacijos energiją ir keičiant dujų mišinio procentinę sudėtį.

7. Būdas pagal bet kurį iš 1-6 punktų, kuriame išilginis mažėjančios dujų koncentracijos plazmos koncentracijos profilis lazerio sklaidimo kryptimi gali būti suformuojamas, panaudojant smūginės bangos atspindį nuo antrosios tūtos (3) vertikalios sienelės (10), o čiurkšlės yra sumaišomos antrosios tūtos vertikalios sienelės (10), platinančios sienelės ar kakliuko zonose.

8. Būdas pagal bet kurį iš 1-7 punktų, kuriame išilginis plazmos koncentracijos profilis lazerio sklaidimo kryptimi gali būti pritaikytas plazmos bangos fazės paderinimui, greitinimo nuotolio padidinimui, bei didesnio ryškio antrinės betatrono spinduliuotės generacijai.

9. Elektronų injektavimo ir greitinimo įrenginys, skirtas lazeriniams plazmos greitintuvams, apimantis dujų taikinį, kuriame dujoms sąveikaujant su lazerio spinduliuote (5) susiformuoja plazmos banga, į kurią injektuojami ir kurioje greitunami elektronai, besiskiriantis tuo, kad dujų taikinyje yra mikrofluidinis lustas (1), turintis dvi tūtas (2, 3), skirtas dviejų skirtingų rūšių dujoms tiekti ir

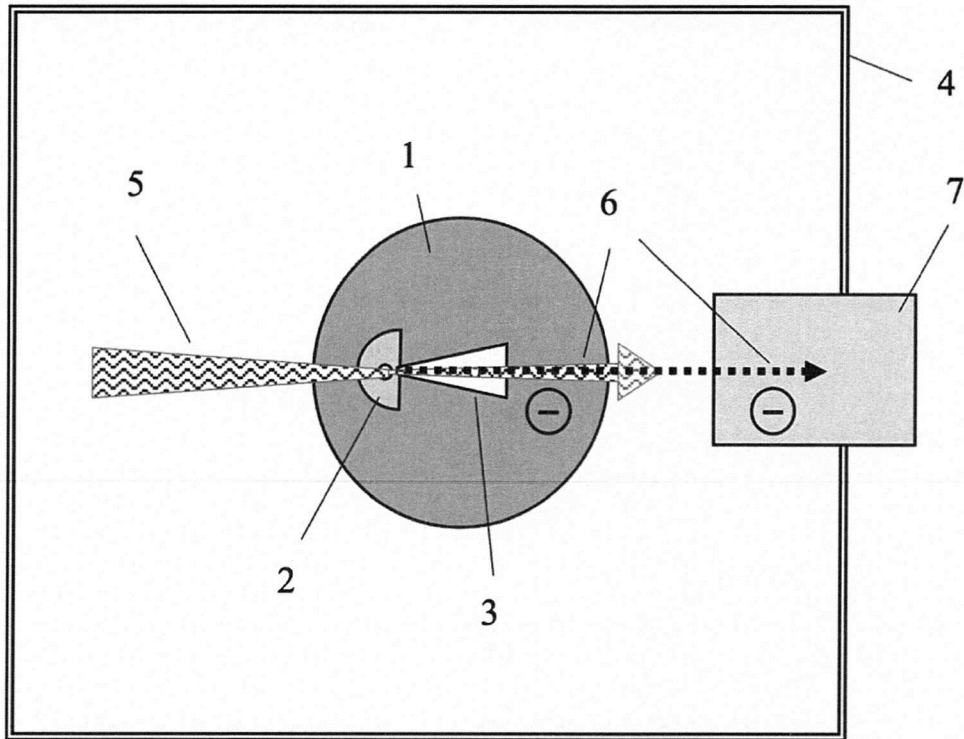
viršgarsinėms dujų čiurkšlėms (11) ir (12) suformuoti, kurios skirtos kintamos koncentracijos plazmos kanalams suformuoti lazerio spindulio sklaidimo kryptimi, ir elektronų kiekiui, injektuojamam į plazmos bangą ir injektavimo vietai nustatyti.

10. Įrenginys pagal 11 punktą, kuriame pirmos tūtos (2), skirtos elektronų injektavimui, diametras yra nuo 50 iki 500 mikronų, antros tūtos (3), skirtos elektronų greitinimui, ilgis yra nuo 100 mikronų iki 10 centimetrų, o pereinamosios zonos plotis tarp dviejų dujų čiurkšlių, susiformavusios dėl smūginių bangų yra mažesnis nei apytiksliai 5 mikronai.

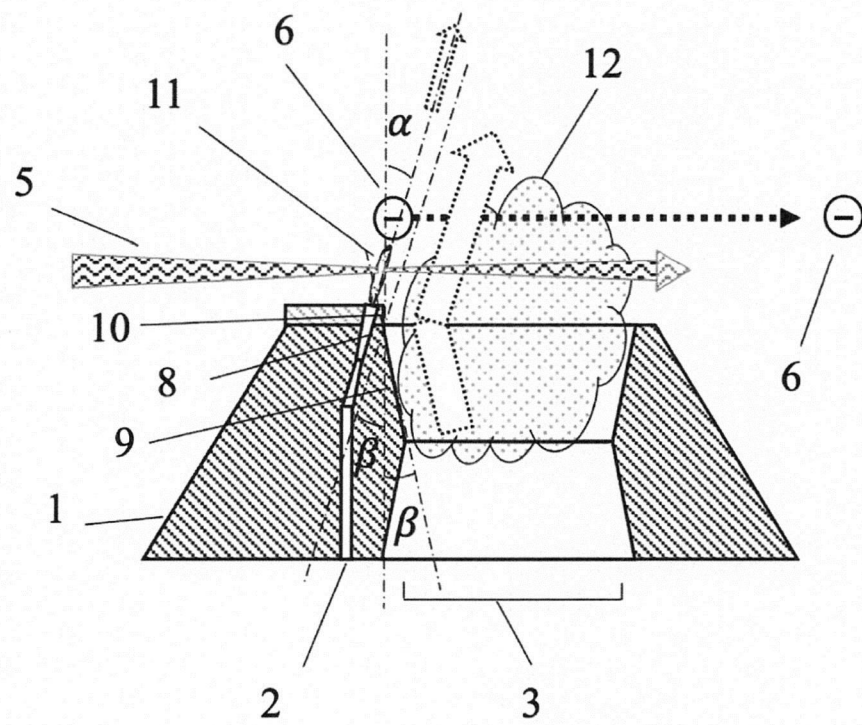
11. Įrenginys pagal bet kurį iš 9-10 punktų, kuriame mikrofluidinis lustas (1) dujų čiurkšlių formavimui pagamintas iš monolitinio optiškai skaidrios medžiagos, ruošinio 3D lazerinio apdorojimo būdu.

12. Įrenginys pagal bet kurį iš 9-11 punktų, kuriame optiškai skaidri medžiaga, iš kurios pagamintas mikrofluidinis lustas dujų čiurkšlių formavimui yra lydytas kvarcas arba safyras.

1/5

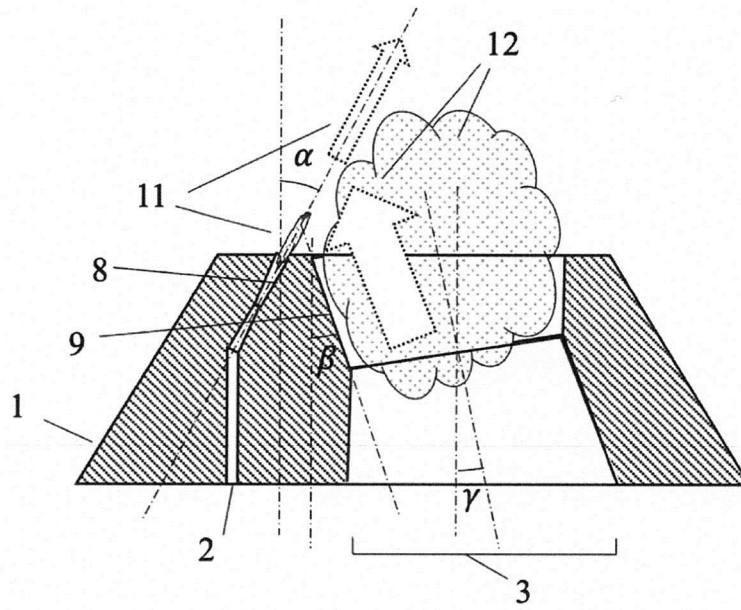


Рав. 1

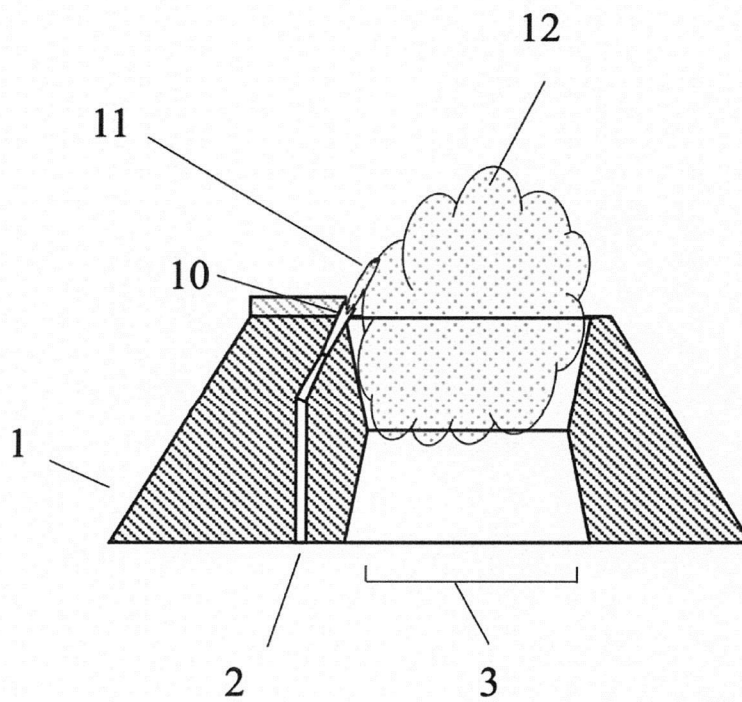


Рав. 2

2/5

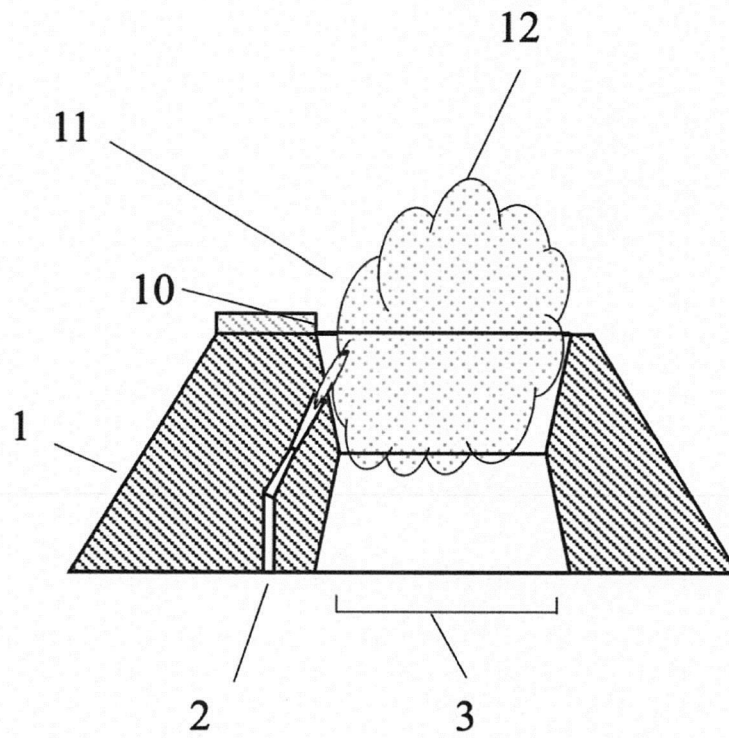


Pav. 3

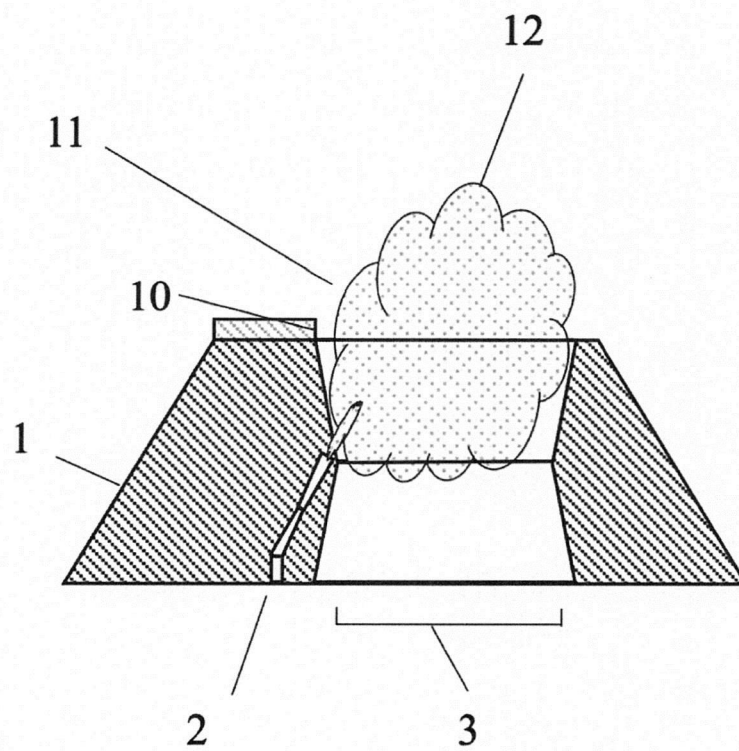


Pav. 4

3/5

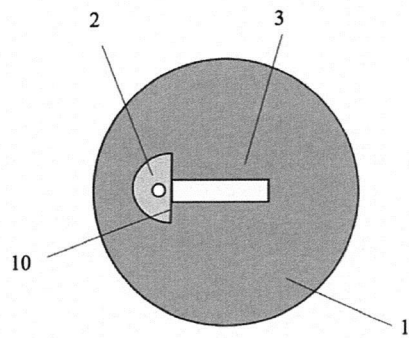


Pav. 5

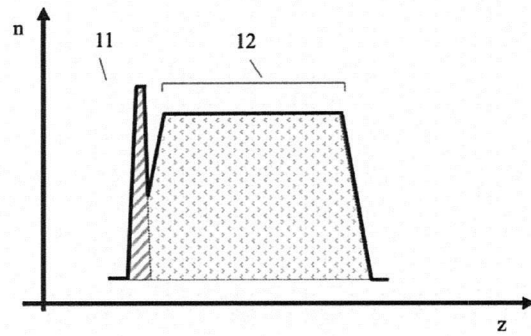


Pav. 6

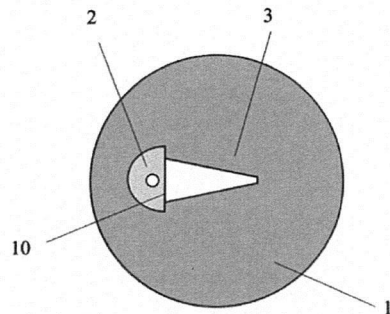
4/5



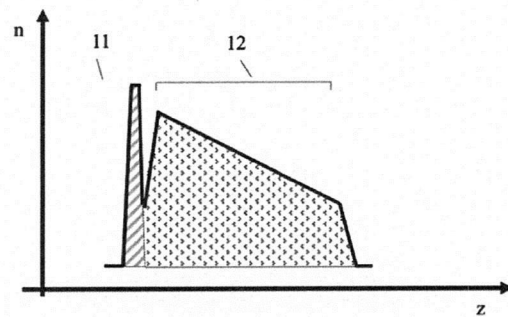
Pav. 7a



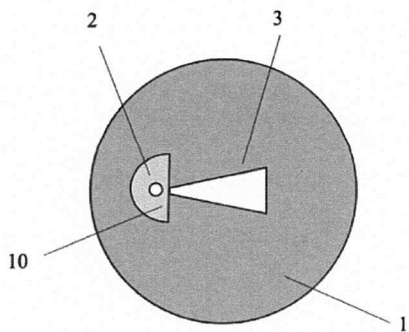
Pav.7b



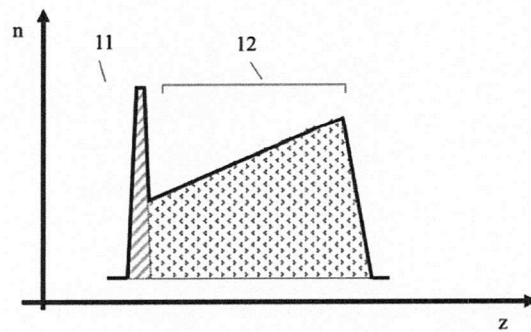
Pav. 8a



Pav.8b

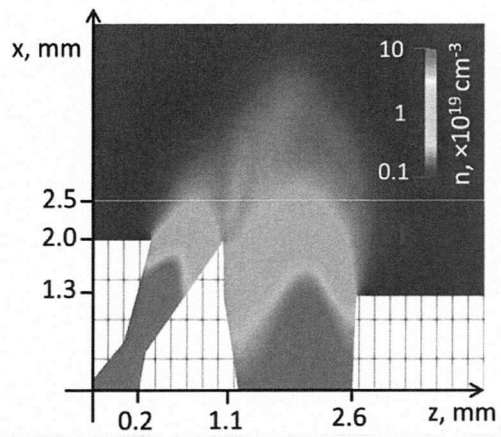


Pav. 9a

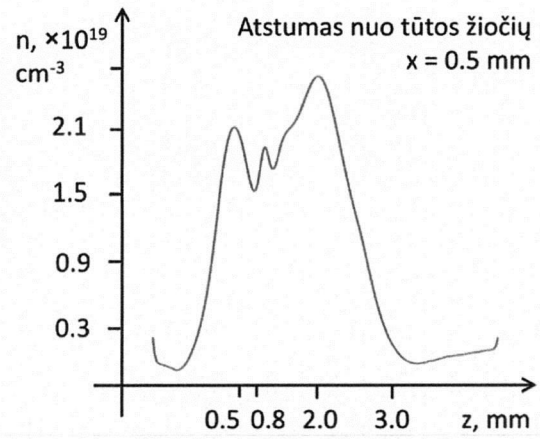


Pav.9b

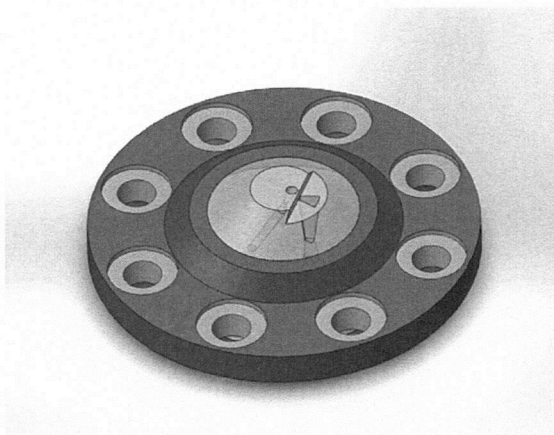
5/5



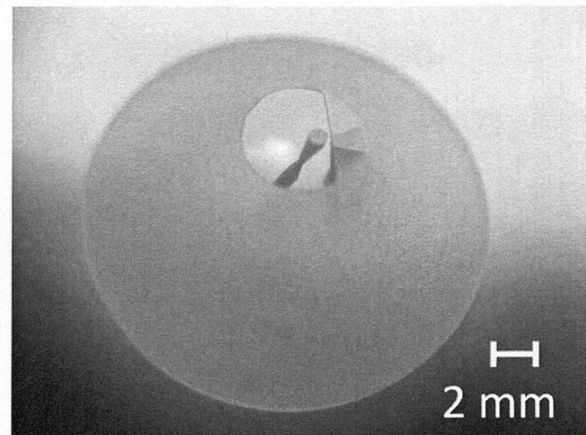
Pav. 10a



Pav.10b



Pav. 11a



Pav.11b