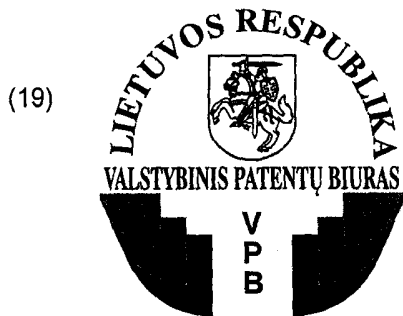




(10) **LT 6250 B**

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

- (11) Patent numeris: **6250** (51) Int. Cl. (2016.01): **G02B 27/00**
G02B 5/00
(21) Paraiškos numeris: **2014 090** **G02F 1/00**
G03F 7/00
(22) Paraiškos padavimo data: **2014-07-10**
(41) Paraiškos paskelbimo data: **2016-01-11**
(45) Patent paskelbimo data: **2016-02-25**
(62) Paraiškos, iš kurios dokumentas išskirtas, numeris: —
(86) Tarptautinės paraiškos numeris: —
(86) Tarptautinės paraiškos padavimo data: —
(85) Nacionalinio PCT lygio procedūros pradžios data: —
(30) Prioritetas: —
(72) Išradėjas:
Titas GERTUS, LT
Andrejus MICHAİLOVAS, LT
(73) Patent savininkas:
UAB „Altechna R&D“, Mokslininkų g. 6A, LT-08412 Vilnius, LT
UAB „EKSPĻA“, Savanorių pr. 237, LT-02300 Vilnius, LT
(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:
Reda ŽABOLIENĖ, Advokatės Redos Žabalienės kontora METIDA, Verslo
centras VERTAS, Gynėjų g. 16, LT-01109 Vilnius, LT

- (54) Pavadinimas:
Lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvas, išsaugantis bangos fronto kreivumą, ir jo panaudojimo būdas
(57) Referatas:

Lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvas apima poliarizaciją transformuojantį optinį elementą ir poliarizaciją analizuojantį optinį elementą, kurie bendrai veikdami įneša lokalius pluošto galios nuostolius bei sukuria tam tikrą pralaidumo raštą, aprašomą skirstiniu TXY. Poliarizaciją transformuojantis optinis elementas yra pagamintas tiesioginio lazerinio įrašymo metodu iš skaidrios optiškai izotropinės medžiagos, pavyzdžiui lydyto kvarco, jos turįje suformuojant bent vieną anizotropinį sluoksnį su įrašytais dvejopai šviesą laužiančiomis nanogardelėmis, atsirandančiomis dėl savaiminio medžiagos struktūros persitvarkymo paveikus femtosekundiniais tiesiškai poliarizuotos lazerinės spinduliuotės impulsais. Visose skersinėse anizotropinio sluoksnio padėtyse yra suformuojamas vienodas fazės vėlinimas tarp dviejų statmenų poliarizacijos dedamųjų. Skirtingai orientuojant dvejopai šviesą laužiančias nanogardeles yra pasiekiamas nevienodas poliarizaciją transformuojančio optinio elemento poveikis pluošto spindulių poliarizacijai ir reikiamas formuotuvo pralaidumo skirstinys TXY. Išradimas gali

būti panaudotas didelės galios lazerinėse sistemose pageidaujamos formos pluošto skersiniam profiliui suformuoti. Transformuojant gausinį pluoštą į plokščios viršūnės pluoštą, galios naudingumo koeficientas yra ne mažesnis kaip 50%.

TECHNIKOS SRITIS

Šis išradimas yra susijęs su prietaisais, skirtais pakeisti šviesos intensyvumą, kurie gali būti naudojami siekiant suformuoti pageidaujamos formos lazerinio pluošto skersinį profilį. Taip pat šis išradimas yra susijęs su apodizatoriais, kurių pagalba Gauso pavidalo intensyvumo pasiskirstymas transformuojamas į pasiskirstymą su plokščia centrine dalimi.

TECHNIKOS LYGIS

Yra žinomi lazerinių pluoštų formuotuvai, kuriais galima gauti pageidaujamos formos skersinį pluošto intensyvumo pasiskirstymą (profilį).

Daugelyje taikymų lazerinio pluošto profilis su plokščia centrine dalimi turi daug privalumų prieš tradicinį Gauso pavidalo pluoštą. Medžiagų mikroapdirbime pluoštais su vienodu intensyvumu per visą apdirbamą plotą bei artimu nuliui intensyvumu gretimose srityse yra pasiekama didesnė raiška ir aukštesnė apdirbimo kokybė. Taip suformotu kaupinimo pluoštu tolygiau apšviečiamas kristalas lazerinio ar parametrinio stiprinimo sistemoje. Analogiškai, lazerinio ar parametrinio stiprinimo sistemoje suformotu stiprinamu pluoštu geriau perdengiamas aktyvusis plotas ir pasiekiamas didesnis stiprinimo efektyvumas. Galiausiai, plokščios viršūnės pluoštai sąlygoja parabolės formos šiluminį lęšį, kuris negadina pluošto kokybės ir yra nesunkiai kompensuojamas. Pluošto profilio kraštų nuožulnumas lemia, kaip pluoštas difraguoja ant optinių elementų apertūrų. Difrakciniai žiedai ir karšti taškai didelės galios lazerinėse sistemose yra maksimalią galią ribojantis faktorius.

Pluoštai su plokščia centrine profilio dalimi, kurie dažniausiai yra vadinami plokščios viršūnės pluoštais, gali būti aprašyti super-Gauso funkcijomis. O formuotuvai, kuriais Gauso pavidalo pluoštai yra transformuojami į plokščios viršūnės pluoštus dažniausiai yra vadinami apodizatoriais.

Patys paprasčiausi būdai apima kelių pluoštelių sukombinavimą į vieną: parinkus atskirų pluoštelių galią, galima kaip mozaiką sudėlioti norimą intensyvumo pasiskirstymą [žiūr. pvz. *Yanbing Jiang et al.*, „Beam-shaping method for uniform illumination by superposition of tilted Gaussian beams“, *Opt. Eng.* 49, 044203 (2010)]. Šie metodai labiau tinka nekoherentiškų pluoštų profilių formavimui, nes sukomponavus koherentinius pluoštus rezultatinio pluošto skirstinys turėtų daug netolygumų dėl interferencijos.

Kiti lazerinių pluoštų formuotuvai gali būti sugrupuoti į tokias kelias grupes taip:

- 1) difrakciniai elementai, apertūros;
- 2) erdviškai netolygios sugerties elementai;
- 3) erdviškai netolygios refrakcijos elementai;
- 4) erdviškai netolygaus poliarizacijos valdymo elementai;
- 5) kiti, pvz., deformuojamų veidrodžių matricos; mikrolęšių matricos; elementai su laipsniškai kintančiu dangų atspindžio koeficientu; elementai su pažeistu visiškuoju vidaus atspindžiu ir t.t.

Kai kurie formuotuvai gali būti priskirti ne vienai iš minėtų grupių.

JAV patente nr. **US5638220** aprašytas lazerinio pluošto formuotuvai, kuriuo elipsės ar stačiakampio formos profilio lazerinis pluoštas yra paverčiamas į pluoštą, turintį apskritiminę simetriją, būtent žiedinį pluoštą. Formuotuvo optinės sistemos esmę sudaro šalia kolimuojančio lęšio patalpinta diafragma bei reikiamų diametrų bei atstumų tarp elementų parinkimas. Dėl difrakcijos ant kietos diafragmos kraštų taikinyje susiformuoja žiedo pavidalo apšviesta dėmė. Taikymams, kuriuose yra panaudojamas projektorius su aprašytu lazerinio pluošto formuotuvu, nereikalinga aukšta pluošto kokybė ar didelis galios konversijos efektyvumas. Tuo tarpu kietų apertūrų panaudojimas lazerinėse sistemos, sąlygoja stiprius difrakcinius efektus, kuriuos sunku kompensuoti kitais elementais.

Apertūrų panaudojimas pluoštų su plokščia viršūne gavimui yra labai neefektyvus, nes dažniausiai yra išpjaujama tik centrinė pluošto dalis, o tada ieškoma metodų suformuoti „minkštą“ apertūros kraštą, kad kuo mažiau pasireikštų difrakcija ir šalutiniai efektai tokie kaip savifokusavimasis. Minkštomis apertūromis yra vadinami elementai su dantyta kiaurymės kraštu (aprašyta pvz. JAV patente nr. **US3977772** ir *J.M.Auerbach et al.*, „Serrated-aperture apodizers for high-energy laser systems“, Appl. Optics 33(15), 3179-3183 (1994)) arba optiniai langeliai su gradientiniu lūžio rodikliu (*N.I.Potapova et al.*, „Apodization of laser radiation by phase apertures“, Sov. J. Q. Electron 22(5), 419-422 (1992)). Deja, plokščios viršūnės pluošto formavimo efektyvumas neviršija 10%.

Pluoštų formuotuvais, apimančiais deformuojamų veidrodžių matricas (žiūr.

pvz. tarptautinę pat. paraišką nr. **WO2014014805** arba JAV patentus nr. **US8292441**, **US7019434**), galima suformuoti norimo pavidalo intensyvumo. Tačiau reikalauja sudėtingos ir gana brangios gamybos technologijos. Pasaulyje yra tik keletas komercinių tiekėjų. Dažniausiai yra naudojami nekoherentiniams pluoštams koreguoti – astronomijoje ir mikroskopijoje aberacijoms slopinti. Pagrindinis tokių formuotuvų trūkumas yra tas, kad jie funkcionuoja pridėjus valdymo įtampą, kuriai dingus arba susvyravus, pažeidžiama visa galingo lazerio optinė grandinė. Todėl galingų lazerių konstravime prioritetas pasirinkimas – pasyvūs (be valdymo) metodai.

JAV patente nr. **US4410237** aprašytas lazerinio pluošto formuotuvai, kurio esminis elementas yra pralaidi arba atspindinti difrakcinė gardelė, kurios paviršius turi du gylius, o reljefas sukuriamas taip, kad tolimajame lauke arba lęšio židinyje nulinė ir pirmosios difrakcinės eilės suformuotų kvazi-plokščią intensyvumo pasiskirstymą. Šiuo metodu bangos fronto kreivumas nėra išsaugomas, o pageidaujamas intensyvumo pasiskirstymas gaunamas tik panaudojus papildomą lęšį ir tik jo židinio plokštumoje. Be to, profilio centrinės dalies plokštumas ir šlaitų statumas yra susiję – siekiant statesnių šlaitų, neįmanoma išgauti vienodo intensyvumo centre, ir atvirkščiai – siekiant kuo homogeniškesnio intensyvumo centrinėje dalyje, reikalingi tokie gardelės parametrai, kurie lemia nelabai stačius profilio kraštus. Gardelės paviršiaus stačiakampio formos struktūros sąlygoja tai, kad egzistuoja aukštesnės difrakcinės eilės, t.y. kad dalis energijos patenka į šoninius nereikalingus intensyvumo maksimumus. Gardelės reljefas turi būti pagamintas pusės bangos ilgio tikslumu, kas reikalauja tikslių litografinių technologijų.

JAV patente nr. **US6975458** aprašyta difrakcinė gardelė su pjūklo pavidalo raštu, dėl kurio aukštesnės difrakcinės eilės nesusidaro. Nepaisant didesnio pačios gardelės efektyvumo, formuotuvui kartu su gardele yra reikalingas mažiausiai vienas papildomas lęšis. Papildomi elementai didina formuotuvo matmenis ir jautrumą išderinimui. Be to, pakeisto profilio pluošto kryptis nusutampa su pradinio pluošto kryptimi – tai taip pat didina sistemos sudėtingumą.

JAV patentuose nr. **US3990786**, **US4017164** yra aprašytas lazerinio pluošto formuotuvai, apimantis tam tikro storio optinį langelį, kurio centrinė dalis yra skaidri, o kraštuose yra ertmės, užpildytos sugeriančiu skysčiu. Skaidrios centrinės dalies diametras išilgai pluošto sklaidimo krypties yra nevienodas, o dėsnis, pagal kurį kinta šis diametras yra toks, kad pluošto kraštų difrakcija būtų minimali. Taigi šis pluošto

formuotuvus veikia kaip minkšta diafragma – pluošto kraštuose esantys spinduliai patiria nuostolius, tuo tarpu centriniai spinduliai išlieka nepaveikti, o perėjimas tarp srities be nuostolių ir srities su nuostoliais yra tolygus. Dėl gerai suderintų lūžio rodiklių skaidrioje centrinėje dalyje ir sugeriančiuose kraštuose pluošto bangos frontas nėra paveikiamas. Šis formuotuvus gali būti panaudotas lazerinėje sistemoje, kad apsaugotų nuo savifokusavimosi dėl difragavusių pluošto kraštinių spindulių, tačiau netinka taikymams, kai reikia pakeisti centrinę pluošto profilio dalį. Be to, reikalauja, kad būtų užtikrinamas sugertos šilumos nuvedimas.

JAV patente nr. **US3558208** yra aprašytas lazerinio pluošto formuotuvus, apimantis radiališkai kintančios sugerties filtrą, kuriuo susilpninama centrinė pluošto dalis, tuo tarpu kraštai yra nufiltruojami kolimuojančių elementų apertūromis. Filtro, kuris gali būti pagamintas tiek iš skystos, tiek iš kietos sugeriančios medžiagos, radiališkai kintanti sugertis yra pasiekama jo geometriniais parametrais. Kad būtų išsaugotas bangos fronto kreivumas, filtrą, kuris yra parabolės formos, turi gaubti skaidri suderinto lūžio rodiklio medžiaga. Patento apraše teoriškai numatyta realizacija su pastoviu filtro geometriniu matmeniu, t.y. storiu. Tuomet radiališkai kinta sugerties koeficientas. Naudojant kietą sugėriklio medžiagą, sunkiau užtikrinti šilumos nuvedimą ir optinį kontaktą tarp jį gaubiančio suderinto lūžio rodiklio optinio elemento. Naudojant skystą sugėriklį, šilumą galima nuvesti atliekant skysčio pompavimą, tačiau reikia užtikrinti tolygų sugeriančios medžiagos pasiskirstymą ir yra reikalingas papildomas langelis, suformuojantis kiuvetę. Toks pluošto formuotuvus labiau tinka sistemose, kur lazerinio pluošto galia yra nedidelė.

Apskritai, visi lazerinių pluoštų formuotuvai, paremti sugertimi, dirba tik iki sugėriklio pažeidimo slenksčio, o dėl šilumos išsiskyrimo gali keisti bangos fronto kreivumą dar ir nepasiekus pažeidimo.

JAV patente nr. **US3476463** aprašytas lazerinio pluoštų formuotuvus, kuris yra paremtas erdviškai netolygia refrakcija. Formuotuvus yra sudarytas iš mažiausiai dviejų skaidrios medžiagos lęšių, kurių bent vienas paviršius yra asferinis ir kurių poveikis pluoštui pasireiškia pluošto spindulių perskirstymu skersai pluošto diametro. Jis gali būti panaudotas ašinės simetrijos pluošto profiliui, pvz. gausiniam, pakeisti į pageidaujamos formos, pvz. su plokščia viršūne, profilį. Tenkinant tam tikras sąlygas, yra išsaugomas bangos fronto kreivumas. Kadangi nėra sugerties, tokia optinė sistema pasižymi aukštu pažeidimo slenksčiu ir tinka didelės galios lazerinėms

sistemoms, tačiau reikalauja tikslios gamybos technologijos ir elementų išstatymo. Sistema, sudaryta iš mažiausiai dviejų asferinių erdvėje nutolusių elementų yra jautri elementų išderinimui ir/arba pluošto krypties nestabilumui.

Dar viena refrakcinio formuotuvo modifikacija, aprašyta JAV patente nr. **US6943964**, apima tik vieną optinį elementą, kurio abu paviršiai yra asferiniai. Juo taip pat galima pasiekti, kad perskirstant pluošto spindulius, bangos frontas nebūtų paveiktas. Sumažinus paviršių skaičių, pasiekiamas didesnis energinis efektyvumas, tačiau dėl didelių išilginių matmenų, jautrumas pluošto krypties nestabilumui išlieka.

Alternatyva minėtiems asferiniams lęšiams, kurių erdviškai netolygi refrakcija yra išgaunama vien tik geometrine forma, o medžiagos lūžio rodiklis yra vienodas visame lęšio tūryje yra radiališkai kintančio lūžio rodiklio lęšiai (žiūr. JAV patentą nr. **US3486808**). Vėlgi, tai yra technologija, reikalaujanti specialių gamybos sąlygų.

Dar viena alternatyva – skystųjų kristalų matricų, dar vadinamų erdviniais šviesos modulatoriais, panaudojimas (žiūr. pvz. straipsnį *Haotong Ma et al.*, „Generation of flat-top beam with phase-only liquid crystal spatial light modulators“, *J. of Optics* 12, 045704 (2010)). Jais galima išgauti praktiškai bet kokio pavidalo lazerinių pluoštų profilius (ribojantis faktorius – tik matricinio elemento, pikselio, dydis). Deja, dėl organinės skystųjų kristalų prigimties, t.y. žemo pažeidimo slenksčio, labiau tinka optiniams (nekoherentiniams) arba nedidelės galios lazeriniams (koherentiniams) pluoštams formuoti. Nutrūkus arba susvyravus valdančiajam signalui, taip pat gali drastiškai sugadinti sistemą.

Artimiausi pagal techninę esmę yra sprendimai, apimantys erdviškai netolygaus poliarizacijos valdymo elementus. Pastarieji gali būti naudojami tiesiog kaip poliarizacijos konverteriai, o kartu su poliarizaciją analizuojančiu optiniu elementu – kaip intensyvumo valdymo elementai. Poliarizaciją valdantys elementai yra aprašyti JAV patentuose nr. **US8077289**, **US6191880**, **US8320043**, JAV paraiškoje nr. **US2007115551**, taip pat tarptautinėse paraiškose nr. **WO2011021444**, **WO2012150566**. Pluoštų formuotuvai, kurių pagrindą sudaro erdviškai netolygaus poliarizacijos valdymo elementai, yra aprašyti JAV patentuose nr. **US4679911**, **US6259055** bei straipsniuose *G. Giuliani et al.*, „Radial birefringent element and its application to laser resonator design“, *Optics Letters* 5 (11), 491-493 (1980), *J. Eggleston et al.*, „Radial intensity filters using radial birefringent elements“, *JOSA* 71 (10), 1264-1272 (1981).

Patente **US8077289** aprašytas poliarizacijos konverteris yra sukonstruotas iš daugybės atskirų optiniu aktyvumu pasižyminčių kristalų, dvejopai laužiančių kristalų ar dangų ir fazinių plokštelių. Dėl to pluošto spindulių, esančių skirtingose skersinėse padėtyse, poliarizacija yra paveikiama nevienodai. Pasiūlytasis sprendimas leidžia išspręsti tam tikras problemas, kylančias mikrolitografijoje, kai projektuojamo pluošto tiesinė poliarizacija susigadina ilgoje optinėje grandinėje. Tuo tarpu tokio poliarizacijos konverterio pritaikymas pluošto profilio apodizacijai nėra numatytas.

Patente **US6191880** yra aprašytas dar vienas diskretinis (t.y segmentuotas, struktūrizuotas) poliarizacijos konverteris, sudarytas iš daugybės π -fazinių plokštelių. Atskiros plokštelės turi skirtingas orientacijas: optinės ašys yra išdėstytos taip, kad į konverterį krentantis tiesinės poliarizacijos pluoštas, skirtingose skersinėse koordinatėse patirtų skirtingą poliarizacijos krypties posūkį. Poliarizacijų posūkio kampų raštas sudaromas taip, kad rezultate gautųsi radialinės poliarizacijos pluoštas. Šiame sprendime galimybė suformuoti pageidaujamą pluošto spindulių poliarizacijų raštą yra tiesiogiai susijęs su technologinėmis galimybėmis reikiama kampais išpjauti π -plokšteles ir jas sujungti į vieną elementą. Optinis elementas sudarytas už daugelio atskirų segmentų negali užtikrinti paviršiaus lygumo, kas lemia pluošto bangos fronto iškraipymus.

Patente **US8320043** aprašytas kitoks tiesinės poliarizacijos konverteris į radialinę arba azimutinę, kuris yra pagamintas iš vientiso optiškai aktyvios medžiagos gabalo, suformuojant vis didesnę jo storį priklausomai nuo azimutinio kampo. Tuomet tiesinės poliarizacijos pluošto spinduliai, esantys skirtingose azimutinio kampo padėtyse, patiria skirtingą poliarizacijos plokštumos posūkį. Tuo tarpu poliarizacijos poveikio priklausomybės nuo atstumo nuo elemento centro nėra. Paprasčiausia šio konverterio realizacija – optinis elementas, kurio vienas paviršius yra plokščias, o kitas paviršius primena sraigto viją. Elementas nėra labai sudėtingas pagaminti, tačiau pakeičia pluošto bangos frontą (analogiškai elemento paviršiaus reljefui). Bangos fronto pasikeitimams kompensuoti būtina reikalingas kitas kompensuojantis elementas, pagamintas iš skaidrios ir optiškai neaktyvios medžiagos, kurio paviršiaus reljefas būtų priešingas. Poliarizacijų sukimo raštas, turintis radialinę priklausomybę (priklausomybę nuo elemento centro), minėto patento sprendime nėra numatytas.

Patente **US4679911** aprašytas lazerinio pluošto formuotuvai, apimantis kiuvetę, kurios viduje yra patalpintas skaidrios medžiagos į abi puses išgaubtas

lęšiukas. Lęšiuko storis sutampa su kiuvetės vidiniu matmeniu, todėl pluošto spinduliai, kertantys centrinę elemento dalį, praeina tik skaidrius kiuvetės langus bei lęšiuką ir nepatiria poveikio intensyvumui. Priekinė ir galinė ertmės, susidarančios tarp kiuvetės langų ir lęšiuko paviršių, yra užpildomos priešingo chirališkumo cholesteriniais skystaisiais kristalais. Priekinėje ertmėje esantys skystieji kristalai krentančio pluošto tiesinę poliarizaciją paverčia apskritimine, o galinėje ertmėje esantys skystieji kristalai dėl priešingo chirališkumo minėtos apskritiminės poliarizacijos spinduliuotės nepraleidžia, ją atspindi. Taigi priekinėje ertmėje esantys skystieji kristalai veikia kaip poliarizacijos konverteris, o galinėje ertmėje esantys skystieji kristalai veikia kaip poliarizacijos analizatorius. Dėl lęšiuko išgaubtumo, tostant nuo elemento centro, ertmių, užpildytų skystaisiais kristalais, storis didėja. Todėl nutolę nuo centro pluošto spinduliai patiria vis didesnius nuostolius. Suderinus skystųjų kristalų ir lęšiuko medžiagos lūžio rodiklius, galima pasiekti minimalius pluošto bangos fronto iškraipymus, be to, formuotuvai dirba itin selektyviai – paveikia tik tam tikro bangos ilgio pluoštą, tuo tarpu visiškai nepaveikia tuo pačiu keliu sklindančio kito bangos ilgio pluošto. Tokiu formuotuvu galima sukurti tolyginį intensyvumo pralaidumo raštą, tačiau turi ribotas galimybes išgauti pageidaujamos formos pluošto profilį.

G. Giuliani et al. ir *J. Eggleston et al.* straipsniuose aprašytas lazerio rezonatoriuje naudojamas radiališkai kintančio storio anizotropinės medžiagos elementas, kuris kartu su rezonatoriaus poliarizatoriumi veikia kaip pluošto formuotuvai. Dėl skirtingo anizotropinės medžiagos elemento storio lazerinio pluošto spinduliai, nutolę nuo elemento centro, patiria kitokį fazės vėlinimą tarp dviejų statmenų poliarizacijos dedamųjų nei spinduliai, kertantys elemento centrą. Taigi minėtas anizotropinis elementas veikia kaip fazinė plokštelė, kurios poveikis pluošto poliarizacijai priklauso nuo atstumo nuo elemento centro. Kadangi tiesinis poliarizatorius praleidžia tik kažkurią vieną poliarizacijos dedamąją, o kitą atspindi, poliarizatoriaus atspindys arba pralaidumas taip pat priklauso nuo radialinės padėties. Jei spinduliuotė iš rezonatoriaus yra išvedama per poliarizatorių, galima sakyti, kad minėto dviejų elementų pluošto formuotuvo pralaidumo skirstinys T_{xy} sutampa su poliarizatoriaus atspindžio priklausomybe nuo koordinatės. Straipsniuose pasiūlytos kelios geometrinės radiališkai kintančio storio anizotropinės medžiagos elemento konfigūracijos: įgaubto arba išgaubto lęšio formos arba dviejų lęšių su

priešingu išgaubtumu. Aprašytuoju formuotuvo nesunku gauti pralaidumo skirstinį T_{XY} , turintį vienintelį maksimumą ties centru ir tolygiai iki nulio mažėjantį pralaidumą tolstant nuo centro. Tenkinant tam tikras sąlygas, galima gauti sudėtingesnį formuotuvo pralaidumo skirstinį T_{XY} , turintį lokalų minimumą ($\neq 0$) centre. Tokiu būdu gali būti suformuotas lazerinio pluošto skersinis profilis su plokščia viršūne ir stačiais kraštais. Uždavinys susiveda į geometrinės lęšio/lęšių formos parinkimą ir išpildymą, nes fazės vėlinimas tarp dviejų poliarizacijos dedamųjų kaip funkcija nuo koordinatės, o tuo pačiu ir rezultatinis pluošto intensyvumo profilis, yra valdomi anizotropinio elemento forma. Tai sukelia tam tikrų apribojimų formuotuvo panaudojimui bet kokio pageidaujamo profilio formavimui. Antra, priklausomai nuo anizotropinio elemento geometrinės formos yra iškraipomas pluošto bangos frontas. Tai turi būti įskaityta skaičiuojant rezonatoriaus parametrus ir/arba panaudoti kompensuojantys elementai.

Paraiškoje **WO2012150566** (*Beresna et al.*) aprašytas dar vienas poliarizacijos konverteris, kurio poveikis kertančio pluošto poliarizacijai priklauso nuo skersinės padėties konverterio apertūroje. Konverterį sudaro optiškai izotropinės skaidrios medžiagos, pavyzdžiui lydyto kvarco, elementas su įrašytomis anizotropinėmis sritimis. Sprendime yra pasinaudojama unikalia kai kurių stiklų savybe – juose galima optiškai indukuoti dvigubą lūžio rodiklį. Paveikus bandinį ultratrumpaisiais, geriau femtosekundiniais, poliarizuotos lazerinės spinduliuotės impulsais, įvyksta negrįžtamas medžiagos persitvarkymas: susiformuoja mažesnių nei bangos ilgis matmenų periodinė nanostruktūra. Dėl indukuoto struktūrinio periodiškumo lūžio rodiklis dviems statmenoms poliarizacijos dedamosioms tampa nevienodas. Taigi savitvarkės dvejopo lūžio rodiklio nanostruktūros, dar. vad. nanogardelėmis, veikia kaip fazinės plokštelės, įnešančios fazės vėlinimą tarp dviejų statmenų poliarizacijos dedamųjų.

Beresna et al. sprendimo esmę sudaro tai, kad visose skersinėse poliarizacijos konverterio padėtyse indukuojamas vienodas fazės vėlinimas tarp dviejų statmenų poliarizacijos dedamųjų, o erdviškai netolygus poliarizacijos valdymas yra pasiekiamas skirtingai orientuojant minėtas dvejopai šviesą laužiančias nanogardeles. Spirališkai skenuojant bandinį ir tuo pat metu valdant įrašančiojo pluošto tiesinės poliarizacijos kryptį, dvejopai laužiančios nanogardelės yra įrašomos su tam tikromis iš anksto numatytomis orientacijomis. Tiesioginio lazerinio įrašymo metu indukuojamų nanogardelių principinių ašių kryptis yra valdoma įrašančiojo

lazerinio pluošto poliarizacijos vektorių orientacija. O nanogardelėmis užpildytas tūris ir fazės vėlinimas, kuris susidarys pluoštui kertant šį tūrį, priklauso nuo įrašančiojo pluošto energijos, fokusavimo sąlygų ir medžiagos savybių. *Beresna et al.* paraiškoje pasiūlytos dvi poliarizacijos konverterio realizacijos – su įrašytais ketvirčio bangos ilgio ir pusės bangos ilgio fazinėmis plokštelėmis matomos spektro dalies bangos ilgiui. Tuomet, priklausomai nuo valdomo pluošto pradinės poliarizacijos, rezultate yra gaunamas radialinės arba azimutinės poliarizacijos nepakeisto bangos fronto pluoštas. Pagal dar vieną konfigūraciją galima gauti ir optinį sūkurį. Dėsnis, pagal kurį minėtame konverteryje yra orientuojamos dvejopai šviesą laužiančios nanogardelės, yra nustatytas būtent šioms cilindrinę simetriją turinčioms pluošto poliarizacijos būsenoms gauti. Radialinės ir azimutinės poliarizacijos plokščio fronto pluoštas pasižymi žiediniu intensyvumo pasiskirstymu. Papildomai analizei į optinę grandinę įtraukus tiesinį poliarizatorių (analizatorių), gaunami pluošto profiliai, turintys du maksimumus. Kitokių pluošto profilių formavimas minėtoje paraiškoje nėra numatytas. Taip pat nėra numatyta konverterio konfigūracija nematomos, pvz. artimosios infraraudonosios, spektro sritys bangos ilgiams.

Savitvarkių dvejopai šviesą laužiančių nanogardelių atsiradimas pirmąkart pademonstruotas lydytame kvarce daugiau nei prieš dešimtmetį (*L.Sudrie et al.*, „Writing of permanent birefringent microlayers in bulk fused silica with femtosecond laser pulses“, *Opt. Communications* 171, 279-284 (1999)), yra gana intensyviai nagrinėjamas ir randa vis naujų ir naujų pritaikymų.

Yra pademonstruota, kad ne tik lydytame kvarce, bet ir kituose stikluose, pasireiškia šis fenomenas. Tarp galimų medžiagų yra kiti į lydytą kvarcą panašūs stiklai, pavyzdžiui GeO_2 , TeO_2 , taip pat Ge, F, P ir TiO_2 medžiagomis legiruotas lydytas kvarcas. Ultratrumpaisiais impulsais indukuoti anizotropiją, tačiau žymiai silpnesnę, galima ir kai kuriuose borosilikatiniuose stikluose. Plačiau yra aprašyta straipsniuose *M.Lancry et al.*, „Ultrafast nanoporous silica formation driven by femtosecond laser irradiation“, *Laser & Photonics Reviews* 7 (6), 953–962 (2013); *M.Lancry et al.*, „Dependence of the femtosecond laser refractive index change thresholds on the chemical composition of doped-silica glasses“, *Opt. Mat. Express* 1 (4), 711-723 (2011); *S.Richter et al.*, „Laser induced nanogratings beyond fused silica - periodic nanostructures in borosilicate glasses and ULE™“, *Opt. Mat. Express* 3 (8),

1161-1166 (2013). Yra daug parametrų (įrašančiosios lazerinės spinduliuotės impulsų trukmė, bangos ilgis, energija/šviesos srautas, gretimose zonose įrašytų nanogardelių orientacijos ir pan.), nuo kurių priklauso savitvarkių dvejopai šviesą laužiančių nanogardelių charakteristikos. Optimalūs parametrai tiesioginiam lazeriniam įrašymui yra surandami kiekvienam konkrečiam atvejui atskirai. Tokiu metodu pagaminti optiniai elementai turi daug privalumų, tokių kaip kompaktiškumas, stabilumas laike bei įvairiose šiluminėse sąlygose ir aukštas pažeidimo slenkstis. Nors yra daugybė publikacijų šia tema, tačiau nėra pasiūlytas lazerinio pluošto skersinio profilio formotuvas pluoštų su bet koku pageidaujamo pavidalo profiliu ar su plokščia viršūne gavimui.

Šio išradimo prototipas – *G. Giuliani et al.* ir *J. Eggleston et al.* straipsniuose aprašytas lazerio pluošto formotuvas, sudarytas iš radiališkai kintančio storio anizotropinės medžiagos poliarizacijos konverterio ir tiesinio poliarizatoriaus. Ypač tokia jo realizacija, kurios pralaidumo skirstinys T_{xy} turi lokalų minimumą ($\neq 0$) ties centru. Dviejų lęšių konfigūracija leidžia laisvai parinkti centrinio minimumo lygį ir tuo pačiu išlaikyti nulinį pralaidumą nustatytame atstume nuo centro. Tačiau, kaip jau minėta, kreivi paviršiai iškraipo bangos frontą, be to, elemento veikimas labai priklauso nuo pagaminimo kokybės (storį reikia išlaikyti mikronų tikslumu) bei lazerinio pluošto krypties stabilumo. Taip pat yra ribotos galimybės sukurti bet kokią pasirinktą pralaidumo skirstinį T_{xy} .

Išradimu siekiama sukurti lazerinio pluošto skersinio profilio formotuvą, tinkantį didelės galios ir didelio pasikartojimo dažnio lazerinėms sistemoms. Išradimu taip pat siekiama sukurti lazerinio pluošto skersinio profilio formotuvą pageidaujamos formos intensyvumo profiliui sukurti, kuris išsaugotų bangos fronto kreivumą. Galiausiai, išradimu siekiama sukurti didelio efektyvumo apodizatorių gausiniam pluoštui paversti į pluoštą, aprašomą bet kokio laipsnio super-Gauso funkcija.

IŠRADIMO ESMĖ

Sprendimo esmę sudaro erdviškai netolygaus poliarizacijos valdymo elemento, pagaminto tiesioginio lazerinio įrašymo metodu, panaudojimas pageidaujamo pavidalo lazerinio pluošto profiliui sukurti. Taip pat išradimo esmę sudaro savitvarkių dvejopai šviesą laužiančių nanogardelių orientacijų rašto nustatymas reikiamam pluošto formotuvo pralaidumo skirstiniui T_{xy} gauti.

Pagal pasiūlytą išradimą lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvą, išsaugantis bangos fronto kreivumą, apima poliarizaciją transformuojantį optinį elementą, kuriame poveikis į jį krentančio pluošto poliarizacijai priklauso nuo pluošto spindulio skersinės padėties minėto optinio elemento apertūroje, o perėjimas tarp padėčių, kurias kertantys pluošto spinduliai patiria skirtingą poveikį poliarizacijai, yra tolygus. Toliau pluošto formuotuvą taip pat apima poliarizaciją analizuojantį optinį elementą, kurio pralaidumas ir/arba atspindys priklauso nuo lazerinės spinduliuotės poliarizacijos krypties. Minėti poliarizaciją transformuojantis optinis elementas ir poliarizaciją analizuojantis optinis elementas, kurie yra nuosekliai išdėstyti tiesiškai poliarizuoto lazerinio pluošto, apibūdinamo pradiniu bangos frontu, kelyje, bendrai veikdami įneša lokalius pluošto galios nuostolius bei sukuria tam tikrą pralaidumo raštą, aprašomą skirstiniu T_{xy} , ir tuo būdu suformuoja išėjimo pluoštą, kurio intensyvumo pasiskirstymas I_{xy1} plokštumoje, statmenoje pluošto sklidimo kryptčiai, nesutampa su įėjimo pluošto intensyvumo pasiskirstymu I_{xy0} . Minėtas poliarizaciją transformuojantis optinis elementas turi fazinės plokštelės savybių ir yra pagamintas iš skaidrios optiškai izotropinės medžiagos, jos tūryje suformuojant bent vieną anizotropinį sluoksnį su įrašytomis dvejopai šviesą laužiančiomis nanogardelėmis, atsirandančiomis dėl savaiminio medžiagos struktūros persitvarkymo paveikus femtosekundiniais tiesiškai poliarizuotos lazerinės spinduliuotės impulsais, kur fazės vėlinimas tarp dviejų statmenų poliarizacijos dedamųjų visose skersinėse padėtyse yra vienodas, o skirtingas poveikis pluošto spindulių poliarizacijai yra pasiekiamas parinkus reikiamus kampus tarp minėtų įrašomų dvejopai šviesą laužiančių nanogardelių lėtųjų ašių kryptčių ir pradinio pluošto tiesinės poliarizacijos krypties P_0 . Pro formuotuvą praėjusio pluošto bangos frontas sutampa su pradiniu bangos frontu pusės bangos ilgio tikslumu.

Pranašumą turinčiame šio išradimo konstrukciniame išpildyme pasiūlytas lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvą, kuriame minėtų anizotropinių sluoksnių suminis storis užtikrina π radianų dydžio fazės vėlinimą tarp dviejų statmenų poliarizacijos dedamųjų.

Dar kitame pranašumą turinčiame šio išradimo konstrukciniame išpildyme pasiūlytas lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvą, kuriame minėtų anizotropinių sluoksnių suminis storis užtikrina $\pi/2$ radianų dydžio fazės vėlinimą tarp dviejų statmenų poliarizacijos dedamųjų, o į formuotuvo sudėtį įeina $\lambda/4$ bangų

plokštelė, patalpinta prieš poliarizaciją transformuojantį optinį elementą.

Dar viename pranašumą turinčiame šio išradimo konstrukciniame išpildyme skaidri ir optiškai izotropinė medžiaga, iš kurios yra pagamintas poliarizaciją transformuojantis optinis elementas, ir kuriame yra įrašomos dvejopai šviesą laužiančios nanogardelės, yra lydytas kvarcas arba $\text{TiO}_2\cdot\text{SiO}_2$ stiklas. Taip pat gali būti panaudotas kitomis priemonėmis legiruotas SiO_2 stiklas.

Minėtas poliarizaciją analizuojantis optinis elementas gali būti tiesinis poliarizatorius, o išėjimo pluoštas yra gaunamas iš poliarizatoriaus praleistos arba atspindėtos spinduliuotės.

Skirstinys T_{xy} , aprašantis pluošto formuotuvo pralaidumo raštą, yra tinkamas transformuoti gausinio profilio pluoštą į plokščios viršūnės pluoštą arba bet kokio kito pageidaujamo profilio pluoštą.

Yra pasiūlytas šio išradimo lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvo panaudojimas lazerinėje sistemoje: tarp osciliatoriaus ir stiprintuvo arba tarp kelių stiprinimo pakopų, papildomai, jeigu reikia, panaudojant erdvinio filtravimo sistemą ir/arba pusės bangos ilgio fazinės plokštelės.

Šio išradimo formuotuvai yra kompaktiškas ir pasižymi dideliu atsparumu aukštai spinduliuotės galiai, be to yra pigūs ir leidžia formuoti norimo pavidalo pralaidumo raštą – bet kokią simetrinę ar asimetrinę dvimatę funkciją. Skirtingai nei prototipe šio išradimo formuotuve visose skersinėse padėtyse geometrinio ir optinio kelio ilgis yra vienodas. Dėl to yra išsaugomas transformuojamo pluošto bangos frontas. Kompaktiška konstrukcija lemia tai, kad formuotuvo veikimas nėra labai jautrus pluošto krypties nestabilumui ar skėsties variacijoms.

Kadangi intensyvumo sumažinimas tam tikrose skersinėse padėtyse pasireiškia per atspindžio nuostolius poliarizaciją analizuojančiame elemente, sugerties praktiškai nėra, šio išradimo formuotuvai gali būti panaudotas didelės galios lazerinėse sistemose.

Dar vienas šio išradimo pluoštų formuotuvo privalumas – didelis efektyvumas. Transformuojant gausinį pluoštą į plokščios viršūnės pluoštą suminiai galios nuotoliai, įskaitant barstymus ant indukuotų struktūros nehomogeniškumų, neviršija 50%. Aukštas efektyvumas leidžia pasiekti didesnę lazerinės sistemos išėjimo galią. Antra vertus, tai pačiai sistemos galiai pasiekti reikia mažesnės galios

pirminių šaltinių, kas sumažina visos sistemos kainą ir leidžia naudoti žemesnių pažeidimo slenksčių optinius elementus.

Toliau išradimas detaliau paaiškinamas brėžiniais.

TRUMPAS BRĖŽINIŲ FIGŪRŲ APRAŠYMAS

Fig.1 – šio išradimo lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvo principinė schema.

Fig.2 – detalesnė šio išradimo formuotuvo veikimo iliustracija.

Fig.3 – iliustracija, atspindinti šio išradimo formuotuvo panaudojimą gausiniam pluoštui transformuoti į plokščios viršūnės pluoštą.

Fig.4A – teorinio pralaidumo skirstinio T_{xy} , reikalingo Gauso pavidalo pluošto profiliui transformuoti į 6-ojo laipsnio super-Gauso profilį, pjūvis išilgai vienos koordinatės.

Fig.4B – viena iš galimų nanogardelių orientacijų išsidėstymo realizacijų pralaidumo skirstiniui pagal Fig.4A gauti.

Fig.5 ir Fig.6 – eksperimentiniai rezultatai.

Fig.7A ir Fig.7B – pralaidumo skirstinys, reikalingas gausiniam pluošto profiliui transformuoti į 4-ojo laipsnio super-Gauso funkcija aprašomą profilį bei atitinkama nanogardelių orientacijų išsidėstymo funkcija.

Fig.8A ir Fig.8B – pralaidumo skirstinys, reikalingas gausiniam pluošto profiliui transformuoti į 8-ojo laipsnio super-Gauso funkcija aprašomą profilį bei atitinkama nanogardelių orientacijų išsidėstymo funkcija.

Fig.9 – dar viena šio išradimo lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvo realizacija.

Fig.10 – poliarizaciją transformuojančio optinio elemento, sudarančio šio išradimo formuotuvo pagrindą, skersinis pjūvis.

Fig.11 – poliarizaciją transformuojančio optinio elemento nuotrauka.

Fig.12-Fig.15 – šio išradimo formuotuvo panaudojimo optinėje grandinėje variantai.

Fig.16 – lazerinio pluošto intensyvumo pasiskirstymas, neturintis

apskritiminės simetrijos.

Fig.17 – pluošto profilio su įduba transformacija, pluoštui keliaujant per šoninio kaupinimo stiprintuvą.

Fig.18 – pluošto profilio su įduba formavimas šio išradimo formuotuvu.

TINKAMIAUSI ĮGYVENDINIMO VARIANTAI

Fig.1 yra pavaizduota šio išradimo lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvo principinė schema. Formuotuvą 1 yra sudarytas iš šių esminių komponentų: optinio elemento 2, paveikiančio į formuotuvą krentančio lazerinio pluošto 3 poliarizaciją, bei optinio elemento 4, praleidžiančio arba atspindinčio tik tam tikros poliarizacijos spinduliuotę. Optinis elementas 2 veikia kaip struktūrizuota fazinė plokštelė, t.y. yra tarsi sudarytas iš daugybės fazinių plokštelių, kurių poveikis pluošto 3 poliarizacijai yra skirtingas. Optinio elemento 4, veikiančio kaip poliarizacijos analizatorius, pralaidumas (arba atspindys) pluošto spinduliams, kertantiems įvairias elemento 2 skersines padėtis, yra nevienodas. Taigi elementas 2 sukuria tam tikrą poliarizacijų raštą P_{XY} , o kartu su elementu 4 – pralaidumo raštą T_{XY} . Tiesiškai poliarizuotas lazerinis pluoštas, kirsdamas formuotuvą 1, patirs lokalius pluošto galios nuostolius, dėl kurių pasikeis skersinis pluošto profilis.

Minėtas optinis elementas 2 yra pagamintas iš skaidrios ir optiškai izotropinės medžiagos, jos tūryje suformuojant sritis, pasižyminčias lūžio rodiklio anizotropija. Šios sritys yra iš anksto suformuotos aukščiau minėtu tiesioginio lazerinio įrašymo metodu, parinkus reikiamą impulsų energiją bei poliarizacijos kryptį. Optiškai izotropinė medžiaga, iš kurios yra pagamintas elementas 2, gali būti lydytas kvarcas (SiO_2), bet tinka ir kiti stiklai, kuriuose ultratrumpaisiais lazeriniais impulsais galima indukuoti lūžio rodiklio anizotropiją. Tarp galimų medžiagų yra TiO_2 ar kitomis priemonėmis legiruotas lydytas kvarcas, taip pat GeO_2 stiklas.

Įrašytos sritys su dvejopai šviesą laužiančiomis nanogardelėmis veikia kaip atskiros fazinės plokštelės, įnešančios fazės postūmį tarp poliarizacijos dedamųjų, orientuotų išilgai nanogardelės lėtosios ir greitosios ašių. Skirtingai nei prototipe šio išradimo formuotuvą 1 lazerinio pluošto nefokusuoja ir nedefokusuoja, t.y. pluošto bangos fronto kreivumas yra išsaugomas. Taip yra dėl to, kad optinio elemento 2 gamybos procese yra suformuojamas tolygus perėjimas tarp gretimų anizotropinių sričių, nepaliekant įrašinio pluošto nepaveiktų segmentų, o vidutinis lūžio rodiklis

visose minėtose srityse yra vienodas. Banginio fronto iskraipymai dėl indukuotų nanogardelių yra pusės bangos ilgio eilės. Tai praktiškai nepakeičia laužiamosios gebos, nes yra artimi bangos fronto pokyčiams, atsirandantiems dėl difrakcijos.

Taigi optinis elementas 2 yra poliarizaciją transformuojantis elementas, kurio poliarizacijos valdymo poveikslas yra iš anksto numatytas, priklausomai nuo to, kokį formuotuvo pralaidumo skirstinį T_{XY} yra siekiama gauti. Į šio išradimo formuotuvą 1 krentantis tiesinės poliarizacijos (vektorius P_0) įėjimo pluoštas 3, turintis tam tikrą skersinį intensyvumo pasiskirstymą I_{XY0} ir apibūdinamas bangos frontu 6, praėjęs formuotuvą 1, tampa pakitusio intensyvumo pasiskirstymo I_{XY1} išėjimo pluoštu 5, kurio bangos frontas 7 sutampa su pradiniu bangos frontu 6, o poliarizacijos kryptis P_1 priklauso nuo poliarizaciją analizuojančio optinio elemento 4 optinės ašies orientacijos.

Kaip išėjimas gali būti panaudota tiek praėjusi, tiek ir atspindėta nuo optinio elemento 4 spinduliuotė. Kadangi sugertis nevyksta, šio išradimo lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvai gali būti panaudotas didelės galios lazerinėse sistemose. Galios konversijos efektyvumas priklauso nuo pradinio ir galinio intensyvumo profilių I_{XY0} ir I_{XY1} . Papildomi nuostoliai, susiję su Relėjaus sklaida ant indukuotų nehomogeniškumų, kurie yra maždaug vienodi per visą pluošto skerspūvį, šio išradimo lazerinio pluošto formuotuve 1 neviršija 15%. Bendri galios nuostoliai, formuojant plokščios viršūnės pluoštą iš gausinio – neviršija 50%, o tai yra labai geras šio išradimo pluošto formuotuvo efektyvumo rodiklis, lyginant jį su žinomais sprendimais, tinkamais naudoti didelės galios lazerinėse sistemose.

Detaliau optinio elemento 2 sandara ir jo bei viso formuotuvo 1 veikimas yra paaiškinti Fig.2 paveiksle. Priklausomai nuo pluošto 3, kurio skersinį profilį norime paveikti, bangos ilgio, optinio elemento 2 tūryje yra suformuojami vienas arba du sluoksniai 8 anizotropinių sričių 9 su įrašytomis savitvarkėmis dvejopai šviesą laužiančiomis nanogardelėmis. Įrašymo metu femtosekundinės lazerinės spinduliuotės parametrai yra parenkami taip, kad visose sluoksnio 8 skersinėse padėtyse susidarytų vienodas fazės vėlinimas dviem statmenoms poliarizacijos dedamosioms, o nanogardelių orientacijos skirtųsi. Bendras plotas, kuriame yra įrašytos dvejopai laužiančios nanogardelės turi būti nemažesnis nei transformuojamo pluošto skersmuo.

Prioritetinėje šio išradimo realizacijoje optinis elementas 4 yra tiesinis poliarizatorius, o elemente 2 yra suformuojamas toks suminis anizotropinių sluoksnių 8 storis, kad tarp dviejų statmenų poliarizacijos dedamųjų susidarytų π radianų dydžio fazės vėlinimas. Tuomet optinis elementas 2 yra tarsi sudarytas iš daugybės įvairiais kampais orientuotų π -fazinių plokštelių (pusės bangos ilgio bangų plokštelių), kurios tiesinės poliarizacijos būsenos nepakeičia, poliarizacija išlieka tiesine. Tačiau, jei fazinės plokštelės optinė ašis sudaro kampą α su pradiniu tiesinės poliarizacijos vektoriumi, išėjime spinduliuotės poliarizacijos vektorius yra pasuktas (-2α) kampu pradinio poliarizacijos vektoriaus atžvilgiu. Tuo remiantis galima suformuoti dvejopai laužiančių nanogardelių orientacijų raštą 11, kurio vienos skersinėse padėtyse nanogardelių lėtosios ašys 10 sudarys didesnę, kitose – mažesnę kampą su pradinės spinduliuotės poliarizacijos vektoriumi P_0 , o pasekoje bus gauti reikiami poliarizacijų išsidėstymo ir formuotuvo pralaidumo skirstiniai P_{XY} , T_{XY} , atitinkamai. P_{XY} ir T_{XY} yra nesunkiai nustatomi iš pradinio ir pageidaujamo pluošto erdvių profilių I_{XY0} , I_{XY1} .

Tolyginis pralaidumo skirstinys T_{XY} , reikalingas bet kokio pradinio intensyvumo pasiskirstymo I_{XY0} pluoštui 3 transformuoti į pakitusio intensyvumo pasiskirstymo I_{XY1} pluoštą 5 nesunkiai gali būti surastas iš sąryšio:

$T_{XY} \sim I_{XY1}/I_{XY0}$, kur proporcingumo konstanta surandama normuojant maksimalų pralaidumą į vienetą.

Tuomet pradinis pluoštas 3, kurio poliarizacija visose skersinėse padėtyse yra tiesinė, ir poliarizacijos vektorių orientacijos sutampa (pasiskirstymas 12), praėjęs optinį elementą 2, tampa pluoštu 13 su sudėtingu poliarizacijų pasiskirstymo raštu P_{XY} (pasiskirstymas 14).

Tiesinis poliarizatorius 4 praleidžia tik tas poliarizacijos dedamąsias, kurios yra orientuotos išilgai jo optinės ašies 15. Iš rezultatinio poliarizacijų išsidėstymo 16 matyti, kad pralaidumas (pilku-baltų koncentrinų apskritimų raštas 17 – supaprastintas dvimačio T_{XY} skirstinio atvaizdas, 18 – tolyginė, daug skirtingų pralaidumo lygių turinti pralaidumo funkcija išilgai vienos koordinatės) bus didžiausias tose skersinėse padėtyse (19), kur poliarizacijos vektoriai yra lygiagretūs poliarizatoriaus 4 optinei ašiai 15.

Nanogardelių bei poliarizacijų orientacijų raštai 11, 12, 14, 16 Fig.2 paveiksle yra pateikti iliustraciniais tikslais. Realybėje jie yra tolyginės dvimatės funkcijos,

nebūtinai turinčios radialinę simetriją, ir priklauso nuo pageidaujamo T_{xy} bei pasirinktos poliarizaciją analizuojančio elemento 4 pralaidumo/atspindžio krypties (optinės ašies 15 orientacijos).

Pagal vieną iš šio išradimo realizacijų tiesinio poliarizatoriaus 4 optinės ašies 15 kryptis sutapatinama su pradinio poliarizacijos vektoriaus kryptimi P_0 . Tuomet poliarizaciją transformuojančio optinio elemento 2 gamybos metu srityse, kuriose norima turėti didžiausią pluošto formuotuvo 1 pralaidumą, dvejopai laužiančių nanogardelių lėtosios ašys 10 irgi yra orientuojamos lygiagrečiai vektoriui P_0 . Formuotuvo išėjime pluošto 5 poliarizacijos vektorius P_1 taip pat bus lygiagretus P_0 .

Taip pat yra galimos ir kitos šio išradimo formuotuvo realizacijos: poliarizatoriaus 4 optinė ašis 15 yra statmena arba sudaro tarpinį kampą su pradinio poliarizacijos vektoriumi P_0 . Tuomet reikalingi ir kitokie dvejopai laužiančių nanogardelių orientacijų raštai. Antra vertus, turint jau pagamintą optinį elementą 2 su įrašytu nanogardelių orientacijų raštu, jį galima panaudoti keliems pralaidumo profiliams gauti. Sukant poliarizaciją analizuojantį poliarizatorių 4 apie pluošto sklaidimo kryptį, skersinės padėties, kuriose poliarizacijos vektoriai (pasiskirstyme 14) yra lygiagretūs poliarizatoriaus optinei ašiai 15, kinta. Tuo būdu yra gaunamas visai kitoks pralaidumo pasiskirstymas.

Fig.3 paveiksle iliustruojamas šio išradimo formuotuvo panaudojimas gausiniam pluoštui transformuoti į plokščios viršūnės pluoštą. Gauso pavidalo erdvinio profilio 20 lazerinis pluoštas 21 formuotuvu 1, kurio pralaidumo skirstinys T_{xy} ir jo pjūvis 18 išilgai vienos koordinatės centre C turi minimumą ($\neq 0$), toliau nuo centro [sritis B] – maksimumą ($T=1$), o dar toliau – pralaidumas sparčiai mažėja iki nulio [sritis A], galima suformuoti pluoštą 22, pasižymintį plokščios viršūnės profiliu 23. Plokščios viršūnės pluoštams aprašyti dažniausiai yra naudojamos super-Gauso funkcijos, kurios gali turėti stačiakampę arba apskritiminę simetriją. Apskritiminės simetrijos pluošto profilis n-ojo laipsnio super-Gauso funkcija gali būti aprašytas taip:

$$I(x, y) = I_0 \exp \left(- \frac{\sqrt{2(x^2 + y^2)}}{2\sigma} \right)^n, \quad \text{kur } n - \text{lyginis skaičius, super-Gauso funkcijos}$$

laipnis, σ – profilio plotį parodantis matmuo. Kai $n=2$, gaunama tradicinė Gauso funkcija, o σ – jos standartinė deviacija. Dėl aukščiau minėtų priežasčių, pro formuotuvą praėjusio pluošto 22 frontas 7 sutampa su pradinio pluošto 21 frontu 6. Dėl indukuotų nehomogeniškumų atsirandanti išsklaidytoji spinduliuotė bangos fronto

nesugadina, nes jos skėstis yra didelė ir ji yra vienoda per visą pluošto plotą. Šį foną galima nesunkiai nufiltruoti.

Teorinė tolygiai kintanti pralaidumo funkcija 18 – pjūvis pralaidumo skirstinio T_{XY} , reikalingo Gauso pavidalo pluošto profiliui 20 transformuoti į 6-ojo laipsnio super-Gauso funkcija aprašomą profilį 23 – tiksliau yra atvaizduota Fig.4A paveiksle. Ji yra surasta iš:

$T_{XY} = C \cdot I_{\text{SuperGauss}} / I_{\text{Gauss}}$, kur C – normavimo konstanta. Skersinė koordinatė yra normuota į pradinio Gauso pluošto 20 pusplotį pusės intensyvumo lygyje (*angl.* HWHM).

Teorinis maksimalus 6-ojo laipsnio super-gausinio pluošto intensyvumas siekia 68% gausinio pluošto maksimalaus intensyvumo vertės. Teorinis galios naudingumo koeficientas, lygus plotų po kreivėmis 20 ir 23 santykiui, siekia 72,5%. Kaip jau minėta, šio išradimo formuotuve 1 egzistuoja papildomi sklaidos nuostoliai dėl indukuotų nehomogeniškumų, kurie neviršija 15%.

Fig.4B pavaizduota viena iš galimų nanogardelių orientacijų išsidėstymo realizacijų, siekiant gauti pralaidumo funkciją 18, pavaizduotą Fig.4A. Jei poliarizatoriaus 4 optinė ašis 15 yra lygiagreti pradiniam lazerinio pluošto poliarizacijos vektoriui P_0 ir išėjimui yra naudojama poliarizatoriaus 4 praleista spinduliuotė (kaip Fig.2 pavaizduotoje formuotuvo konfigūracijoje), maksimalus pralaidumas ($T=1$) yra gaunamas, kai nanogardelių lėtosios ašys 10 sudaro kampą $\alpha=0^\circ$ su pradiniu poliarizacijos vektoriumi P_0 . Nulinis pralaidumas gaunamas, kai $\alpha=45^\circ$ (tose koordinatėse poliarizacija bus pasukta 90° kampu). Pluošto centrinėje dalyje, kur reikalingas tik dalinis slopinimas, kampų vertės yra intervale nuo 0 iki $23,6$ laipsnių.

Lygiai toks pats orientacijų raštas yra reikalingas, kuomet poliarizatoriaus 4 optinė ašis 15 yra statmena pradiniam lazerinio pluošto poliarizacijos vektoriui P_0 , o išėjimui yra naudojama poliarizatoriaus 4 atspindėta spinduliuotė.

Nesunku suprasti, kad yra galimos ir alternatyvios orientacijų raštų realizacijos tam pačiam pralaidumo skirstiniui T_{XY} gauti, jei: poliarizatoriaus optinė ašis 15 sudaro kampą su vektoriumi P_0 ; jei išėjimui naudojama poliarizatoriaus 4 praleista spinduliuotė, tačiau optinė ašis 15 yra statmena P_0 ir t.t.

Bendra formulė, nusakanti, kokia turi būti nanogardelės orientacija tam tikroje

skersinėje padėtyje, yra:

$$\alpha(x, y) = \frac{1}{2} [\beta - \arccos(T(x, y))], \quad \text{jei stebima poliarizatoriaus 4}$$

pralaidume;

$$\alpha(x, y) = 45 - \frac{1}{2} [\beta - \arccos(T(x, y))] \quad \text{jei stebima poliarizatoriaus 4}$$

atspindyje;

kur $\alpha(x, y)$ – kampas tarp nanogardelės lėtosios ašies 10 ir pradinės tiesinės poliarizacijos krypties P_0 , $T(x, y)$ – pageidaujamas pralaidumo lygis toje skersinėje padėtyje, β – kampas tarp poliarizatoriaus 4 optinės ašies 15 ir pradinės tiesinės poliarizacijos krypties P_0 . Formulė tinka formuojant nanogardelių orientacijų raštą bet kokiam pralaidumo skirstiniui T_{XY} gauti.

Fig.5 vaizduoja CCD kamera pamatuotą pradinį Gauso pavidalo pluošto intensyvumo pasiskirstymą skersinės koordinatės atžvilgiu pusiau-logaritmėje skalėje. Fig.6 vaizduoja CCD kamera pamatuotą apodizuotą pluoštą, praėjusį šio išradimo formuotuvą 1, kurio poliarizaciją transformuojančiame optiniame elemente 2 buvo suformuotas Fig.4B paveikslu nanogardelių orientacijų raštas. Eksperimentas atliktas su 1064nm bangos ilgio spinduliuote, o π radianų dydžio fazės vėlinimui pasiekti elemente 2 buvo suformuoti 2 anizotropiniai sluoksniai 8. Aproximuojant matavimo rezultatus 6-ojo laipsnio super-Gauso funkcija, centrinėje dalyje aproksimacijos kreivė idealiai sutampa su eksperimentine kreive. Periferijoje matoma foninė spinduliuotė yra susijusi su nenuslopintais gausinio pluošto „sparnais“ dėl schemos suderinimo netikslumo. Foninė spinduliuotė yra labai silpna (~1% pagal intensyvumo lygį), be to ji gali būti lengvai užblokuota papildomomis apertūromis.

Fig.7A-Fig.8B – alternatyvūs sprendimai suformuoti plokščios viršūnės pluoštą. Fig.7A pavaizduota pralaidumo funkcija 18a, reikalinga gausiniam profiliui 20 transformuoti į 4-ojo laipsnio super-Gauso profilį 23a. Fig.8A pavaizduota pralaidumo funkcija 18b, reikalinga gausiniam profiliui 20 transformuoti į 8-ojo laipsnio super-Gauso profilį 23b. Fig.7A ir Fig.8B pavaizduotos atitinkamos nanogardelių orientacijų išsidėstymo realizacijos, jei poliarizatoriaus optinė ašis 15 yra lygiagreti pradiniam lazerinio pluošto poliarizacijos vektoriui P_0 ir išėjimui yra naudojama poliarizatoriaus 4 praleista spinduliuotė. Profilis, aprašomas aukštesnio laipsnio super-Gauso funkcija turi platesnę plokščią centrinę dalį ir jo kraštai yra statesni, tačiau maksimalus intensyvumas ir galios naudingumo koeficientas yra mažesni.

Teorinis galios naudingumo koeficientas, neįskaitant Relėjaus sklaidos nuostolių, transformuojant gausinį pluoštą į 8-ojo laipsnio super-gausinį pluoštą siekia 67,5%. Tuo tarpu transformuojant į 4-ojo laipsnio super-gausinį pluoštą – net 81,1%. Taigi anksčiau pasirinkta 6-ojo laipsnio super-Gauso funkcija yra kompromisas tarp plokščios pluošto profilio viršūnės bei stačių kraštų ir tarp galios naudingumo koeficiento.

Dar viena privalumų turinti šio išradimo realizacija yra pavaizduota Fig.9 paveiksle. Pagal ją į pluošto skersinio profilio formuotuvo 1 sudėtį įeina $\lambda/4$ bangų plokštelė, o poliarizaciją transformuojančiame optiniame elemente 2 yra suformuojamas toks anizotropinių sluoksnių 8 skaičius ir storis, kad tarp dviejų statmenų poliarizacijos dedamųjų susidarytų $\pi/2$ radianų dydžio fazės vėlinimas. Minėta papildoma $\lambda/4$ bangų plokštelė 24 yra patalpinama įėjimo pluošto 3 kelyje prieš poliarizaciją transformuojantį optinį elementą 2, jos optinė ašis 25 yra orientuojama 45 laipsnių kampu pradinio poliarizacijos vektoriaus P_0 atžvilgiu. Tuomet pluošto poliarizacijų raštas 12, kuriame visose koordinatėse yra tiesinė poliarizacija ir vektorių kryptys sutampa, yra transformuojamas į poliarizacijų raštą 26, kuriame poliarizacija yra apskritiminė. Kadangi optiniame elemente 2 visose skersinėse padėtyse yra įrašytas $\pi/2$ radianų dydžio fazės vėlinimas, galima įsivaizduoti, kad jis yra sudarytas iš daugybės $\lambda/4$ bangų plokštelių, kurių optinių ašių orientacija priklauso nuo skersinės padėties elemento 2 apertūroje. Rezultate kiekviena iš anizotropinių sričių 9 su bangų plokšte 24 bendrai įneša π radianų dydžio fazės vėlinimą, ir pluošto 13, praėjusio elementą 2, poliarizacijų raštas 14 yra toks pats kaip ir prieš tai aprašytoje formuotuvo konfigūracijoje. Taigi, turint mažesnį anizotropinių sluoksnių 8 skaičių ar storį, yra pasiekiamas toks pats rezultatas.

Ši formuotuvo realizacija turi privalumų, lyginant ją su Fig.2 paveiksle iliustruota realizacija. Tiesioginio lazerinio įrašymo metodu π radianų dydžio fazės vėlinimą yra sunku pasiekti net ir lydytame kvarce, kuriame savitvarkių dvejopai laužiančių nanogardelių indukcijos reiškinys pasireiškia stipriausiai. Matomos spektro dalies bangos ilgiams viename sluoksnyje galima įrašyti ir $\pi/2$, π radianų dydžio fazės vėlinimą, tačiau didesnio „retardiškumo“ įrašymas pareikalauja didesnės įrašančiojo fs lazerinio impulso energijos bei specialių pluošto fokusavimo sąlygų. Tuo tarpu artimosios infraraudonosios spektro dalies bangos ilgiams per vieną įrašymo operaciją π radianų dydžio fazės vėlinimo įrašyti neįmanoma – reikia

įrašinėti du kartus, t.y. formuoti du sluoksnius 8. Dar didesniems bangos ilgiams prireiktų dar daugiau sluoksnių. Fig.9 konfiguracija leidžia realizuoti pluošto formotuvą artimojoje infraraudonojoje spektrinėje srityje, pvz. ties 1064nm, net ir su vienu anizotropiniu sluoksniu 8. Antra vertus, tuo pačiu anizotropinių sluoksnių 8 skaičiumi ir storiu (kaip Fig.2) galima išplėsti formotuvo panaudojimo ribas į ilgesnių bangų ilgių ruožą.

Fig.10 paveiksle iliustruojama poliarizaciją transformuojančio optinio elemento 2, sudarančio šio išradimo pluošto formotuvo 1 pagrindą, gamybos technologija. Optiškai izotropinio stiklo, pvz. lydyto kvarco, bandinio tūryje fokusuojant tam tikros energijos femtosekundinius impulsus, susidaro sąlygos savitvarkėms dvejopai šviesą laužiančioms nanogardelėms susiformuoti. Parinkus įrašančiosios lazerinės ultratrumpųjų impulsų spinduliuotės parametrus yra valdomas nanogardelių dviejų lūžio rodiklių skirtumas („dvejopalūžiškumo dydis“), ir tuo pačiu suminis fazės vėlinimo dydis, kuris susidarys tam tikro bangos ilgio spinduliuotei per visą anizotropinio sluoksnio 8 storį.

Dvejopai šviesą laužiančių nanogardelių raštas yra formuojamas skenuojant plotą 27 bandinio 2 apertūroje. Siekiant pilnai nuslopinti pradinio gausinio pluošto „sparnus“, femtosekundine spinduliuote paveikto ploto 27 matmuo turi bent 3 kartus viršyti pradinio pluošto diametrą (FWHM). Įrašančiosios spinduliuotės pluošto sąsmaukoje yra paveikiama bandinio sritis 9 (diametras yra ribose nuo 10 iki 100 mikronų), kurioje susiformuoja daugybė minėtų dvejopai šviesą laužiančių nanogardelių. Vienoje srityje 9 visų nanogardelių lėtųjų ašių 10 orientacija sutampa. Įrašančiojo pluošto kaustikos ilgis apsprendžia sluoksnio 8 storį. Skenuojant bandinį ir keičiant užrašančiosios spinduliuotės poliarizacijos kryptį, yra suformuojamas reikiamas nanogardelių lėtųjų ašių 10 orientacijų raštas. Skanavimo būdas gali būti įvairus: rastrinis (visą laiką iš kairės į dešinę), pirmyn-atgal (pirmiausia iš kairės į dešinę, paskui – iš dešinės į kairę; Fig.10 trajektorija 28), radialinis (iš centro link kraštų) arba koncentrinų apskritimų. Suformuota nanostruktūra nedingsta po įrašymo.

Kitas aspektas – sritys 9 yra perklojamos, nepaliekant įrašančiosios spinduliuotės nepaveiktų zonų, kad nesusidarytų lūžio rodiklio šuoliukų, lemiančių pluošto bangos fronto iškraipymus. Be to, taip pasiekiamas vienodas Relėjaus sklaidos indėlis per visą pluošto skerspjūvį. Kuo tankiau išdėstomos įrašančios

spinduliuotės sąsmaukos (sritys 9), tuo geriau yra atspindima tolyginė nanogardelių orientacijų išsidėstymo erdvėje funkcija (pvz., tokia kaip pavaizduota Fig.4B, Fig.7B ar Fig.8B paveiksluose). Kiekviena iš sričių 9 gali būti įrašyta ir kelių impulsų sekomis, pvz. dubletais. Segmentas 30 atitinka vieną fazinę plokštelę, iš kurių yra sudarytas poliarizaciją transformuojantis optinis elementas 2.

Maksimali dvejojo lūžio vertė yra ribota, be to, egzistuoja priklausomybė nuo bangos ilgio. π radianų dydžio fazės vėlinimas viename sluoksnyje 8 galima indukuoti tik matomos spektro dalies bangos ilgiams. Artimosios infraraudonosios spektro dalies, pvz. 1064nm bangos ilgiui, π -vėlinimas pasiekiamas, įrasant du nanogardelių sluoksnius 8. Antrasis sluoksnius yra įrašomas fokusuojant įrašnčiąją spinduliuotę didesniame gylyje. $\pi/2$ -vėlinimą 1064nm bangos ilgiui galime įrašyti ir viename sluoksnyje 8. Pagamintas poliarizaciją transformuojantis optinis elementas 2 dirba keliasdešimt nm pločio bangos ilgių diapazone.

Fig.11 yra pavaizduotas realaus poliarizaciją transformuojančio optinio elemento 2 nuotrauka, padaryta patalpinus elementą 2 tarp sukryžiuotų poliarizatorių. Elemento centre yra matomas plotas 27, kuriame buvo atliekamas skanavimas femtosekunsine spinduliuote ir įrašinėjamos nanogardelės. Elementas 2 buvo pagamintas formuotuvo konfigūracijai, pagal kurią elementas 2 poliarizaciją analizuojančio elemento 4 pralaidumo ašis 15 yra statmena pradiniam pluošto poliarizacijos vektoriui P_0 .

Nagrinėjant skersinį pjūvį 29, galima išskirti nulinio apšviestumo sritį D bei dalinio apšviestumo sritis A, B, C. Srityje D sukryžiuoti poliarizatoriai, tarp kurių yra patalpintas elementas 2, visiškai blokuoja apšvietimo spinduliuotę. Tuo tarpu ploto 27 viduje yra kintamas apšviestumas. Apšviestumo kitimas atkartoja aukščiau minėtą pralaidumo profilį, turintį maksimalaus pralaidumo sritį B, mažesnio pralaidumo sritį C ir mažiausio pralaidumo sritį A. Srityje A apšviestumas nelygus nuliui, nes įrašytos nanogardelės sklaido ir depoliarizuoja šviesą, tad analizuojantis poliarizatorius jos neblokuoja. Depoliarizuotos šviesos indėlis visame plote 27 yra vienodas, be to, dėl didelės skėsties depoliarizuotą šviesą nesunku erdviškai nufiltruoti.

Fig.12-15 paveiksluose yra pavaizduoti šio išradimo formuotuvo panaudojimo optinėje grandinėje variantai. Stiprinant lazerinę spinduliuotę kvantiniame stiprintuve, yra pageidautina suformuoti plokščios viršūnės pluoštą, kuriuo tolygiau užpildomas stiprintuvo aktyvusis elementas ir pasiekiamas tolygesnis ir efektyvesnis stiprinimas.

Statūs pluošto kraštai leidžia eliminuoti difrakciją ant stiprintuvo aktyviojo elemento apertūros, ir tuo būdu sumažinti pluošto intensyvumo moduliaciją. Šio išradimo lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvus 1 gali būti panaudotas tarp osciliatoriaus 31 ir stiprintuvo 32 (Fig.12) arba tarp kelių stiprinimo pakopų 33, 34, 35 (Fig.13). Siekiant išvengti sklaidytos šviesos, po kiekvieno pluošto formavimo, jeigu reikia, gali būti atliktas erdvinis filtravimas. Erdvinio filtravimo sistema 36 ne tik nufiltruoja didelės skėsties nehomogeniškumą išsklaidytą šviesą, bet taip pat gali pasitarnauti pluošto diametro pakeitimui ir vaizdo pernešimui iš osciliatoriaus 31 arba stiprintuvo 33 į sekančią stiprinimo pakopą (32, 34, 35).

Kiti formuotuvo taikymai lazerinėse sistemose apima:

1) Pluošto simetrizavimą. Pvz., esant šoniniam osciliatoriaus aktyviojo elemento kaupinimui, sugeneruoto pluošto intensyvumo pasiskirstymas gali atkartoti erdvinį kaupinimo diodų išdėstymą Fig.16 pavaizduotas osciliatoriuje sugeneruotas penkiakampio formos pluošto intensyvumo pasiskirstymas, kuris atkartoja penkiais azimutiniais kampais išdėstyti šoninio kaupinimo diodus. Tokį pluoštą šio išradimo formuotuvu galima transformuoti į gausinį. Taip pat nesimetrinio profilio pluoštą galima transformuoti į apskritiminį/kvadratinį plokščios viršūnės pluoštą.

2) Taip pat šoninio kaupinimo atveju, sugerto kaupinimo spinduliuotės intensyvumas aktyviojo elemento centre gali būti didesnis nei periferijoje. Šiuo atveju pageidautina, kad į stiprintuvą (32, 34, 35) iš ankstesnės lazerinės pakopos (31, 33) ateitų ne gausinis ir ne plokščios viršūnės pluoštas, o pluoštas, kurio profilis turi įdubą centre. Tokiu būdu mažesnis stiprinimas strypo kraštuose bus kompensuotas didesniu intensyvumu tose pradinio profilio koordinatėse. Fig.17 paveiksle 43 numeriu pažymėtas intensyvumo pasiskirstymas pluošto, paduodamo į stiprintuvą, kurio stiprinimas yra didesnis nei kraštuose; 44 – intensyvumo pasiskirstymas minėto stiprintuvo išėjime. 43 tipo intensyvumo pasiskirstymas gali būti suformuotas šio išradimo formuotuvu 1.

3) Parametrinio stiprinimo sistemoje. Stiprintuvai 32 ir 34 – parametrinio stiprinimo kristalai, o pluoštai 5, 5a – suformuoti pageidaujamo profilio kaupinimo bangos pluoštas.

Taigi Fig.12 ir Fig.13 paveiksluose pluoštai 3, 3a, 3b reiškia bet kokio pradinio intensyvumo pasiskirstymo I_{xy0} pluoštus, o pluoštai 5, 5a, 5b – bet kokio

rezultatinio intensyvumo pasiskirstymo I_{XY1} pluoštus.

Dar viena šio išradimo formuotuvo 1 ir jo panaudojimo modifikacija apima lazerinę sistemą, kurioje stiprintuvo 32, 34 arba 35 aktyvusis elementas yra anizotropinis. Tuomet jis veikia kaip poliarizaciją analizuojantis optinis elementas, o formuotuve 1 poliarizatorius 4 yra nereikalingas.

Praktiniu požiūriu patogiausia šio išradimo panaudojimo optinėje grandinėje konfigūracija yra iliustruojama Fig.14 ir Fig.15. Elementas 37 reiškia osciliatorių 31, arba stiprinimo pakopą 33, 34, po kurios bus atliekamas pluošto profilio pakeitimas. Elementas 38 reiškia bet kurį iš stiprintuvų 32, 34 arba 35, į kurį yra paduodamas pakeisto profilio pluoštas. Į sistemą įtraukus papildomus elementus 39 ir 40, spinduliuotės poliarizacijos kryptis už pluošto formuotuvo gali nepriklausyti nuo poliarizacijos prieš formuotuvą. Elementas 39 – $\lambda/2$ fazinė plokštelė, kurios optinė ašis 41 yra orientuojama taip, kad formuojamo pluošto 3 poliarizacijos P_2 vektorius būtų pasuktas iki numatytos formuotuvo 1 pradinės poliarizacijos krypties P_0 . Elementas 39 gali būti poliarizatorius, jei pradinė spinduliuotė 3 yra nepoliarizuota. Elementas 40 – kita $\lambda/2$ fazinė plokštelė, kurios optinė ašis 42 yra orientuojama taip, kad formuotuvo išėjimo pluošto poliarizacijos vektorius P_1 būtų pasuktas iki reikiamos krypties P_3 . Taigi stiprintuvo 38 ir ankstesnės pakopos 37 poliarizacijos orientacijos P_3 , P_2 gali nesutapti su formuotuvo charakteringomis poliarizacijų kryptimis P_0 , P_1 , ir gali skirtis tarpusavyje. Fig.13, Fig. 14 pavaizduota konfigūracija suteikia lankstumo – elementų 2 ir 4 azimutinės padėtys yra fiksuojamos, o osciliatoriaus ir stiprintuvo nuosavosios poliarizacijų kryptys gali būti įvairios.

Dar vienas šio išradimo aspektas, sukant fazinę plokštelę 39, tuo pačiu nanogardelių raštu elemente 2 galima formuoti kelis pralaidumo skirstinius T_{XY} ir išėjimo pluošto intensyvumo pasiskirstymus I_{XY1} Pvz., Fig.18 yra pavaizduoti keli skirtingi intensyvumo pasiskirstymai, gauti iš pradinio gausinio pluošto, formuotuvu, skirtu transformuoti gausinį pluoštą į plokščios viršūnės pluoštą. Kreivės 45, 46, 47 atitinka tris skirtingus fazinės plokštelės 39 azimutinius kampus. Kadangi pradinio pluošto 3 poliarizacijos kryptis nesutampa su numatyta formuotuvo poliarizacija P_0 , poliarizacijų raštas P_{XY} susidaro ne toks, kokiam buvo suprojektuotas elementas 2. Pasekmė – kitoks T_{XY} ir rezultatinis intensyvumo pasiskirstymas. Taigi tuo pačiu formuotuvu galima gauti ir plokščios viršūnės pluoštą, ir pluoštą su įduba, o įdubos gylis yra valdomas fazinės plokštelės optinės ašies 41 azimutiniu kampu.

Dar vienas būdas tuo pačiu nanogardelių orientacijų raštu gauti skirtingus pluošto profilius – keisti į formuotuvą krentančio pluošto 3 diametrą. Analogiškai prieš tai aptartam atvejui, keičiant pradinio pluošto diametrą, poliarizacijų raštas P_{XY} susidaro ne toks, kokiam buvo suprojektuotas elementas 2. To rezultate kinta T_{XY} ir I_{XY1} .

Šio išradimo formuotuvo poliarizaciją transformuojantis elementas 2 gali būti pagamintas iš bet kurios medžiagos, kurioje pasireiškia minėtas savitvarkių anizotropinių nanogardelių indukcijos reiškiny. Kaip poliarizaciją analizuojantis elementas 4 tinka bet koks poliarizacijai selektyvus elementas – Briusterio kampais išpjautų plokštelių elementas, Nikolio ar Glano prizmės.

Bangos ilgių diapazonas, kuriems gali būti realizuotas gausinio pluošto apodizatorius-konverteris į plokščios viršūnės pluoštą pagal šio išradimo metodiką, priklauso nuo medžiagos, kurioje yra įrašinėjamos anizotropinės sritys, savybių ir lazerinio pluošto, kurio profilį norime pakeisti, bangos ilgio. Lydyto kvarco stiklo bandinyje mums pavyko pagaminti minėtą apodizatorių bangos ilgiams nuo 400 nm iki 1550 nm. Yra žinoma, kad įrašymas impulsų sekomis arba dubletais reikiamą dvejetainį žinymą leidžia pasiekti lengviau nei pavieniais impulsais.

Nepaisant to, kad visuose pateiktuose pavyzdžiuose yra vaizduojami nanogardelių orientacijų, poliarizacijų ir pralaidumo raštai, pasižymintys radialine simetrija, šio išradimo metodika gali būti pritaikyta bet kokiam dvimačiam pralaidumo skirstiniui gauti. Šio išradimo formuotuvą gali būti panaudotas nesimetriniam pluošto profiliui simetrizuoti.

Siekiant iliustruoti ir aprašyti šį išradimą, buvo pateikti tinkamiausių įgyvendinimo variantų aprašymai. Tai nėra išsamus ar išradimą ribojantis aprašymas, kuriuo siekiama nustatyti tikslią įgyvendinimo formą. Šios srities specialistams gali būti akivaizdžios daugybė modifikacijų ir variacijų, nenukrypstančių nuo šio išradimo esmės ir apimtys. Konkretūs įgyvendinimo variantai buvo parinkti ir aprašyti siekiant atskleisti šio išradimo principus ir jų geriausią praktinį pritaikymą. Visa šio išradimo apimtis yra apibrėžiama prie jo pridėta apibrėžtimi ir jos ekvivalentais, kuriuose visi minėti terminai turi prasmę plačiausiose ribose, nebent nurodyta kitaip.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvas (1),

apimantis poliarizaciją transformuojantį optinį elementą (2), kuriame poveikis į jį krentančio pluošto (3) poliarizacijai priklauso nuo pluošto spindulio skersinės padėties elemento (2) apertūroje, o perėjimas tarp padėčių, kurias kertantys pluošto (3) spinduliai patiria skirtingą poveikį poliarizacijai, yra tolygus,

bei poliarizaciją analizuojantį optinį elementą (4), kurio pralaidumas ir/arba atspindys priklauso nuo lazerinės spinduliuotės poliarizacijos krypties,

nuosekliai išdėstytus tiesiškai poliarizuoto lazerinio pluošto (3), apibūdinamo pradiniu bangos frontu (6), kelyje, kurie bendrai veikdami įneša lokalius pluošto galios nuostolius bei sukuria tam tikrą pralaidumo raštą, aprašomą skirstiniu T_{xy} ,

ir tuo būdu suformuoja išėjimo pluoštą (5), kurio intensyvumo pasiskirstymas I_{xy1} plokštumoje statmenoje pluošto sklidimo kryptčiai nesutampa su įėjimo pluošto (3) intensyvumo pasiskirstymu I_{xy0} ,

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

minėtas poliarizaciją transformuojantis optinis elementas (2) turi fazinės plokštelės savybių, ir yra pagamintas iš skaidrios optiškai izotropinės medžiagos, jos tūryje suformuojant bent vieną anizotropinį sluoksnį (8) su įrašytomis dvejopai šviesą laužiančiomis nanogardelėmis, atsirandančiomis dėl savaiminio medžiagos struktūros persitvarkymo paveikus femtosekundiniais tiesiškai poliarizuotos lazerinės spinduliuotės impulsais,

kur fazės vėlinimas tarp dviejų statmenų poliarizacijos dedamųjų visose skersinėse padėtyse yra vienodas, o skirtingas poveikis pluošto (3) spindulių poliarizacijai yra pasiekiamas parinkus reikiamus kampus tarp minėtų įrašytų dvejopai šviesą laužiančių nanogardelių lėtųjų ašių (10) kryptčių ir pradinio pluošto (3) tiesinės poliarizacijos krypties P_0 ;

minėto išėjimo pluošto (5) bangos frontas (7) sutampa su pradiniu bangos frontu (6) pusės bangos ilgio tikslumu.

2. Lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvas pagal 1 punktą,

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

optinio elemento (2) tūryje suformuotų anizotropinių sluoksnių (8) suminis storis užtikrina π radianų dydžio fazės vėlinimą tarp dviejų statmenų poliarizacijos dedamųjų.

3. Lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvą pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad optinio elemento (2) tūryje suformuotų anizotropinių sluoksnių (8) suminis storis užtikrina $\pi/2$ radianų dydžio fazės vėlinimą tarp dviejų statmenų poliarizacijos dedamųjų, o į formuotuvo (1) sudėtį įeina $\lambda/4$ bangų plokštelė, patalpinta prieš poliarizaciją transformuojantį optinį elementą (2).

4. Lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvą pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad pluošto (3) bangos ilgis yra ribose nuo 400nm iki 1550nm.

5. Lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvą pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad išėjimo pluoštas (5) yra gaunamas iš optinio elemento (4) praleistos spinduliuotės.

6. Lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvą pagal bet kurį iš 1-4 punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad išėjimo pluoštas (5) yra gaunamas iš optinio elemento (4) atspindėtos spinduliuotės.

7. Lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvą pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad skaidri optiškai izotropinė medžiaga, iš kurios yra pagamintas elementas (2), yra lydytas kvarcas.

8. Lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvą pagal bet kurį iš 1-6 punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad skaidri optiškai izotropinė medžiaga, iš kurios yra pagamintas elementas (2), yra $\text{TiO}_2\text{:SiO}_2$ stiklas.

9. Lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvą pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad poliarizaciją analizuojantis optinis elementas (4) yra tiesinis poliarizatorius.

10. Lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvą pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad skirstinys T_{xy} (18), aprašantis pralaidumo raštą, yra tinkamas transformuoti gausinio profilio (20) pluoštą (21) į pluoštą (22), aprašomą super-Gauso funkcija (23).

11. Lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvą pagal 10 punktą,

b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad suminiai nuotoliai, įskaitant barstymus ant optinio elemento (2) medžiagoje suformuotų nehomogeniškumų, neviršija 50%.

12. Lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvo (1) pagal bet kurį iš ankstesnių punktų panaudojimas lazerinėje sistemoje tarp osciliatoriaus (31) ir stiprintuvo (32) arba tarp kelių stiprintuvų (33, 34, 35).

13. Lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvo panaudojimas pagal 12 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad formuotuvo (1) išėjimo pluošto (5) kelyje yra erdvinio filtravimo sistema (36).

14. Lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvo panaudojimas pagal bet kurį iš 12-13 punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad stiprinimo pakopų (32, 34, 35), optinėje grandinėje esančių už formuotuvo (1), aktyvusis elementas yra anizotropinis, kuris veikia kaip poliarizaciją analizuojantis optinis elementas, o formuotuvą (1) yra sudarytas tik iš poliarizaciją transformuojančio optinio elemento (2).

15. Lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvo panaudojimas pagal bet kurį iš 12-14 punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad tarpe tarp osciliatoriaus (31) arba stiprintuvo (33), po kurių optinėje grandinėje yra patalpintas formuotuvą (1), ir/arba tarpe tarp formuotuvo (1) bei vėliau einančios stiprinimo pakopos (stiprintuvai 32, 34, 35) yra $\lambda/2$ fazinės plokštelės (39, 40).

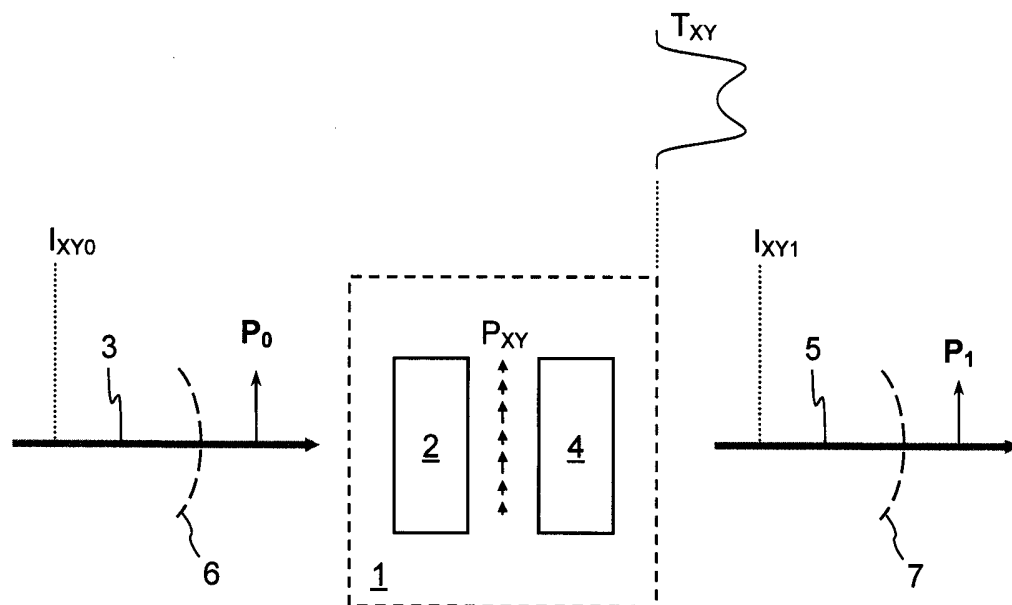


Fig.1

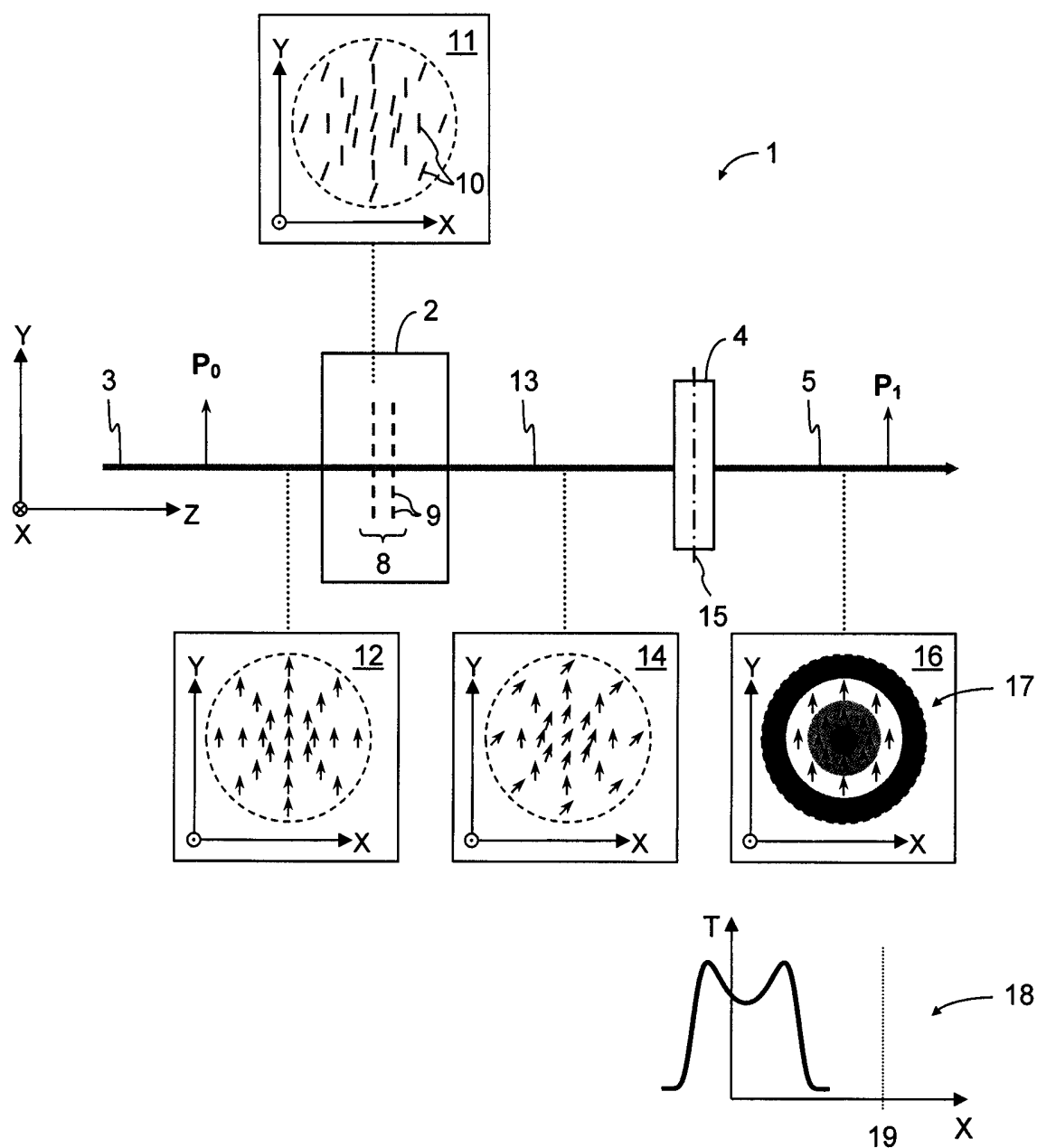


Fig.2

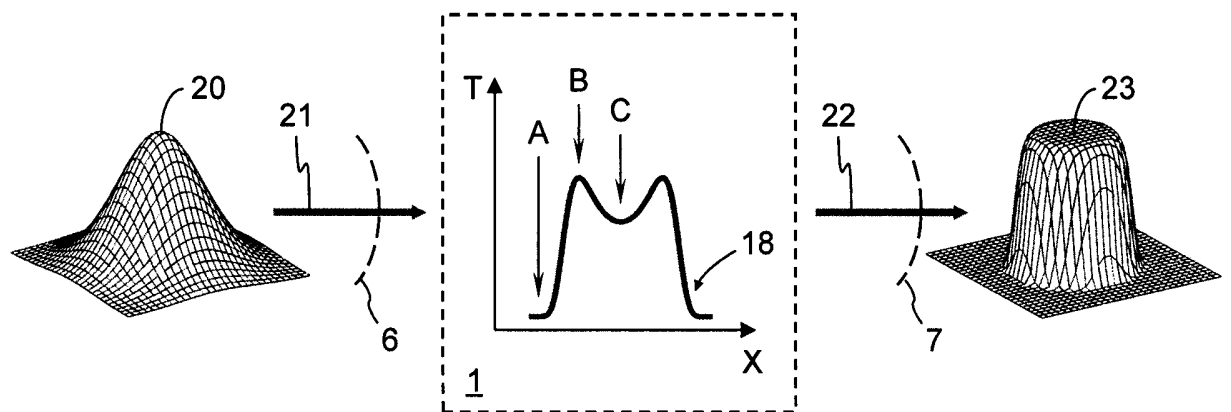


Fig.3

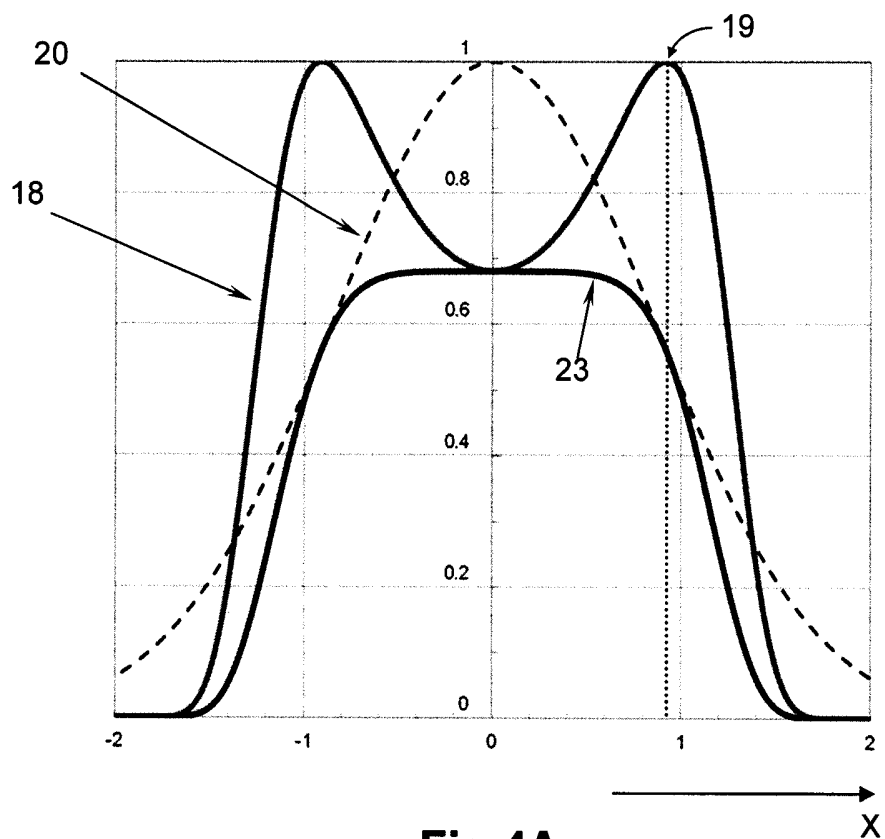


Fig.4A

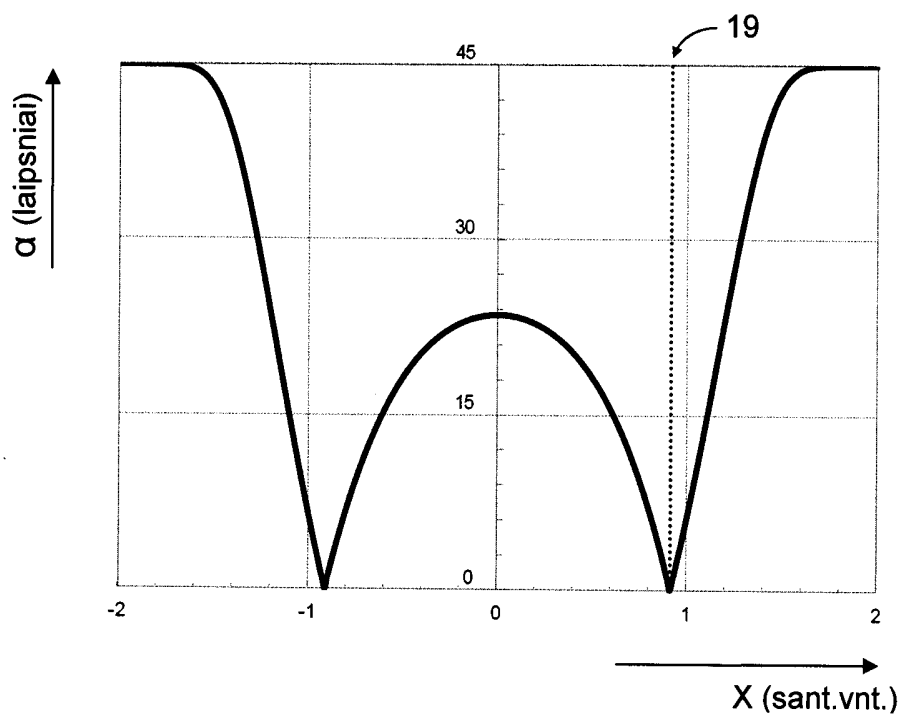


Fig.4B

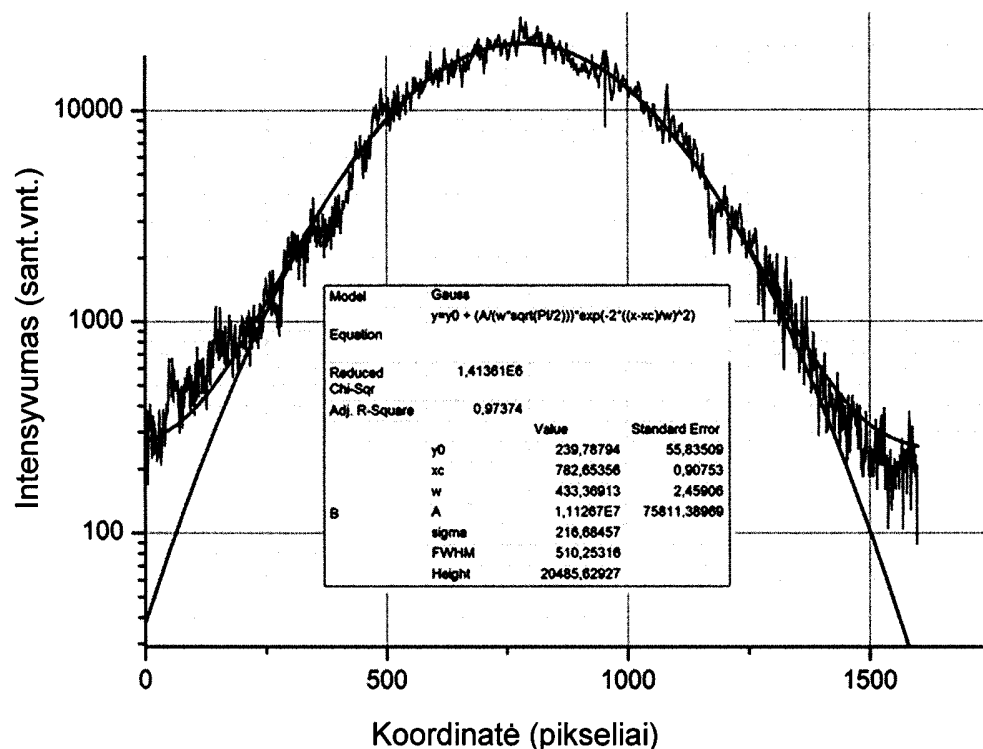


Fig.5

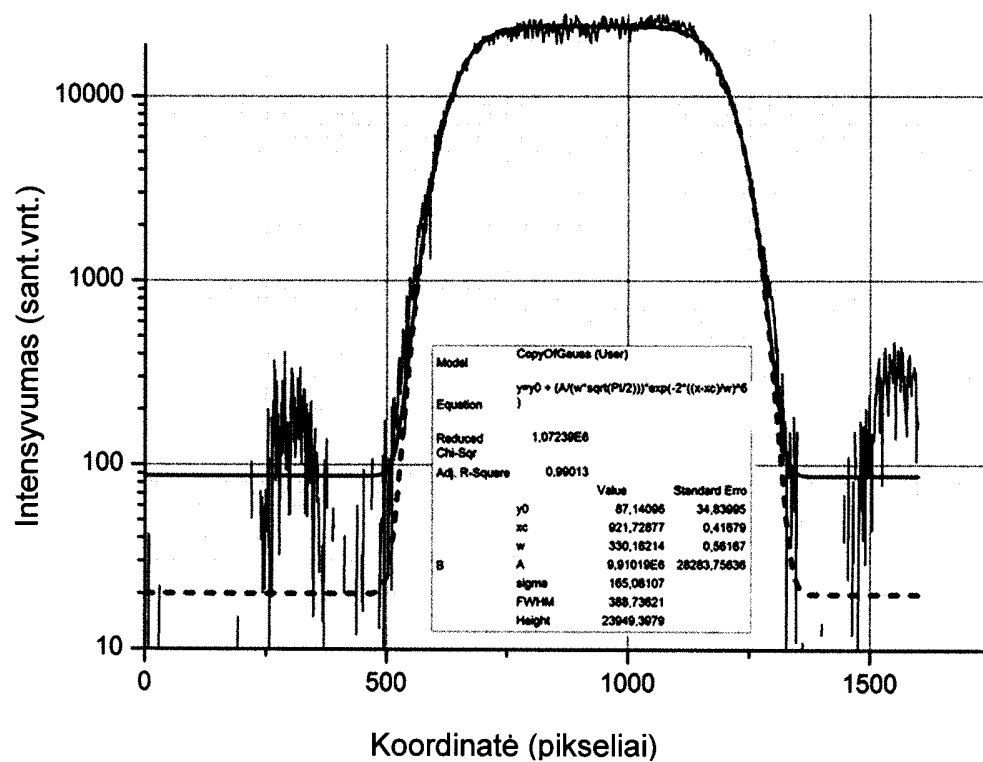


Fig.6

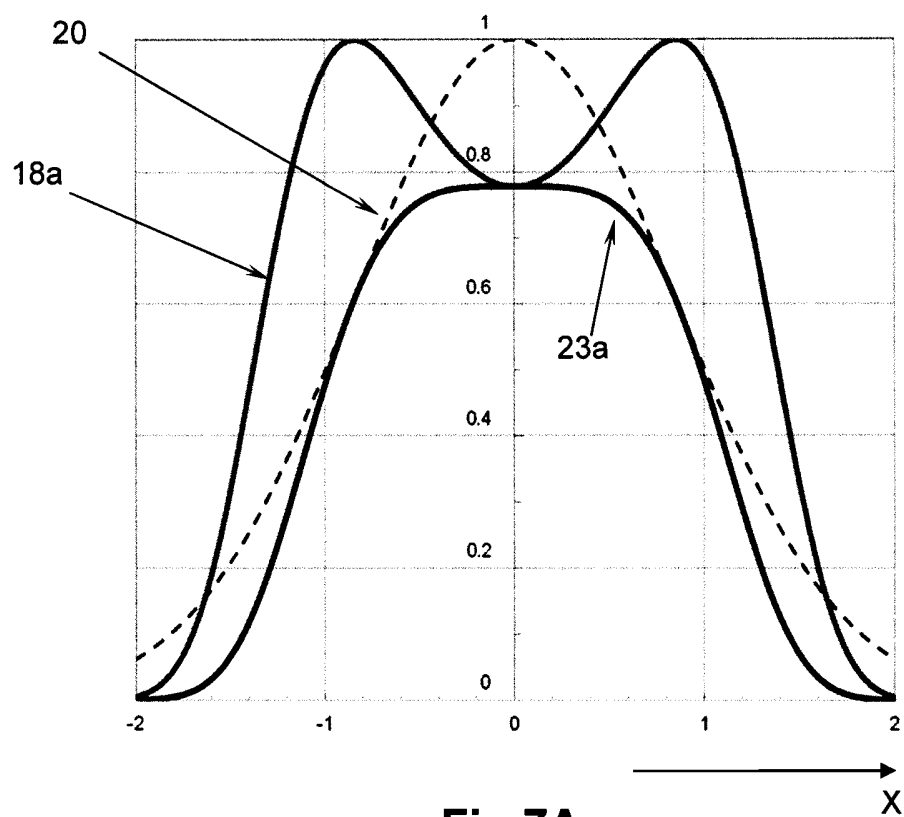


Fig.7A

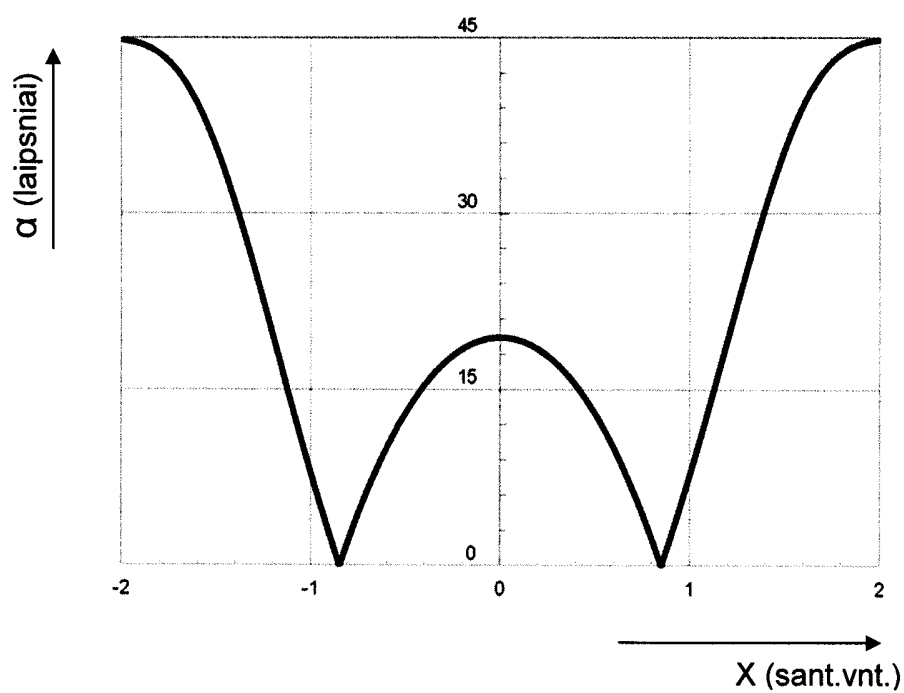


Fig.7B

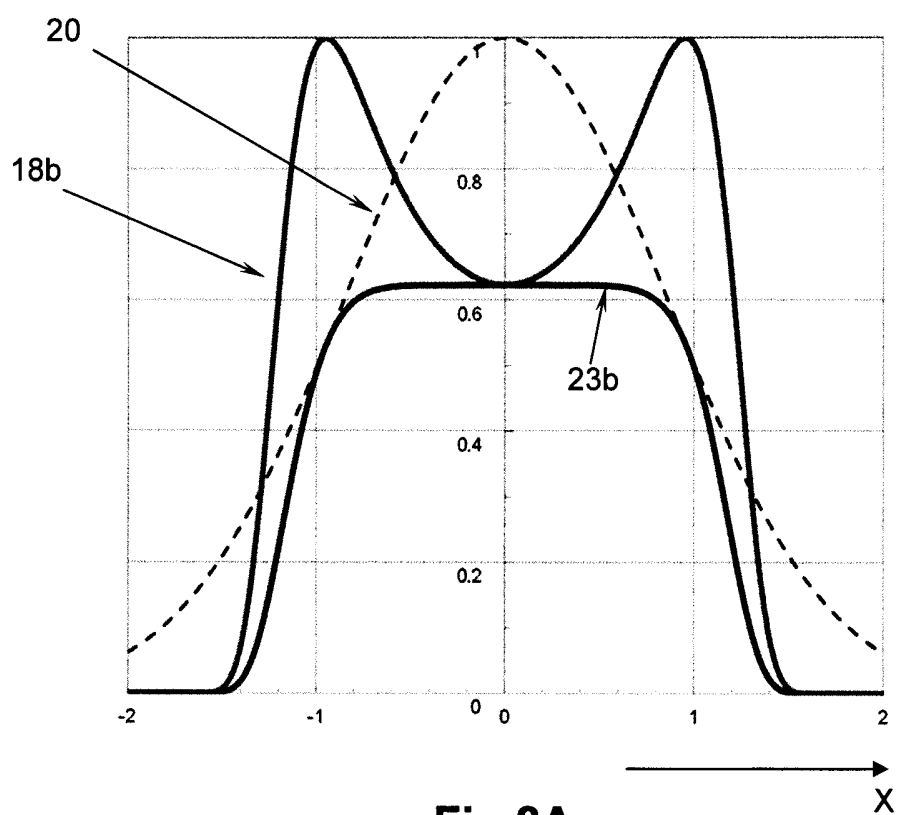


Fig.8A

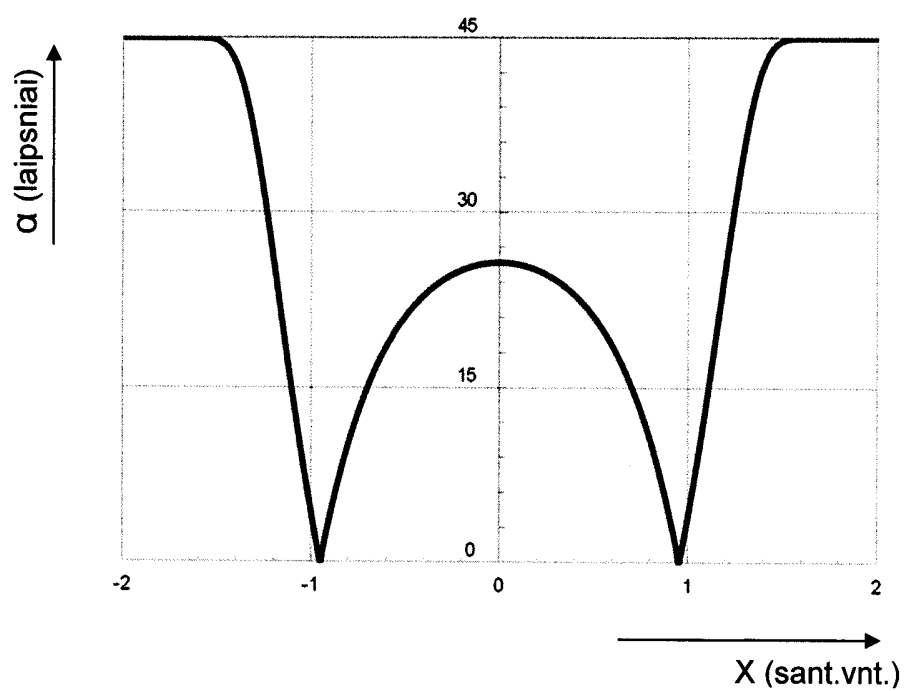


Fig.8B

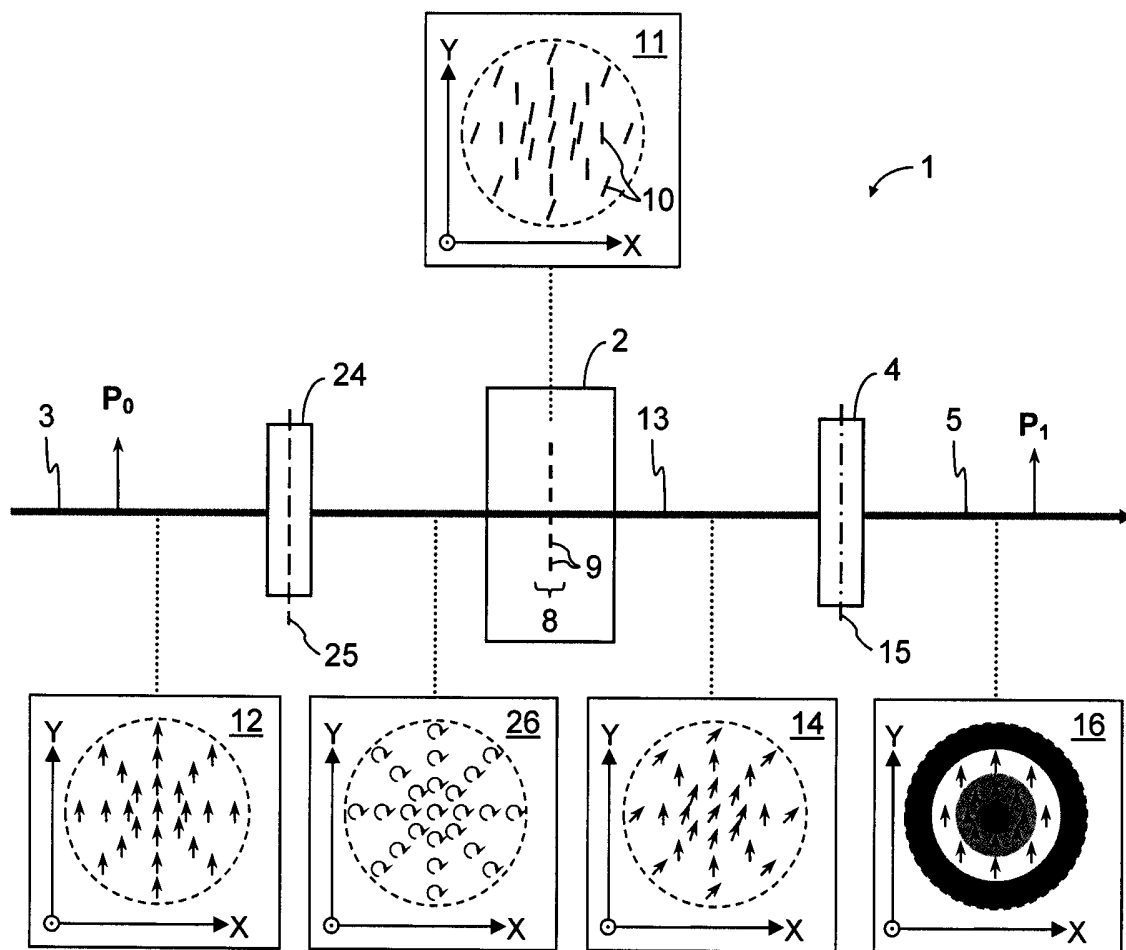


Fig.9

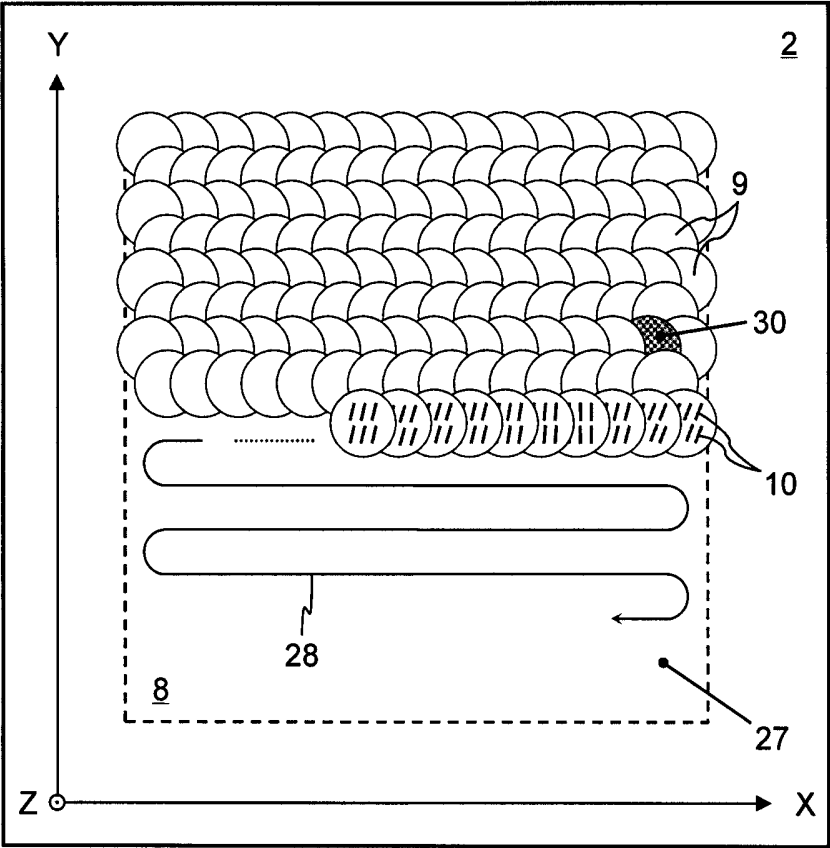


Fig.10

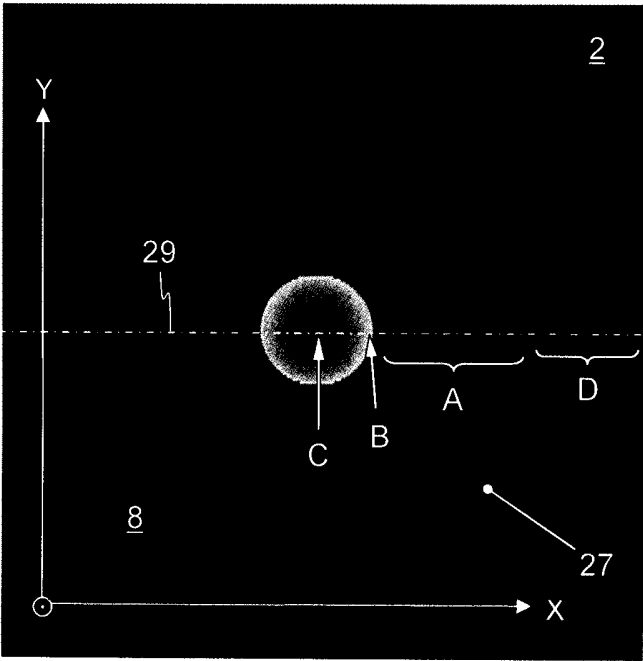


Fig.11

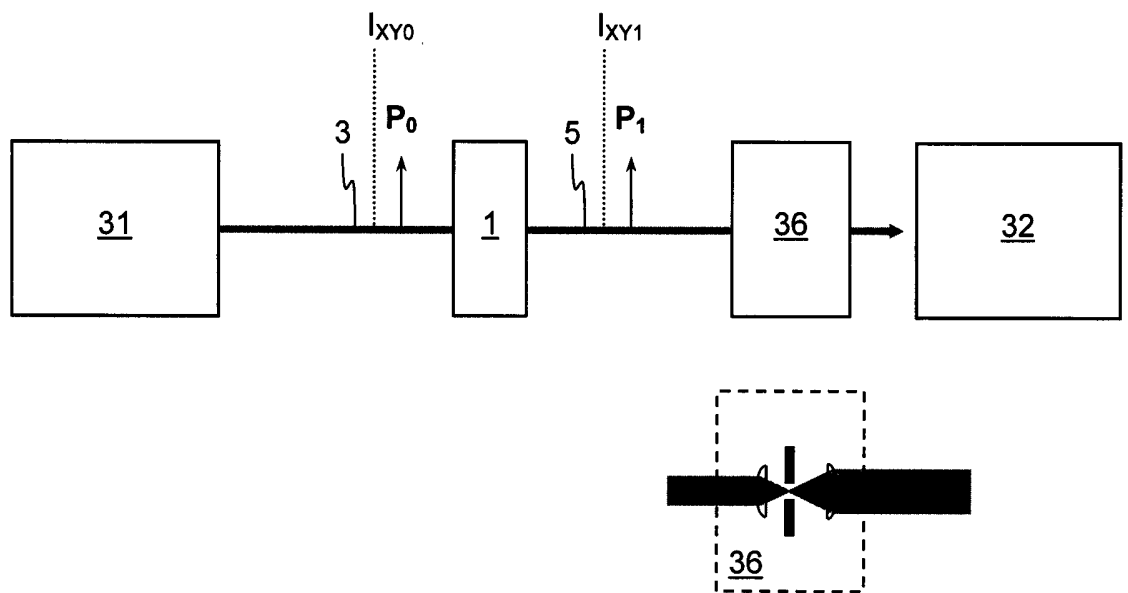


Fig.12

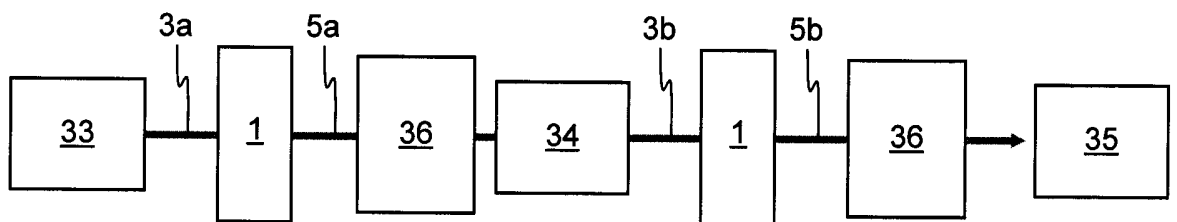


Fig.13

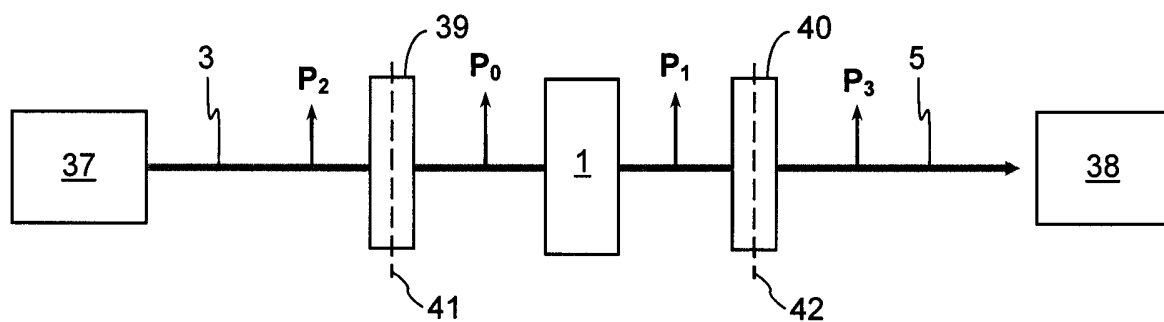


Fig.14

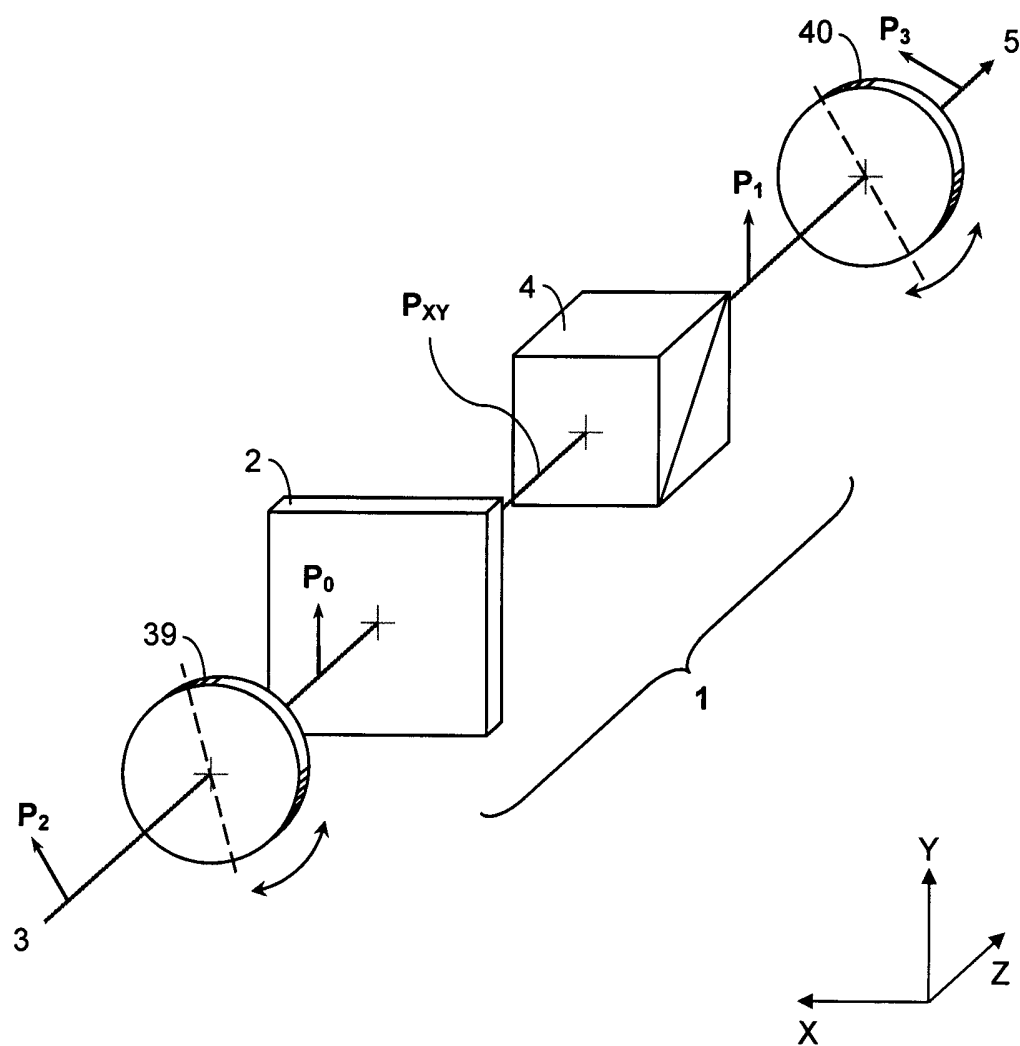


Fig.15

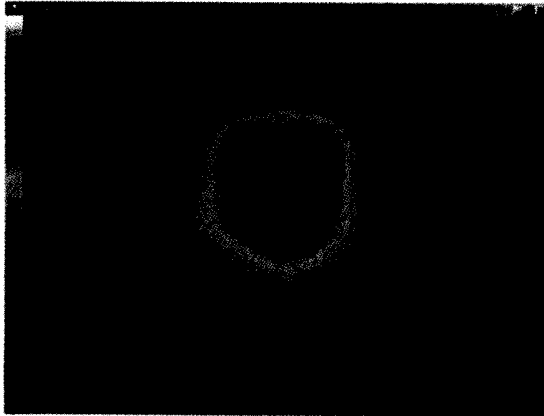


Fig.16

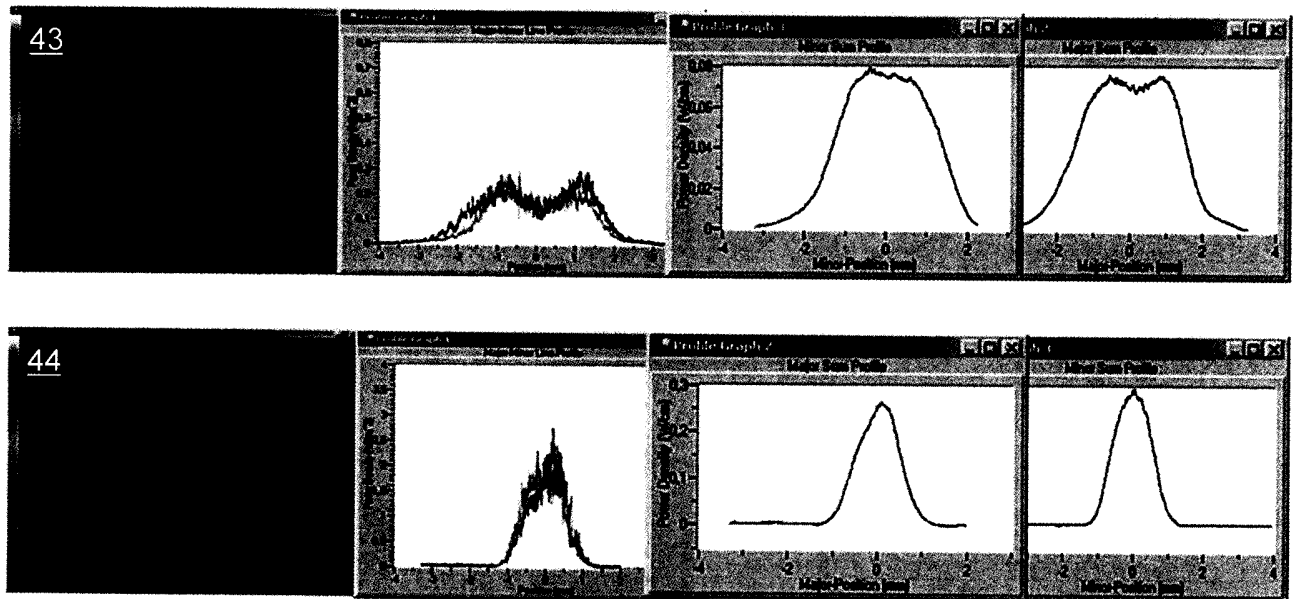


Fig.17

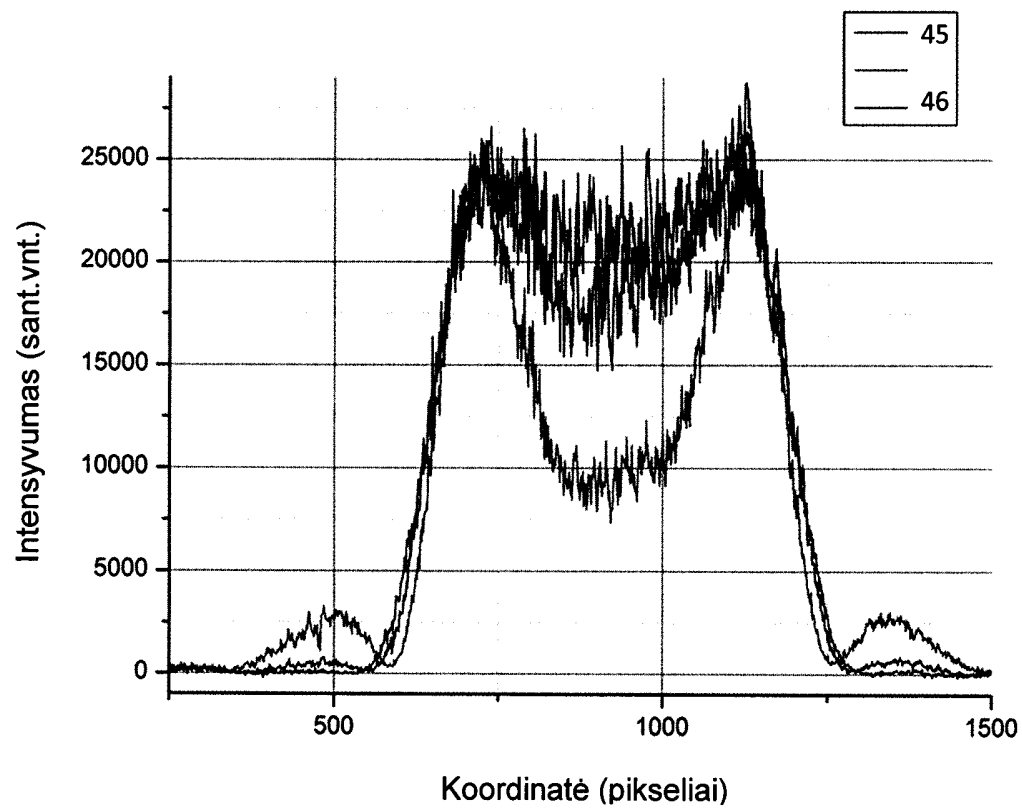


Fig.18