

- (11) Patento numeris: **6781** (51) Int. Cl. (2020.01): **G02B 5/00**  
**G02B 27/00**  
**H01S 3/00**
- (21) Paraiškos numeris: **2019 504**
- (22) Paraiškos padavimo data: **2019-03-20**
- (41) Paraiškos paskelbimo data: **2020-09-25**
- (45) Patento paskelbimo data: **2020-11-25**
- (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:  
**Andrejus MICHAILOVAS, LT**
- (73) Patento savininkas:  
**UAB „EKSPLA“, Savanorių pr. 237, LT-02300 Vilnius, LT**
- (74) Patentinis patikėtinis/atstovas:  
**Reda ŽABOLIENĖ, METIDA, Verslo centras „VERTAS“, Gynėjų g. 16, LT-01109 Vilnius, LT**

- (54) Pavadinimas:  
**Depoliarizacijos kompensatorius**

- (57) Referatas:

Išradimas yra susijęs su optiniais elementais, skirtais erdviškai netolygiam poliarizacijos valdymui, ypač su elementais, skirtais kompensuoti šviesos depoliarizaciją lazerinėse sistemose. Depoliarizacijos kompensatorius apima struktūruotą poliarizacijos keitiklį su erdviškai kintančia dvejojo lūžimo savybe. Jis yra pagamintas ultratrumpųjų impulsų spinduliuote bandinio tūryje įrašant mažesnes nei bangos ilgis nanogardeles. Įvairiose minėto poliarizacijos keitiklio skerspjūvio padėtyse yra įrašomos nanogardelės, pasižyminčios skirtinga orientacija ir skirtingu fazės vėlinimu dviem statmenoms poliarizacijos komponentėms. Poveikis poliarizacijai, pluoštui sklindant per struktūruotą poliarizacijos keitiklį, yra toks, kad kompensuoja poveikį poliarizacijai, kurį pluoštas patiria sklisdamas per termiškai apkrautą optinį elementą. Depoliarizacijos kompensatorius gali būti panaudotas didelės galios lazerinėse sistemose. Tinka ir nestabilaus rezonatoriaus konfigūracijos lazeriams. Ypač tinka tiesiniams vienlėkiams ar dvilėkiams stiprintuvams.

## TECHNIKOS SRITIS

Išradimas yra susijęs su optiniais elementais, skirtais šviesos poliarizacijos valdymui, būtent erdviškai netolygiam poliarizacijos valdymui. Išradimas yra ypač susijęs su optiniais elementais, skirtais kompensuoti šviesos depoliarizaciją dėl anizotropijos, atsirandančios temperatūros gradientą turinčiuose optiniuose elementuose (lazeriniuose kristaluose bei stikluose, Faradėjaus rotatoriuose ir t.t.). Išradimas taip pat yra susijęs su mikro skalėje struktūruotais optiniais elementais, pasižyminčiais erdviškai kintančia anizotropija (dvejopo spindulių lūžio savybe), įrašyta tiesioginio lazerinio rašymo būdu.

## TECHNIKOS LYGIS

Šiluminiai gradientai sukelia mechaninį įtempimą ir tuo būdu sąlygoja dvejopo spindulių lūžio (optinės anizotropijos) atsiradimą lazeriniuose optiniuose elementuose. Tai ypač yra aktualu lazerinių sistemų aktyviesiems elementams. Lūžio rodiklių dviems statmenoms poliarizacijos komponentėms nesutapimas lemia dvejopą židinio nuotolį (bifokusavimą) ir šviesos, kertančios minėtą optinį elementą, poliarizacijos būsenos pasikeitimą. Indukuotos anizotropijos charakteringosios ašys priklauso nuo temperatūros gradientų krypčių; cilindriniams elementams sutampa su radialine bei tangentine (statmena radialinei) kryptimis elemento skerspjūvyje. Jei lazerinėje sistemoje yra poliarizacijai jautrių elementų arba lazerinis pluoštas yra naudojamas netiesinėje šviesos konversijoje (bangos ilgio pakeitime), depoliarizuota šviesa yra išmetama arba pluošto depoliarizacija neigiamai paveikia netiesinės konversijos efektyvumą. Poliarizacijos valdymas panaudojant poliarizatorius lemia galios nuostolius ir lazerinio pluošto kokybės pablogėjimą, nes šviesos depoliarizacija pasižymi erdviniu netolygumu.

Įtempimų sąlygotos optinės anizotropijos įtakos šviesos poliarizacijos būsenai galima nepaisyti tikrai medžiagose, pasižyminčiose stipria natūralia anizotropija. Natūraliai optiškai izotropinėse medžiagose, tokiose kaip plačiai naudojami Nd:YAG ir Yb:YAG lazeriniai kristalai, depoliarizacija sumažina išvadinę energiją/galią ir stipriai paveikia pluošto erdvinį profilį. Yra keli būdai depoliarizacinių nuostolių sumažinimui. Dauguma jų yra paremti lazerinių optinių elementų depoliarizavimo įtakos kompensavimu, t.y. pradinės poliarizacijos būsenos atstatymu.

Indukuotos anizotropijos laipsnis ir depoliarizacinių nuostolių kiekis priklauso

nuo temperatūros skirtumo tarp centrinės lazerinio elemento dalies (karščiausios srities) ir paviršiaus, kuris liečiasi su aušintuvu (šalčiausios srities). Šis skirtumas, kitaip sakant, temperatūros gradientas priklauso nuo šiluminės ir/arba optinės apkrovos bei kristalo gabaritų, kristalo šiluminio laidumo, o taip pat aušinimo skysčio temperatūros. Tipinė depoliarizacinių nuostolių vertė lazerinėse sistemose, naudojančiose intensyviai kaupinamus [111]-orientacijos Nd:YAG cilindrinis lazerinius strypus, yra ribose nuo 20% iki 30% (schemose be depoliarizacijos kompensavimo). [100]- ir [110]-orientacijos Nd:YAG kristalai natūraliai pasižymi mažesnėmis įtempių tenzorius vertėmis (tam tikroms poliarizacijos kryptims) negu [111]-orientacijos kristalas. Europos patente nr. EP1478061 aprašytas kietakūnis lazeris, kaupinamas didelės galios šaltiniu, turintis [110]-orientacijos lazerinį strypą. Minėto patento autoriai išsiaiškino, kad depoliarizacija gali būti gerokai sumažinta, lyginant su [111]-orientacijos strypu, jei naudojamas [110]-orientacijos strypas, o lazerinio pluošto radiusas yra mažas. [110]-pjovimo kristale, kai pluošto radiusas yra mažesnis kaip  $1/4$  strypo radiuso, depoliarizaciniai nuostoliai gali būti sumažinti daugiau kaip viena eile, lyginant su [111]-pjovimo kristalu. Apribojimas naudoti tik mažą aktyviosios terpės dalį yra nepraktiškas aukštos galios šoninio kaupinimo lazeriuose, nes lemia mažą sistemos efektyvumą. O. Puncken *et al.*, „*Intrinsic reduction of the depolarization in Nd:YAG crystals*“, Opt. Express 18, 20461–20474 (2010) ir H. Tünnermann *et al.*, „*Linearly polarized single-mode Nd:YAG oscillators using [100]- and [110]-cut crystals*“, Opt. Express 19, 12992–12999 (2011) teigia, kad kaupinimo galioms, mažesnėms nei 2kW, silpniausia depoliarizacija yra pasiekama [100]-pjovimo kristale. Minėtuose straipsniuose parodyta, kad [100]-pjovimo YAG kristalas pasižymi 6 kartus mažesniais depoliarizaciniais nuostoliais negu [111]-pjovimo YAG kristalas tam tikros poliarizacijos krypties krentančiam lazeriniam pluoštui. Visgi bifokusavimas išlieka, o tai suformuoja eliptinį pluošto intensyvumo skirstinį.

JAV patentas nr. US4848881 aprašo šiluminio lęšio ir anizotropijos kompensatorių, apimantį cilindrinį optinės medžiagos kūną, termiškai susietą su šilumos mainų priemone ir radiatoriumi, kuris kaitina minėto cilindrinio kūno paviršių. Kompensatorius yra patalpintas lazerio rezonatoriuje, ir minėto cilindrinio kūno kaitinimas yra atliekamas ta pačia sparta, kokia kaupinimo lempos (dujų išlydžio lempos) žadina lazerinį strypą. Kompensatoriaus cilindriniam kūnui susidaro

radialiniai šiluminiai gradientai tokie, kad centras yra šaltesnis už paviršių. Tai reiškia, kad kompensatoriuje yra sukuriamas dinaminis priešingos laužiamosios gebos lęšis ir priešingo poveikio anizotropija, negu lazerinio strypo šiluminis lęšis ir anizotropija. Taigi yra išsprendžiama pluošto fokusavimosi arba skleidimosi problema, ir yra žymiai sumažinami depoliarizaciniai nuostoliai. Kompensatorius gali būti pagamintas, panaudojant plačiai paplitusią medžiagą, komerciškai žinomą kaip BK-7 stiklas. Pagrindinis minėto sprendimo trūkumas yra toks, kad jis turi laikiną veikimą. Kompensacija yra gaunama tik trumpą laiko intervalą – tik tol, kol kompensatoriaus cilindrinio kūno centras įkaista. Kai nelieta temperatūros gradiento, kompensacija nebevyksta. Todėl reikia daryti pertraukas, kuomet kompensatoriaus išorinis paviršius nėra kaitinamas, kad kompensatorius atvėstų. Minėto sprendimo autoriai teigia, kad toks kompensatorius tinka lazerių rezonatoriams dirbantiems nuo 10 iki 20 impulsų per sekundę dažniu.

I.L. Snetkov *et al.*, „*Effect of full compensation of thermally induced depolarization in two nonidentical laser elements*“, Opt. Lett. 41, 2374–2377 (2016) parodo galimybę kompensuoti termiškai indukuotą depoliarizaciją lazerinėje sistemoje su dviem aktyviosiomis terpėmis, paremtomis skirtingomis matricomis: stiklo ir [111]-orientacijos kristaline, arba stiklo ir keramine. Kompensacija yra paremta priešingu minėtų medžiagų atsaku į šiluminį gradientą (priešingu termo-optinio koeficiento ženklu). Užduotis yra sukurti vienodus šiluminius gradientus. Buvo pademonstruotas depoliarizacinių nuostolių sumažėjimas 4,6 karto, esant 200W lazerinei galiai.

Plačiausiai naudojami kompensacijos būdai apima pluošto sklaidimą vienodose aktyviosiose terpėse – dviejuose identiškuose lazeriniuose strypuose arba tame pačiame lazeriniame strype pirmyn ir atgal. W.C. Scott ir M.de Wit, „*Birefringence compensation and TEM00 mode enhancement in a Nd: YAG laser*“, Appl. Phys. Lett. 18, 3–4 (1971) pademonstravo depoliarizacijos sumažinimą panaudojant du lazerinius strypus su įterptu 90 laipsnių optiniu rotatoriumi tarp jų. Gali būti panaudotas kvarcinis arba magneto-optinis (Faradėjaus) rotatorius. Iki tam tikros galios dirba ir pusės bangos ilgio fazinė plokštelė. Šio sprendimo idėja – suvienodinti radialinės ir tangentinės poliarizacijos komponentių fazes lazerinės sistemos išėjime. Tai gali būti atlikta paverčiant radialinę poliarizacijos komponentę tangentine komponente, ir atvirkščiai, prieš pluoštui patenkant į antrąjį dviejų-strypų

lazerinės sistemos strypą, kuris yra vienodai kaupinamas. Nors indukuota anizotropija yra efektyviai sukompensuojama, ir depoliarizaciniai nuostoliai sumažėja iki vos kelių procentų, ši schema reikalauja dviejų lazerinių modulių su identiškais kaupinimo ir aušinimo sąlygomis. Dar vienas svarbus uždavinys yra užtikrinti vienodas pluošto sklaidimo trajektorijas abiejuose lazeriniuose strypuose. Be to, stiprintuvo konfigūracijoje viena aktyvioji terpė dirba ne soties režime; tai neleidžia efektyviai panaudoti visos sukauptos inversijos. Analogiškas depoliarizacijos kompensavimas dviejų lėkių vieno-strypo lazerinės sistemos konfigūracijoje taip pat yra žinomas (I.D. Carr ir D.C. Hanna, „*Performance of a Nd: YAG oscillator/amplifier with phase-conjugation via stimulated Brillouin scattering*“, Appl. Phys. B 36, 83–92 (1985); J.S. Shin *et al.*, „*Compensation of the thermally induced depolarization in a double-pass Nd: YAG rod amplifier with a stimulated Brillouin scattering phase conjugate mirror*“, Opt. Communications 283, 2402–2405 (2010)). Šiuo atveju 45 laipsnių optinis rotatorius, patalpintas tarpe tarp lazerinio strypo ir atgal grąžinančio galinio veidrodžio, poliarizacijos komponentų posūkį 90 laipsnių kampui atlieka per du lazerinio pluošto lėkius per jį. Kompensacija įvyksta tame pačiame lazeriniame strype. Nors antro lazerinio modulio poreikio nebelieka, reikalavimas užtikrinti vienodas šiluminės sąlygas pluošto kelyje pirmyn ir atgal yra dar sunkiau įgyvendinamas. Patobulintos depoliarizacijos kompensavimo schemas apima pakrypusius rotatorius, vaizdo pernešimo optiką, fazę konjuguojančius elementus; specialias taisykles elementų išdėstymui ir t.t. Plačiau apie tai galima paskaityti W. Koechner knygoje „*Solid-State Laser Engineering*“ (Springer Science & Business Media; 2006), patentuose US3928818, US5504763 bei straipsnyje I. Moshe *et al.*, „*Correction of thermally induced birefringence in double-rod laser resonators – comparison of various methods*“, Opt. Communications 214, 315–325 (2002)). Aukštos galios sistemoms reikia brangių vakuuminių kiuvečių vaizdo pernešimo moduluose. Pritaikius pakoreguotą (optimizuotą) lęšių konfigūraciją, kuri skiriasi nuo tradicinio vaizdo pernešimo teleskopo, Y. Wang *et al.*, „*Birefringence compensation of two tandem-set Nd: YAG rods with different thermally induced features*“, J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 11, 125501 (2009) pademonstravo depoliarizacijos kompensavimą tarp dviejų skirtingai termiškai apkrautų lazerinių medžiagų. Panašaus sprendimo pritaikymas osciliatoriaus-stiprintuvo grandinėje yra pristatytas EP0383638.

Kita šviesos depoliarizacijos kompensatorių klasė yra paremta

depolarizacinių nuostolių suvidurkinimu lazerinio pluošto skerspjūvyje. Aktyvioji medžiaga yra patalpinama tarp dviejų ketvirčio bango ilgio fazinių plokštelių. Tuo būdu per aktyviąją terpę sklinda apskritimiškai poliarizuota lazerinė spinduliuotė. Poveikis poliarizacijai įvairiose pluošto koordinatėse yra panašus dėl ašinės simetrijos abiejų dydžių – tiek pluošto poliarizacijos, tiek indukuotos anizotropijos rašto terminiškai apkrautoje aktyviojoje medžiagoje. Žemos ar vidutinės galios sistemose galima gauti aukštos kokybės pluoštų profilius, artimus gausiniam skirstiniui, tačiau depolarizaciniai nuostoliai netgi išauga – gali viršyti 30%. Aukštos galios sistemose gaunasi iš kelių žiedų sudaryti pluoštų profiliai.

US7085303 teigia, kad šiluminio lęšio ir depolarizacijos kompensavimui gali būti panaudotas lęšis, pagamintas iš dvejetainės medžiagos. Reikalingas tam tikras lęšio paviršių kreivumas. Įvedamo lūžio rodiklių ir fazės vėlinimo skirtumas dviems statmenoms poliarizacijos komponentėms yra proporcingas minėto dvejetainės medžiagos lęšio storiui ir priklauso nuo jo medžiagos. Pagaminti reikiamą paviršių kreivumą dideliu tikslumu yra iššūkis. Daugelis optikos komponentų gamintojų gali užtikrinti  $\lambda/10$  tikslumą plokšties paviršiams. Tačiau fazės vėlinimo tikslumas priklauso nuo elemento bendro storio ir yra sunkiai kontroliuojamas gamybos metu.

FR2679386 siūlo depolarizaciją kompensuoti elementu iš dvejetainės medžiagos, turinčio plokščius paviršius arba paviršius, kurie yra lenkti, bet lygiagretūs tarpusavyje. Sprendimo idėja yra paremta tuo, kad kompensuojančio elemento, turinčio minėtus paviršius, poveikis pluošto poliarizacijai yra priešingas terminiškai apkrauto lazerinio strypo poveikiui, jei minėtos dvejetainės medžiagos optinė ašis yra lygiagreti pluošto sklaidimo kryptiai ir lazerinis pluoštas turi reikiamą kampinių kryptų rinkinį (konvergenciją arba divergenciją). Ašiniai lazerinio pluošto spinduliai yra lygiagretūs kompensuojančio elemento optinei ašiai ir todėl lūžio rodiklis statmenoms poliarizacijos komponentėms yra vienodas. Kraštuose esantys lazerinio pluošto spinduliai sudaro kampą su minėto kompensuojančio elemento optine ašimi, todėl skyla į dvi statmenas poliarizacijos komponentes, kurios patiria skirtingą fazės vėlinimą (nes skiriasi lūžio rodikliai). Taigi užduotis yra sukurti reikiamus spindulių pokrypio kampus (pluošto konvergenciją arba divergenciją), kad būtų pasiekta depolarizacijos kompensacija visiems pluošto spinduliams, esantiems skirtingose pluošto skerspjūvio radialinėse koordinatėse. Kompensuojančio elemento ilgis taip

pat yra svarbus. Sprendimo įgyvendinimui gali būti reikalingas papildomas lęšis tarpe tarp lazerinio strypo ir kompensuojančiojo elemento, kad būtų galima pakoreguoti pluošto konvergenciją (ar divergenciją) visiškai depoliarizacijos kompensacijai pasiekti. Tai yra praktiška tik mažos galios lazeriuose. Jokių konkrečių įgyvendinimo pavyzdžių FR2679386 aprašyme pateikta nebuvo.

Terminiškai apkrauta aktyvioji terpė pasižymi aukštesne temperatūra viduje (centrinėje srityje) ir žemesne temperatūra kraštuose (periferinėse srityse). Cilindro formos lazerinis strypas su tolygiai aušinamu paviršiumi turi ašinę temperatūros gradiento ir indukuotos anizotropijos simetriją. Atvejuose su ašine simetrija, fazės vėlinimas tarp radialinės ir tangentinės poliarizacijos komponentų yra kvadratinė funkcija nuo radialinio atstumo nuo strypo centro. Idealus depoliarizacijos kompensatorius privalo pasižymėti anizotropijos raštu, kuris tiksliai panaikina anizotropijos raštą lazeriniame strype.

Sparčiai augantis struktūravimo mikro skalėje sektorius suteikia daug galimybių suformuoti bet kokį pasirinktos medžiagos savybės pasiskirstymą, norint turėti nuo koordinatės priklausančią poveikį į tą elementą krintančiam lazeriniam pluoštui. Įvairiems taikymams yra išvystyta mikro skalėje struktūruotų elementų: turinčių modifikuotus paviršius, turinčių modifikuotą tūrinę struktūrą, tam tikru būdu orientuotus skystuosius kristalus, metamedžiagas ir t.t.

Prieš du dešimtmečius buvo pastebėta galimybė femtosekundiniais lazeriniais impulsais lydyto kvarco bandinio tūryje įrašyti vienaašę optinę anizotropiją (L. Sudrie *et al.*, „*Writing of permanent birefringent microlayers in bulk fused silica with femtosecond laser pulses*“, Opt.Communications 171, 279-284 (1999)). Po kelerių metų buvo atskleista šio reiškinių priežastis – sufokusuotos ultratrumpųjų impulsų spinduliuotės židinio zonoje įvyksta savaiminis medžiagos persitvarkymas, ir susiformuoja mažesnių nei bangos ilgis matmenų periodinė struktūra (Y. Shimotsuma *et al.*, „*Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light pulses*“, Phys. Rev. Letters 91, 247405 (2003)). Dėl indukuoto struktūrinio periodiškumo lūžio rodiklis dviems statmenoms poliarizacijos dedamosioms tampa nevienodas. Minėta mažesnių nei bangos ilgis matmenų periodinė struktūra, dar. vad. savitvarkėmis nanogardelėmis, dvejopai šviesą laužiančiomis nanogardelėmis arba tiesiog nanogardelėmis, veikia kaip vienaašė dvejopalaužė medžiaga, įnešanti fazės vėlinimą tarp dviejų statmenų poliarizacijos komponentų, orientuotų pagal greitąją ir

lėtąją ašis. Metodas pavadintas tiesioginiu lazeriniu rašymu. Nanogardelių susiformavimo procesas ir rezultatinės optinės anizotropijos savybės priklauso nuo daugelio parametrų: įrašinės spinduliuotės impulsų trukmės, bangos ilgio, energijos, taip pat fokusavimo sąlygų ir nanogardelių orientacijos jau įrašytose gretimose zonose. Nanogardelių orientacija yra valdoma keičiant įrašinio lazerinio pluošto poliarizacijos kryptį. Mikrostruktūruotų elementų, paremtų šiuo reiškiniu, įvairovė yra apžvelgta šiuose straipsniuose: R. Drevinskas ir P. G. Kazansky, „*High-performance geometric phase elements in silica glass*“, APL Photonics 2, 066104 (2017); M. Beresna *et al.*, „*Ultrafast laser direct writing and nanostructuring in transparent materials*“, Advances in Optics and Photonics 6, 293 (2014).

Tarptautinėje patentinėje paraiškoje nr. WO2012150566 (M. Beresna *et al.*), kuri taip pat buvo publikuota kaip Europos patento paraiška nr. EP2705393 ir įregistruota kaip JAV patentas nr. US10156669, aprašytas struktūruotas poliarizacijos keitiklis pradinės tiesinės arba apskritiminės poliarizacijos konvertavimui į radialinę arba azimutinę šviesos poliarizaciją. Elemento struktūravimas yra paremtas erdviškai kintančios dvejopo lūžio savybės suformavimu minėtu tiesioginio lazerinio rašymo būdu. Beresna *et al.* sprendimo esmę sudaro pastovaus lūžio rodiklių skirtumo, bet skirtingos orientacijos nanogardelių įrašymas įvairiose skersinėse elemento koordinatėse. Lūžio rodiklių skirtumas yra toks, kad fazės vėlinimas tarp statmenųjų poliarizacijos komponentų lygus pusei arba ketvirčiui bangos ilgio. Tai lemia skirtingą poveikį kertančio lazerinio pluošto lokaliai poliarizacijai. Yra pateiktas nanogardelių orientacijų pasiskirstymas, reikalingas minėtiems tikslams pasiekti. Sprendimas apsiriboja regimąja spektro sritimi.

Artimiausi pagal techninę esmę yra Europos patentas nr. EP2965852. Jame aprašytas lazerinio pluošto skersinio profilio formuotuvai, kurio esminis elementas yra struktūruotas poliarizacijos keitiklis, pagamintas minėtu tiesioginio lazerinio rašymo būdu. Struktūruotas poliarizacijos keitiklis, kuris pasižymi erdviškai kintančia dvejopo lūžio savybe, yra pagamintas iš skaidrios ir optiškai izotropinės medžiagos, jos tūryje suformuojant bent vieną anizotropinį sluoksnį su dvejopai šviesą laužiančiomis nanogardelėmis. Struktūruotas poliarizacijos keitiklis ir poliarizaciją analizuojantis optinis elementas, nuosekliai išdėstyti tiesiškai poliarizuoto lazerinio pluošto kelyje, bendrai veikdami, įneša lokalius pluošto galios nuostolius ir suformuoja norimą pluošto profilį. Kaip ir Beresna *et al.* sprendime minėta erdviškai



kintanti dvejojo lūžio savybė apima pastovų lūžio rodiklių skirtumą ir skirtingas minėtų nanogardelių orientacijas įvairiose keitiklio skerspjūvio padėtyse. Skirtumas nuo *Beresna et al.* sprendimo yra toks – nanogardelių orientacijų raštas yra nustatomas iš pluošto skersinio profilio, kurį siekiama suformuoti. Yra pateikiamas erdviškai kintančios nanogardelių orientacijos raštas siekiant suformuoti super-Gauso funkcijos pluošto profilį iš pradinio Gauso pavidalo pluošto: reikia įrašyti pastovų pusės bangos ilgio arba ketvirčio bangos ilgio fazės vėlinimą, o nanogardelių greitosios ašys turi būti orientuotos pagal simetrinę M-formos funkciją (ašinė simetrija). Konfigūracijai, kurioje yra įrašomas ketvirčio bangos ilgio fazės vėlinimas, reikalinga papildoma standartinė ketvirčio bangos ilgio fazinė plokštelė. Sprendimas yra tinkamas lazerinių pluoštų bangos ilgiams nuo regimosios spektrinės srities iki infraraudonosios spektrinės srities. Gali prireikti kelių sluoksnių su įrašytais nanogardelėmis, kad būtų pasiekta reikiama anizotropija (pusės arba ketvirčio bangos ilgio fazės vėlinimas). Sprendimas turi daug privalumų, tačiau yra pritaikytas tik tam tikriems pluošto profilio formavimo tikslams.

Nei vienas iš žinomų mikrostruktūruotų elementų neturi tokio anizotropijos rašto, kuris būtų skirtas kompensuoti lazerinio pluošto depoliarizaciją, atsirandančią pluoštui sklindant per temperatūrinį gradientą turinčius optinius elementus. Išradimu siekiama sukurti kompaktišką optinį elementą lazerinėse sistemose atsirandančios depoliarizacijos kompensavimui. Išradimu ypač siekiama sukurti depoliarizacijos kompensatorių, tinkantį didelės galios ir didelio impulsų pasikartojimo dažnio lazerinėms sistemoms. Dar vienas išradimo tikslas yra pasiūlyti būdą erdviškai kintančios anizotropijos valdymui, kad būtų galima atstatyti poliarizaciją, kurią sugadina termiškai apkrauta lazerinė aktyvioji medžiaga ar bet koks kitas optinis elementas. Taip pat siekiama sukurti optinį elementą depoliarizacijai, atsirandančiai dėl bet kokios priežasties (sugerties, mechaninių įtempimų, ar natūralios anizotropijos), kompensuoti. Depoliarizacijos kompensacija yra ypatingai aktuali lazerinėms sistemoms, kuriose lazerinė spinduliuotė užpildo beveik visą lazerinio strypo apertūrą. Taip yra nestabilių rezonatorių ir didelės galios tiesinių stiprintuvų atveju.

#### IŠRADIMO ESMĖ

Sprendimo esmę sudaro erdviškai netolygaus poliarizacijos valdymo elemento, pagaminto tiesioginio lazerinio rašymo būdu, panaudojimas kompensuoti

šviesos depoliarizaciją optinėse sistemose. Taip pat išradimo esmę sudaro depoliarizacijos kompensavimui reikalingų savitvarkių dvejopai šviesą laužiančių nanogardelių orientacijų ir erdviškai kintančio fazės vėlinimo (*angl.* retardance) įvairiose skersinėse koordinatėse nustatymas.

Pagal pasiūlytą išradimą depoliarizacijos kompensatorius apima struktūruotą poliarizacijos keitiklį, kuris yra fazinė plokštelė su erdviškai kintančia dvejopo lūžimo savybe, pagaminta iš skaidrios ir 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. Minėta erdviškai kintanti dvejopo lūžimo savybė apima įrašytų nanogardelių skirtingą orientaciją ir įneša skirtingą fazės vėlinimą tarp dviejų statmenų poliarizacijos komponentų įvairiose minėto keitiklio skerspjūvio padėtyse, todėl daro skirtingą poveikį kertančio lazerinio pluošto lokaliai poliarizacijai. Kiekvienoje lazerinio pluošto skersinėje padėtyje minėtas fazės vėlinimas tarp dviejų statmenų poliarizacijos komponentų, įgytas pluoštui sklindant per struktūruotą poliarizacijos keitiklį, yra toks, kad kompensuoja fazės vėlinimą, įgytą pluoštui sklindant per termiškai apkrautą optinį elementą.

Pranašumą turinčiame šio išradimo konstrukciniame išpildyme pasiūlytas depoliarizacijos kompensatorius pasižymi tuo, kad minėta erdviškai kintanti dvejopo lūžimo savybė yra pritaikyta kompensuoti šviesos depoliarizaciją, patiriamą termiškai apkrautame cilindriname lazeriniame strype su radialiniu temperatūros gradientu. Šiame išpildyme į struktūruotą poliarizacijos keitiklį įrašytų dvejopai šviesą laužiančių nanogardelių orientacija priklauso tik nuo azimutinio kampo keitiklio skerspjūvyje, o fazės vėlinimo vertė priklauso tik nuo radialinio atstumo nuo keitiklio centro. Specifiniame šio išradimo konstrukciniame išpildyme pasiūlytas depoliarizacijos kompensatorius pasižymi tuo, kad dvejopai šviesą laužiančių nanogardelių greitosios ašys yra orientuotos pagal tangentinę kryptį struktūruoto poliarizacijos keitiklio skerspjūvyje, suformuodamos koncentrinį apskritimų raštą, o fazės vėlinimo vertės priklausomybė nuo radialinio atstumo nuo keitiklio centro yra parabolinė funkcija.

Struktūruotą poliarizacijos keitiklį kertančio lazerinio pluošto bangos ilgis yra lydyto kvarco ( $\text{SiO}_2$  stiklo) skaidrumo srityje. Minėta skaidri ir optiškai izotropinė medžiaga, iš kurios yra pagamintas struktūruotas poliarizacijos keitiklis, yra  $\text{SiO}_2$

stiklas,  $\text{TiO}_2\text{:SiO}_2$  stiklas,  $\text{GeO}_2$  stiklas, porėtas  $\text{SiO}_2$  stiklas, borosilikatinis stiklas, kvarco arba YAG kristalas.

Struktūruoto poliarizacijos keitiklio lokalsios dvejopo lūžimo savybės valdymas yra pasiekiamas parenkant tiesiškai poliarizuotos femtosekundinių impulsų lazerinės spinduliuotės, naudojamos minėtų dvejopai šviesą laužiančių nanogardelių įrašymui, parametrus.

Yra pasiūlytas šio išradimo depoliarizacijos kompensatoriaus panaudojimas lazerinėse sistemose: stabilaus lazerinio rezonatoriaus viduje kiek galima arčiau lazerinio strypo; nestabilaus lazerinio rezonatoriaus viduje kiek galima arčiau išvadinio rezonatoriaus veidrodžio. O taip pat sistemose, turinčiose nestabilaus rezonatoriaus konfigūracijos lazerį, depoliarizacijos kompensatorių patalpinant už minėto lazerio rezonatoriaus ribų, arba sistemose, turinčiose bent vieną vieno praėjimo arba dviejų praėjimų stiprintuvą, depoliarizacijos kompensatorių patalpinant kuo arčiau minėto stiprintuvo.

Pagrindiniai šio išradimo kompensatoriaus privalumai yra galios nuostolių, susietų su šviesos depoliarizacija, sumažinimas ir pluošto kokybės pagerinimas tuo pačiu metu. Kompensatorius gali būti panaudotas didelės galios lazerinėse sistemose, nes neturi sugerties ir pasižymi aukštu pažeidimo slenksčiu. Padengtas antirefleksinėmis dangomis, įneša mažesnius nei 1% nuostolius. Jis yra labai stabilus mechanškai, nereikalauja sudėtingo derinimo, yra paprastas ir kompaktiškas (užima itin mažai vietos). Be to, sumažina skaičių kitų optinių elementų, kurių reikia lazerinėje sistemoje, siekiant gauti panašių savybių spinduliuotę. Dėl galimybės optinėje grandinėje naudoti mažiau elementų sumažina jos mechaninį sudėtingumą, pagerina stabilumą ir sumažina kainą. Šio išradimo depoliarizacijos kompensatorius yra tinkamas nestabilaus rezonatoriaus konfigūracijos lazeriams. Gali būti panaudotas tiek rezonatoriaus viduje, tiek išorėje. Ypatingai tinka didelės galios tiesiniams stiprintuvams. Iš principo, gali būti panaudotas kompensuoti depoliarizaciją, atsirandančią bet kokiame optinės sistemos elemente, pavyzdžiui, Faradėjaus rotatoriuje, patiriančiame šiluminę (ar optinę) apkrovą. Kompensatorius, pagamintas tam tikram bangos ilgiui, dirba maždaug kelių dešimčių nanometrų spektriniame ruože. Kompensatorius, pagamintas tam tikrai šiluminei apkrovai, efektyviai dirba ir režime, kai šiluminė apkrova yra iki 15% didesnė arba mažesnė.

Toliau išradimas detaliau paaiškinamas brėžiniais.

## TRUMPAS BRĖŽINIŲ PAVEIKSLŲ APRAŠYMAS

Pav.1A – cilindrinio aktyviosios medžiagos strypo, esančio lazerinės galvos modulyje, vaizdas iš priekio.

Pav.1B – tipinis temperatūros profilis Pav.1A pavaizduotame termiškai apkrautame cilindriname lazeriniame strype.

Pav.1C – lūžio rodiklių žemėlapis termiškai apkrautame [111]-pjovimo Nd:YAG arba Yb:YAG kristalo strype.

Pav.1D – poliarizacijos transformacijos iliustracija termiškai apkrautame [111]-pjovimo Nd:YAG arba Yb:YAG kristalo strype.

Pav.2 – lazerinės sistemos, turinčios lazerinį strypą ir poliarizatorių, optinė grandinė be depoliarizacijos kompensavimo.

Pav.3 – depoliarizuoto lazerinio pluošto poliarizacijų raštai prieš ir po poliarizatoriaus bei pluošto erdviniai profiliai poliarizatoriaus pralaidumo ir atspindžio kanale, kai lazerinis strypas yra vidutiniškai termiškai apkrautas.

Pav.4 – pluošto erdviniai profiliai poliarizatoriaus pralaidumo ir atspindžio kanale, kai lazerinis strypas yra stipriai termiškai apkrautas.

Pav.5 – lazerinė sistema, turinti lazerinį strypą, poliarizatorių ir šio išradimo depoliarizacijos kompensatorių.

Pav.6 – termiškai apkrautame [111]-pjovimo Nd:YAG arba Yb:YAG kristalo lazeriniame strype indukuotos anizotropijos greitųjų ašių orientacijos ir fazės vėlinimai bei greitųjų ašių raštas šio išradimo depoliarizacijos kompensatoriuje.

Pav.7 – prioritetinis šio išradimo išpildymo variantas – depoliarizacijos kompensatorius, pagamintas tiesioginio lazerinio rašymo būdu.

Pav.8 – pagaminto depoliarizacijos kompensatoriaus nuotrauka.

Pav.9 – šio išradimo depoliarizacijos kompensatoriaus panaudojimo stabilame lazerio rezonatoriuje pavyzdys.

Pav.10–Pav.11 – šio išradimo depoliarizacijos kompensatoriaus panaudojimo nestabiliame lazerio rezonatoriuje pavyzdžiai.

Pav.12 – šio išradimo depoliarizacijos kompensatoriaus panaudojimo optinėje grandinėje, apimančioje tiesinius stiprintuvus, pavyzdys.

## TINKAMIAUSI ĮGYVENDINIMO VARIANTAI

Pav.1A vaizduoja cilindrinio strypo 1, pagaminto iš aktyviosios medžiagos, kuris yra patalpintas lazerinės galvos modulyje 2, vaizdą iš priekio. Šoninio kaupinimo schemose lazerinės galvos modulis 2 turi ertmės kaupinimo šaltiniams bei specialią konfigūraciją efektyviam kaupinimo spinduliuotės įvedimui į lazerinį strypą 1 (Pav.1A nepavaizduota). Dar viena svarbi lazerinės galvos modulio 2 paskirtis yra efektyvus aktyvaus strypo 1 aušinimas. Aktyvusis strypas 1 gali būti įmerktas į aušinimo skystį 3 (skystis teka išilgai cilindrinio strypo paviršiaus) arba tampriai įtvirtintas į geru šiluminiu laidumu pasižymintį laikiklį su kanalais aušinimo skysčiui tekėti. Lazerio veikimo metu pagaminama šiluma yra pašalinama per strypo išorinius paviršius, tad strypo išorinis paviršius visada yra šaltesnis už centrinę strypo dalį ( $T_2 < T_1$ ). Tariant, kad yra visiška ašinė simetrija (tolygus šilumos pasiskirstymas ir nuvedimas), galima analizuoti tik strypo dalį 1'.

Pav.1B vaizduoja tipinę temperatūros priklausomybę nuo tolygiai kaupinamo lazerinio strypo skersinės koordinatės pradedant nuo karštesnio strypo centro ( $r=0$ ) ir keliaujant link šoninio strypo paviršiaus ( $r=r_{\text{strypo}}$ ), kuris turi tiesioginį kontaktą su aušinančia medžiaga. Homogeniškos medžiagos atveju temperatūros profilis yra parabolinis. Tai galioja visiems azimutiniams kampams cilindriniam lazeriniame strype 1 (ašinė simetrija), esant tolygiam šilumos nuvedimui per šoninį strypo paviršių.

Pav.1C vaizduoja termiškai apkrauto cilindrinio lazerinio strypo 1 (Pav.1A) dalį 1' ir indikatrišių (lūžio rodiklio elipsoido projekcijų stebimoje plokštumoje) žemėlapi, jei strypas 1 yra [111]-pjovimo Nd:YAG arba Yb:YAG kristalas. Lokalios anizotropijos principinės ašys – didžiausio ir mažiausio lūžio rodiklio kryptys – yra orientuotos išilgai strypo radiuso (radialinis lūžio rodiklis  $n_r$ ) ir radiusui statmena kryptimi (tangentinis lūžio rodiklis  $n_\phi$ ). Lūžio rodiklio vertės  $n_r$ ,  $n_\phi$  radialinei ir tangentinei poliarizacijos komponentei priklauso nuo koordinatės ir yra skirtingi. Abu lūžio rodikliai  $n_r$ ,  $n_\phi$  mažėja didėjant radialiniam atstumui nuo strypo centro, tačiau mažėja skirtingu tempu. To pasekmė – lūžio rodiklių skirtumas taške 4, kurio koordinatės ( $r'$ ;  $\phi'$ ), yra mažesnis, negu lūžio rodiklių skirtumas taške 5, kurio koordinatės ( $r''$ ;  $\phi''$ ). O lūžio rodiklių skirtumas taške 5 yra mažesnis, negu lūžio rodiklių skirtumas taške 6, kurio koordinatės ( $r'''$ ;  $\phi'''$ ). Tačiau lūžio rodiklių skirtumas taškuose 5, 7 ir 8, esančiuose tuo pačiu atstumu nuo strypo centro, yra vienodas.

Lūžio rodiklių nevienodumas lemia fazės vėlinimą tarp dviejų statmenų šviesos poliarizacijos komponentių. Anizotropijos arba dvejojo lūžio savybės stiprumas kiekybiškai yra apibrėžiamas kaip skirtumas tarp  $n_r$  ir  $n_\phi$  verčių. Fazės vėlinimas (ang. *retardance*) tarp statmenųjų poliarizacijos komponentių yra apibrėžiamas kaip optinių kelių skirtumas, išreikštas bangos ilgio vienetais –  $\lambda$  dalimis arba nanometrais.

Pav.1D vaizduoja pradinės tiesinės poliarizacijos  $\vec{E}_0$  transformaciją į apskritiminę, eliptinę arba pasuktą tiesinę poliarizaciją minėtuose trijuose taškuose 4, 5 ir 6. Pradinė poliarizacijos būseną yra identiška visose strypo 1 apertūros pozicijose (pažymėta kaip  $\vec{E}_{04}$ ,  $\vec{E}_{05}$ ,  $\vec{E}_{06}$ ). Radialinės ir tangentinės poliarizacijos komponentių amplitudės (pažymėta kaip  $\vec{E}_{r4}$ ,  $\vec{E}_{r5}$ ,  $\vec{E}_{r6}$  ir  $\vec{E}_{\phi4}$ ,  $\vec{E}_{\phi5}$ ,  $\vec{E}_{\phi6}$ ) priklauso nuo azimutinio kampo, nes pradinė poliarizacijos kryptis sudaro skirtingą kampą su lokalsios anizotropijos principinėmis ašimis. Erdviškai kintanti anizotropija modifikuoja pradžioje tiesinę poliarizaciją į apskritiminę, eliptinę arba tiesinę vėl. Pakitusi poliarizacija taške 4 yra pažymėta kaip  $\vec{E}_{14}$ , taške 5 – kaip  $\vec{E}_{15}$ , taške 6 – kaip  $\vec{E}_{16}$ . Tiesiškai poliarizuotas lazerinis pluoštas, sklisdamas per termiškai apkrautą lazerinį strypą 1, įgyja sudėtingą poliarizacijos raštą  $P_{XY1}$ .

Pav.2–4 vaizduoja poliarizatoriaus 9 veikimą optinėje grandinėje, turinčioje termiškai apkrautą lazerinį strypą 1. Paveikslai yra pateikti iliustraciniais tikslais ir tikrai neatspindi visų galimų pluošto profilio formų. Poliarizatorius 9, pavyzdžiui Glano-Teiloro prizmė, praleidžia tik poliarizaciją, kuri yra lygiagreti jo optinei ašiai 10 (žiūr. Pav.2). Lazerinis pluoštas 11 termiškai apkrauto lazerinio strypo 1 išėjime turi poliarizacijos raštą  $P_{XY1}$ . Lazerinis pluoštas 12 už poliarizatoriaus 9 (pralaidumo kanale) turi poliarizacijos raštą  $P_{XY2}$  ir intensyvumo skirstinį 13 (žiūr. Pav.3). Didžiausi galios nuostoliai yra kryptyse, sudarančiose 45, 135, 225 ir 315 laipsnių kampus su pradinės poliarizacijos kryptimi  $\vec{E}_0$ . Tam tikrose pluošto skerspjūvio zonose 14, 14', 14'', 14''' intensyvumas nukrenta iki nulio. Poliarizatoriumi 9 atspindėtos depoliarizuotos šviesos intensyvumo skirstinyje 15 zonose 14 yra didžiausias intensyvumas. Jei lazerinis strypas 1 yra intensyviai kaupinamas (stipriai termiškai apkrautas), yra stebima daug intensyvumo minimumų poliarizatoriaus 9 praleisto pluošto skerspjūvyje ir, atitinkamai, daug intensyvumo maksimumų poliarizatoriaus 9 atspindėto pluošto skerspjūvyje kaip pavaizduota Pav.4 (skirstiniai 13' ir 15', atitinkamai).

Pav.5 iliustruoja šio išradimo tikslą. Siekiama turėti tokį optinį elementą 16,

kuris optinėje grandinėje gali būti patalpintas iškart už lazerinio strypo 1, kad kompensuotų lazerinio pluošto 11 depoliarizaciją. Idealiu atveju kompensatoriaus 16 išėjime lazerinio pluošto 17 poliarizacijos raštas sutampa su pradiniu poliarizacijos raštu  $P_{xy0}$  lazerinio strypo 1 įėjime. Nevienodi vektorių ilgiai rašte  $P_{xy0}$  parodo, kad lazerinėje sistemoje cirkuliuoja ne plokščios viršūnės profilio pluoštas. Šviesos depoliarizacija, atsirandanti lazeriniame strype 1 yra visiškai kompensuojama. Jei už kompensatoriaus 16 būtų patalpintas poliarizatorius, nebūtų jokių depoliarizacinių galios nuostolių.

Pav.6 iliustruoja būdą visiškai kompensuoti šviesos depoliarizaciją. Terminiškai apkrautame [111]-plovimo lazeriniame strype 1, ir esant tolygiam šilumos pasiskirstymui bei nuvedimui, lokals anizotropijos greitosios ašys yra orientuotos radialine kryptimi (raštas 18), o fazės vėlinimas yra parabolinė funkcija 19 nuo radialinio atstumo nuo strypo 1 centro. Didžiausias vėlinimas  $R_{max}$ , kuris yra sukuriamas strype, priklauso nuo šiluminės apkrovos, strypo geometrijos bei šiluminio laidumo ir aušinimo galimybių. Siekiant pilnai kompensuoti depoliarizaciją, reikia sukurti tokią erdviškai kintančią anizotropiją kompensatoriaus 16 skerspjūvyje: fazės vėlinimas turi tiksliai atkartoti funkciją 19, o lokals anizotropijos ašys turi būti sukeistos vietomis. Kompensatoriuje 16 reikalingas nanogardelių greitųjų ašių raštas 20 yra sudarytas iš tangentine kryptimi nukreiptų rodyklių (pasižymi ašine simetrija). Esant sudėtingai aktyviosios medžiagos geometrijai ar netolygiam šilumos nuvedimui, temperatūros pasiskirstymo ir įtempių sąlygotos anizotropijos rašto modeliavimas yra sudėtingas. Šiuo atveju lengviau eksperimentiškai pamatuoti depoliarizuotos šviesos profilį ir iš jo nustatyti, kokį vėlinimą ir nanogardelių orientacijas reikia suformuoti kompensatoriuje 16.

Pav.7 parodo prioritetinį šio išradimo depoliarizacijos kompensatoriaus 16 išpildymo variantą. Kompensatorius 16 yra pagamintas iš skaidrios ir optiškai izotropinės medžiagos tiesioginio lazerinio rašymo būdu. Parenkant įrašančios spinduliuotės femtosekundinių impulsų energiją (o būtent, intensyvumas yra svarbus) ir tiesinės poliarizacijos kryptį, minėtos medžiagos tūryje yra suformuojamos anizotropinės sritys. Šios sritys yra sudarytos iš mažesnių nei bangos ilgis nanogardelių, todėl pasižymi dvejopu lūžio rodikliu. Optiškai izotropinė medžiaga, iš kurios yra pagamintas elementas 16 su suformuotomis anizotropinėmis sritimis, prioritetiškai yra lydytas kvarcas ( $\text{SiO}_2$  stiklas). Taip pat tinka ir kiti stiklai, kuriuose

ultratrumpaisiais lazeriniais impulsais galima indukuoti optinę anizotropiją. Tarp galimų medžiagų yra  $\text{TiO}_2$  ar kitomis priemaisomis legiruotas lydytas kvarcas, taip pat  $\text{GeO}_2$  stiklas, porėtas  $\text{SiO}_2$  stiklas, borosilikatinis stiklas, o taip pat kristalinės medžiagos: kvarcas arba YAG. Anizotropinės sritys su įrašytomis nanogardelėmis įneša fazės vėlinimą tarp dviejų statmenų poliarizacijos komponentų, orientuotų išilgai nanogardelės greitosios ir lėtosios ašių. Viena įrašoma sluoksnyje galima įrašyti iki 350nm dydžio fazės vėlinimą. Valdant nanogardelių orientaciją ir vėlinimą, galima sukurti bet kokią norimą lokalią anizotropiją.

Bandinio tūryje yra įrašomas vienas arba daugiau sluoksnių 21, sudarytų iš anizotropinių sričių 22. Kiekviena minėta anizotropinė sritis 22 susideda iš daugybės nanogardelių. Įrašomos femtosekundinių impulsų spinduliuotės poliarizacijos kryptis yra valdoma pagal apskaičiuotą raštą 20 (nanogardelių greitosios ašys 23 orientuojasi lygiagrečiai įrašanciojo lazerinio pluošto poliarizacijos kryptčiai). Kitos įrašymo proceso sąlygos – impulsų energija, fokusavimo parametrai, impulsų pasikartojimo dažnis, skanavimo greitis – yra parenkamos taip, kad būtų pasiektas reikiamas fazės vėlinimo profilis 19. Nanogardelių orientacijų raštas yra suformuojamas bandinyje skenuojant plotą 24. Šio ploto skersiniai matmenys gali būti didesni už lazerinio pluošto plotį intensyvumo  $1/e^2$  lygyje siekiant išvengti kietos apertūros efekto. Įrašomos spinduliuotės židinio zonoje (pluošto sąsmaukoje) yra paveikiama nuo 10 iki 100 mikrometrų dydžio bandinio sritis 22. Joje susiformuoja daug nanogardelių. Toje pačioje srityje 22 visos nanogardelės tarpusavyje yra lygiagrečios. Įrašomos spinduliuotės židinio zonos ilgis apsprendžia anizotropinio sluoksnio 21 storį. Skenuojant bandinį ir keičiant įrašomosios spinduliuotės poliarizacijos kryptį, yra suformuojamas reikiamas nanogardelių greitųjų ašių 23 orientacijų raštas 20. Suformuota nanostruktūra nedingsta po įrašymo. Skanavimo būdas gali būti įvairus, pvz. spiraline trajektorija 25. Didesnis kaip 350nm dydžio vėlinimas yra pasiekiamas įrašant kelis sluoksnius 21. Antras ir kiti sluoksniai yra įrašomi fokusuojant įrašančiąją spinduliuotę kitame bandinio gylyje. Bendras anizotropinių sluoksnių 21 storis yra toks, kad būtų gautas pagal suskaičiuotą dėsni (profilis 19) besikeičiantis vėlinimas tarp dviejų statmenų poliarizacijos dedamųjų. Kitas aspektas – sritys 22 yra perklojamos, nepaliekant įrašomosios spinduliuotės nepaveiktų zonų, kad nesusidarytų lūžio rodiklio netolygumų. Tankesnis sričių 22 išdėstymas užtikrina geresnį suskaičiuoto vėlinimo profilio 19 atkartojimą (Pav.6).



Kiekviena iš sričių 22 gali būti įrašyta ir kelių impulsų sekomis, pvz. dubletais. Suformuota nanostruktūra yra labai atspari aplinkos veiksniams. Nors yra galios nuostolių dėl Relėjaus sklaidos ant likusių netolygumų tarp sričių 22, šie nuostoliai yra maždaug vienodi per visą pluošto skerspjūvio plotą ir neviršija 1%.

Pav.8 yra pagaminto depoliarizacijos kompensatoriaus 16 nuotrauka su įrašytu fazės vėlinimo profiliu 19 pagal Pav.6, kur  $R_{\max}=550\text{nm}$ . Nuotrauka padaryta patalpinus elementą 16 tarp sukryžiuotų poliarizatorių. Nepaveikta lydyto kvarco bandinio zona 26 yra tamsi, o plotas 24, kuriame buvo atliekamas skenavimas femtosekundine spinduliuote ir įrašinėjamos nanogardelės, yra šviesus, išskyrus lygiagrečią ir statmeną kryptis poliarizatorių optinėms ašims.

Pav.9–12 vaizduoja šio išradimo depoliarizacijos kompensatoriaus inkorporavimą į lazerinių sistemų optines grandines. Pav.9 paveiksle yra pateiktas stabilaus rezonatoriaus konfigūracijos lazerio pavyzdys. Rezonatorių sudaro du galiniai veidrodžiai 27 ir 28, kur vienas iš galinių veidrodžių yra dalinai pralaidus, todėl dirba kaip išvadinis veidrodis. Pusiau-sferinio rezonatoriaus atveju, lazerinis strypas 1 yra patalpintas netoli plokščiojo galinio veidrodžio 28. Geriausia vieta depoliarizacijos kompensatoriui 16 pastatyti yra iškart už lazerinio strypo 1. Pluošto 11 poliarizacija termiškai apkrauto lazerinio strypo 1 išėjime yra atstatoma šio išradimo depoliarizacijos kompensatoriumi 16. Kelyje atgal, lazerinio pluošto poliarizacija kompensatoriumi 16 yra iš anksto kompensuojama prieš keliaujant per lazerinį strypą 1. Depoliarizacijos kompensatorių 16 galima statyti ir prieš lazerinį strypą 1. Idealios kompensacijos atveju, nėra jokios depoliarizuotos šviesos, ir niekas neatspindima nuo poliarizatoriaus 29, o išėjimo pluoštas 30 yra grynai tiesiškai poliarizuotas su apskritimiškai simetriniu pluošto intensyvumo skirstiniu. Depoliarizacijos kompensacija yra pasiekama nenaudojant antro identiško stiprinimo modulio, kas sumažina sistemos sudėtingumą ir kainą bei padidina efektyvumą.

Pav.10 ir Pav.11 vaizduoja nestabilaus rezonatoriaus konfigūracijos lazerį, kur lazerinis strypas 1 yra patalpintas tarp didelio atspindžio įgaubto ir išgaubto veidrodžių 27, 31. Patobulintoje konfigūracijoje išgaubtas veidrodis 31 pasižymi radiališkai kintančiu atspindžio koeficientu, kad būtų suformuotas „minkštas“ kraštas. Rezonatoriaus kokybę moduliuojantis elementas 32 ir poliarizatorius 29 yra esminiai elementai impulsinei lazerio veikai realizuoti. Kai rezonatoriuje nėra depoliarizacijos kompensatoriaus, depoliarizuota šviesa 33 yra atspindima nuo poliarizatoriaus 29.

Šio išradimo depoliarizacijos kompensatorius 16 gali būti panaudotas lazerio rezonatoriaus išorėje, kad atstatytų išėjimo pluošto 34 poliarizaciją. Tokiu atveju pagrindinai yra kompensuojama depoliarizacija, įgyta paskutinio lėkio per termiškai apkrautą strypą 1 metu. Paskutinio lėkio metu lazerinis pluoštas patiria didžiausią depoliarizaciją, nes turi didžiausią diametrą ir užpildo beveik visą lazerinio strypo apertūrą. Eksperimentai rodo, kad tokioje konfigūracijoje depoliarizaciniai nuostoliai (spinduliuotės 33, atspindėtos poliarizatoriumi 29, galia) neviršija 6%, kas yra reikšmingas didelės galios lazerio pagerinimas (galios nuostoliai sumažinami daugiau nei 3 kartus). Dar vienas Pav.10 pavaizduoto lazerio privalumas – yra pagerinamas išėjimo pluošto 34 profilis. Gaunamas beveik apskritas intensyvumo profilis, artimas super-Gauso funkcijai. Toks lazerinis pluoštas yra ypač tinkamas parametriniams šviesos stiprintuvams kaupinti.

Depoliarizacinių nuostolių minimizavimui depoliarizacijos kompensatorius turėtų būti įterptas į rezonatoriaus vidų (Pav.11). Geriausia vieta kompensatoriui pastatyti yra šalia rezonatoriaus išėjimo, kiek galima arčiau galinio veidrodžio 31. Čia susidaro sudėtingas poliarizacijos raštas, sudarytas iš poliarizacijos raštų, įgytų daugelio lėkių per lazerinį strypą 1 metu. Po kiekvieno dvigubo lėkio lazerinis pluoštas sugrįžta į lazerinį strypą 1 su tam tikru didinimu, kuris priklauso nuo galinių veidrodžių židinio nuotolių. Rezultatinis poliarizacijos raštas šalia išėjimo yra suma skirtingai padidintų poliarizacijos raštų  $P_{XY1}$ .

Pav.12 parodo dar vieną depoliarizacijos kompensatoriaus 16 panaudojimo būdą. Jis yra panaudojamas atstatyti poliarizaciją tiesinio vienalėkio arba dvilėkio lazerinio stiprintuvo išėjime. Didelės galios tiesiniai stiprintuvai paprastai dirba soties režime ir sunkiomis šiluminėmis sąlygomis. Dažniausiai lazerinis pluoštas užpildo visą aktyviosios terpės apertūrą ir todėl „mato“ visą sudėtingą lūžio rodiklių raštą. Pav.12 yra pavaizduotas dviejų tiesinių stiprintuvų 35, 36 seka. Po kiekvieno iš stiprintuvų 35, 36 yra po depoliarizacijos kompensatorių 16a, 16b, kad būtų išvengta galios nuostolių poliarizacijai selektyviuose elementuose 29a, 29b. Elementai 29a, 29b yra arba poliarizatoriai arba simbolizuoja paskiau einančio stiprintuvo poliarizacijai jautrų stiprinimą. Idealios kompensacijos atveju išėjimo pluoštai 37 ir 38 nėra paveikiami elementų 29a, 29b. Šiluminės sąlygos, aktyviųjų terpių dydžiai, lazerinio pluošto dydžiai gali skirtis. Anizotropijos raštai, kurie yra įrašomi į minėtus kompensatorius 16a, 16b, yra pritaikomi kiekvienam stiprintuvui 35, 36. Jie yra

nustatomi iš šiluminio lęšio ir/arba bifokusavimo matavimų arba tiesiogiai matuojant poliarizacijos pasiskirstymą specialiomis poliarizacijai jautriomis kameromis stiprintuvų 35, 36 aktyviųjų terpės išėjime.

Siekiant paaiškinti šį išradimą, buvo pateiktos tinkamiausių įgyvendinimo variantų iliustracijos ir 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. Visa šio išradimo apimtis yra apibrėžiama prie jo pridedama apibrėžtimi.

## IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

## 1. Depolarizacijos kompensatorius, apimantis

struktūruotą poliarizacijos keitiklį (16), kuris yra fazinė plokštelė su erdviškai kintančia dvejopo lūžimo savybe, pagaminta iš skaidrios ir optiškai izotropinės medžiagos, jos tūryje suformuojant bent vieną anizotropinį sluoksnį (21) su įrašytomis dvejopai šviesą laužiančiomis nanogardelėmis, atsirandančiomis dėl savaiminio medžiagos struktūros persitvarkymo paveikus femtosekundiniais tiesiškai poliarizuotos lazerinės spinduliuotės impulsais,

minėta erdviškai kintanti dvejopo lūžimo savybė apima įrašytų nanogardelių skirtingą orientaciją įvairiose minėto keitiklio (16) skerspjūvio padėtyse, todėl daro skirtingą poveikį kertančio lazerinio pluošto lokaliai poliarizacijai,

besiskiriantis tuo, kad

minėta erdviškai kintanti dvejopo lūžimo savybė įneša fazės vėlinimą tarp dviejų statmenų poliarizacijos komponentų, kuris yra skirtingas įvairiose lazerinio pluošto, kuris kerta minėtą keitiklį (16), skerspjūvio padėtyse, kur

kiekvienoje lazerinio pluošto skersinėje padėtyje minėtas fazės vėlinimas tarp dviejų statmenų poliarizacijos komponentų, įgytas pluoštui sklindant per keitiklį (16), yra toks, kad kompensuoja fazės vėlinimą, įgytą pluoštui sklindant per termiškai apkrautą optinį elementą.

## 2. Depolarizacijos kompensatorius pagal 1 punktą,

besiskiriantis tuo, kad

erdviškai kintanti dvejopo lūžimo savybė yra pritaikyta kompensuoti šviesos depolarizaciją, patiriamą termiškai apkrautame cilindriname lazeriniame strype (1) su radialiniu temperatūros gradientu, kur

į struktūruotą poliarizacijos keitiklį (16) įrašytų dvejopai šviesą laužiančių nanogardelių orientacija priklauso tik nuo azimutinio kampo keitiklio (16) skerspjūvyje, o fazės vėlinimo vertė priklauso tik nuo radialinio atstumo nuo keitiklio (16) centro.

## 3. Depolarizacijos kompensatorius pagal 2 punktą,

besiskiriantis tuo, kad

dvejopai šviesą laužiančių nanogardelių greitosios ašys yra orientuotos pagal tangentinę kryptį keitiklio (16) skerspjūvyje, suformuodamos koncentrinį apskritimų raštą (20), o

minėto fazės vėlinimo vertės priklausomybė nuo radialinio atstumo nuo keitiklio (16) centro yra parabolinė funkcija (19).

4. Depolarizacijos kompensatorius pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, besiskiriantis tuo, kad struktūruotą poliarizacijos keitiklį (16) kertančio lazerinio pluošto bangos ilgis yra lydyto kvarco skaidrumo srityje.

5. Depolarizacijos kompensatorius pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, besiskiriantis tuo, kad minėta skaidri ir optiškai izotropinė medžiaga, iš kurios yra pagamintas struktūruotas poliarizacijos keitiklis (16), yra lydytas kvarcas.

6. Depolarizacijos kompensatorius pagal bet kurį iš 1–4 punktų, besiskiriantis tuo, kad minėta skaidri ir optiškai izotropinė medžiaga, iš kurios yra pagamintas struktūruotas poliarizacijos keitiklis (16), yra  $\text{TiO}_2\text{:SiO}_2$  stiklas,  $\text{GeO}_2$  stiklas, porėtas  $\text{SiO}_2$  stiklas, borosilikatinis stiklas, kvarco arba YAG kristalas.

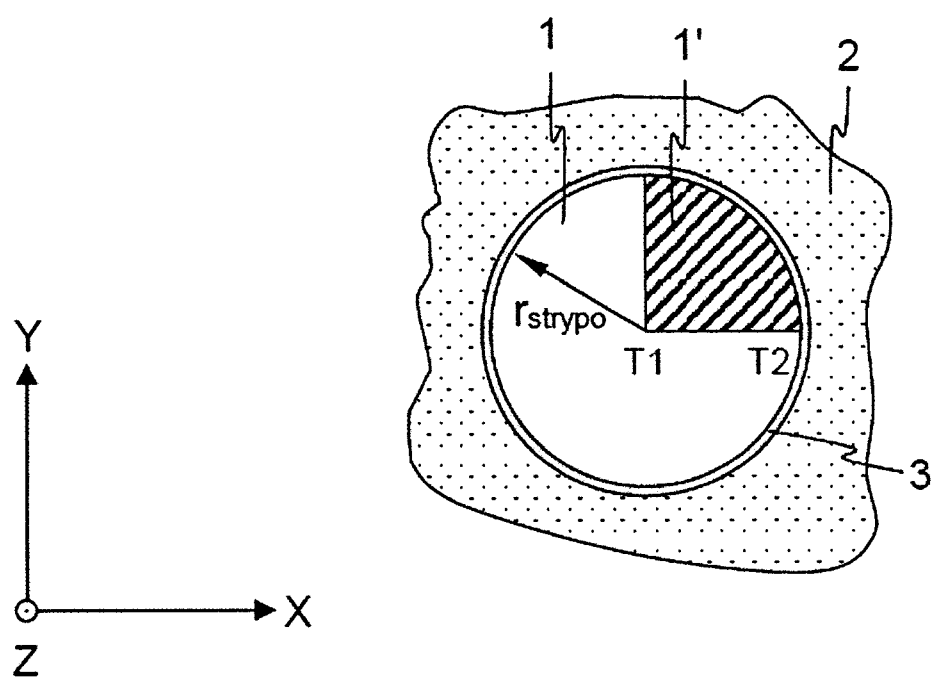
7. Depolarizacijos kompensatorius pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, besiskiriantis tuo, kad struktūruoto poliarizacijos keitiklio (16) lokalsios dvejopo lūžio savybės valdymas yra pasiekiamas parenkant tiesiškai poliarizuotos femtosekundinių impulsų lazerinės spinduliuotės, naudojamos minėtų dvejopai šviesą laužiančių nanogardelių įrašymui, parametrus.

8. Depolarizacijos kompensatoriaus pagal bet kurį iš 1–7 punktų panaudojimas stabilaus lazerinio rezonatoriaus viduje, kompensatorių statant kiek galima arčiau lazerinio strypo (1).

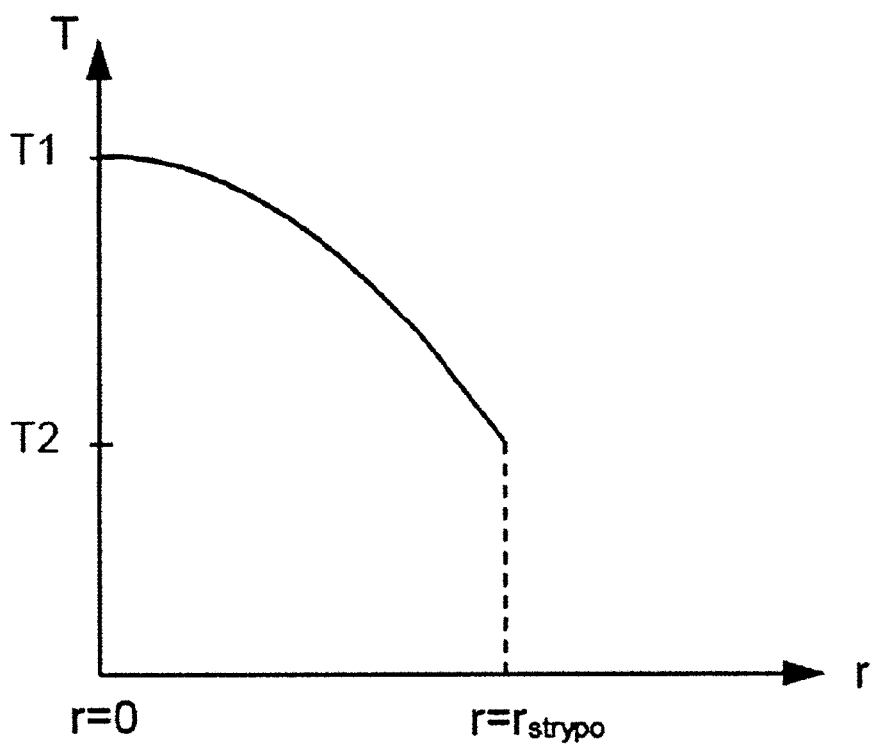
9. Depolarizacijos kompensatoriaus pagal bet kurį iš 1–7 punktų panaudojimas nestabilaus lazerinio rezonatoriaus viduje, kompensatorių statant kiek galima arčiau išvadinio galinio veidrodžio (31).

10. Depolarizacijos kompensatoriaus pagal bet kurį iš 1–7 punktų panaudojimas lazerinėje sistemoje, apimančioje lazerį, pasižymintį nestabilaus rezonatoriaus konfigūracija, kur depolarizacijos kompensatorius optinėje grandinėje yra patalpinamas už minėto lazerio netoli jo išvadinio veidrodžio (31).

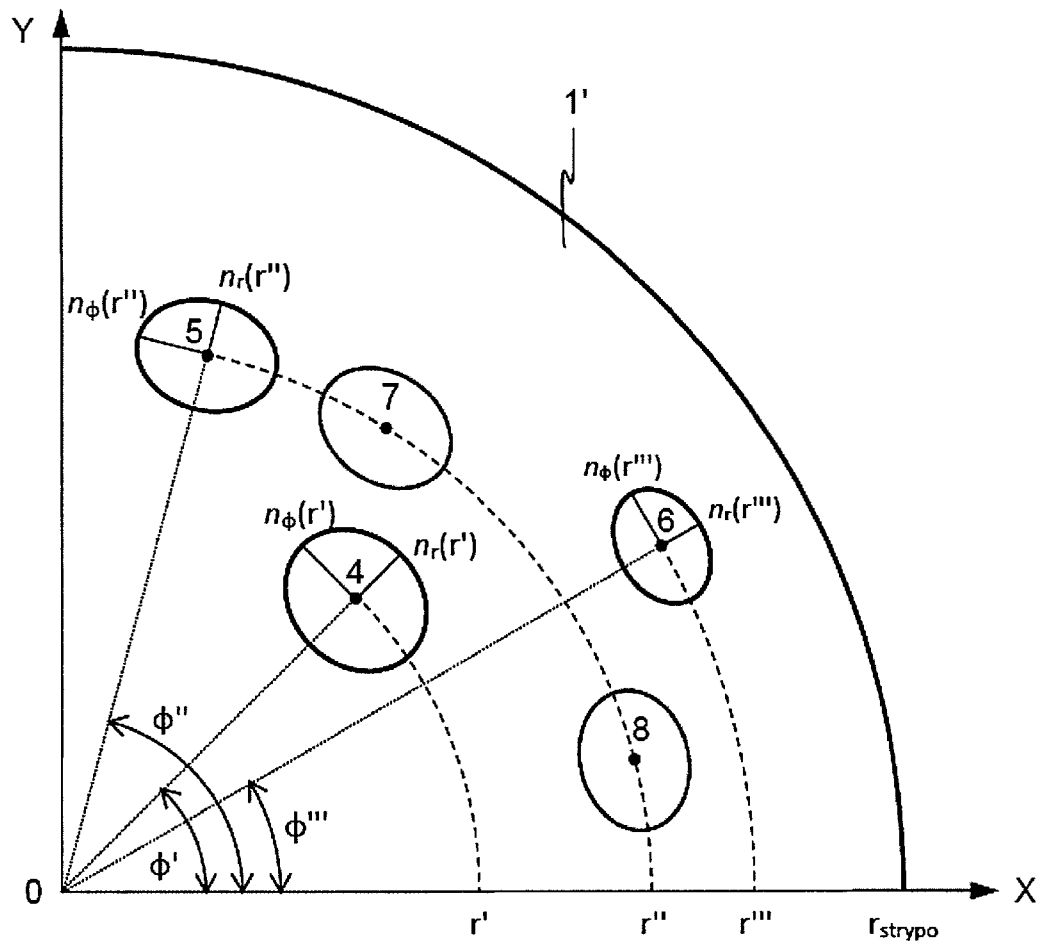
11. Depoliarizacijos kompensatoriaus pagal bet kurį iš 1–7 punktų panaudojimas lazerinėje sistemoje, apimančioje bent vieną vieno praėjimo arba dviejų praėjimų stiprintuvą.



Pav. 1A

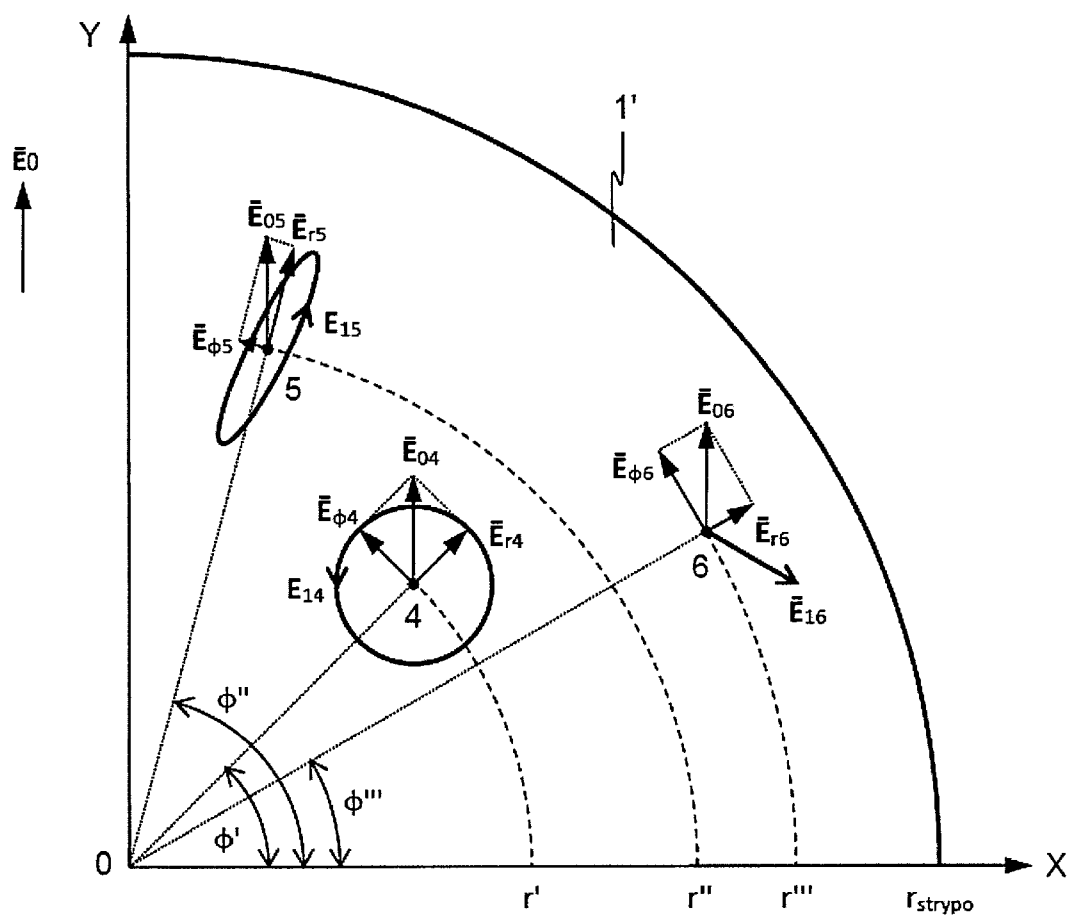


Pav. 1B

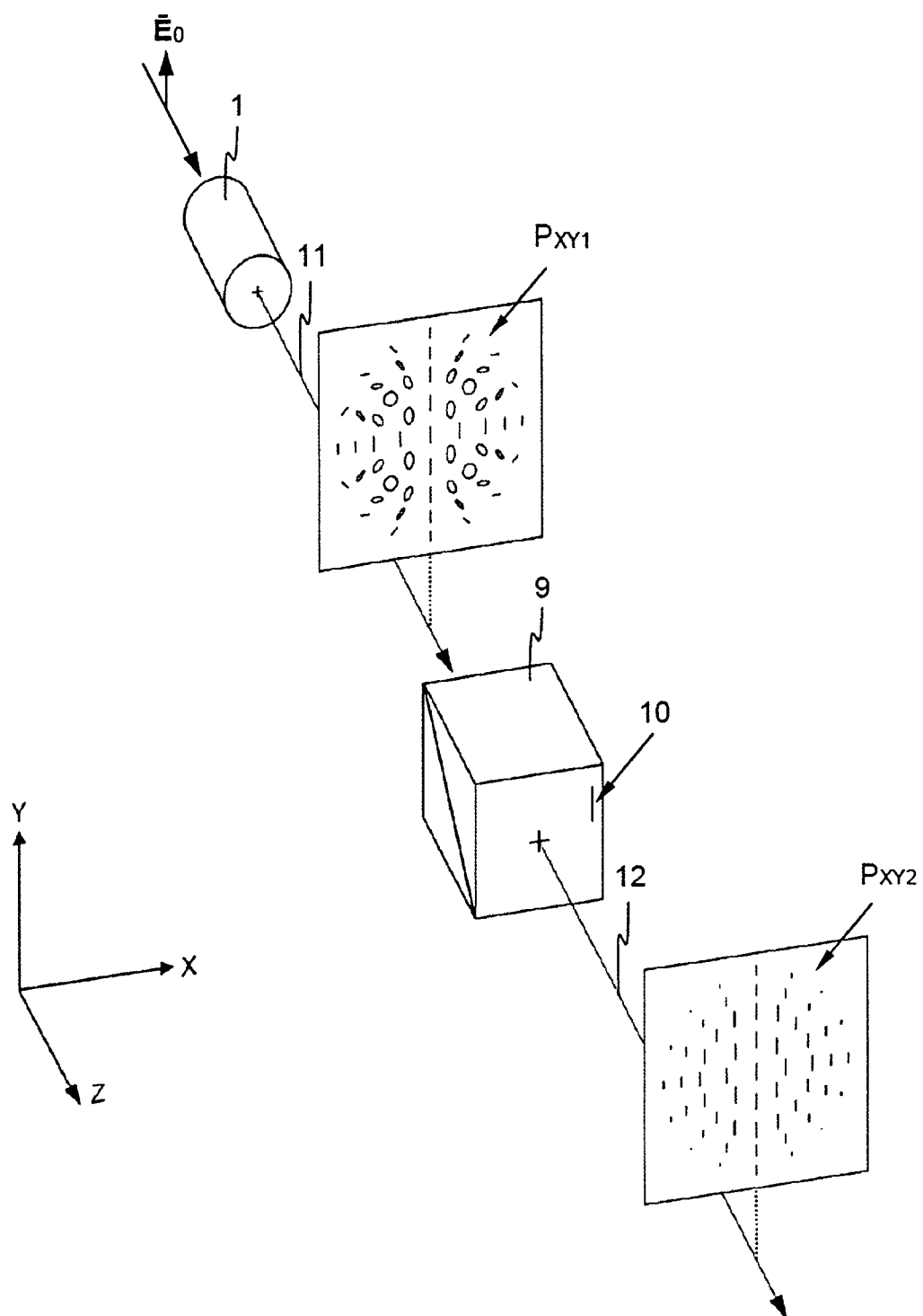


Рав. 1С

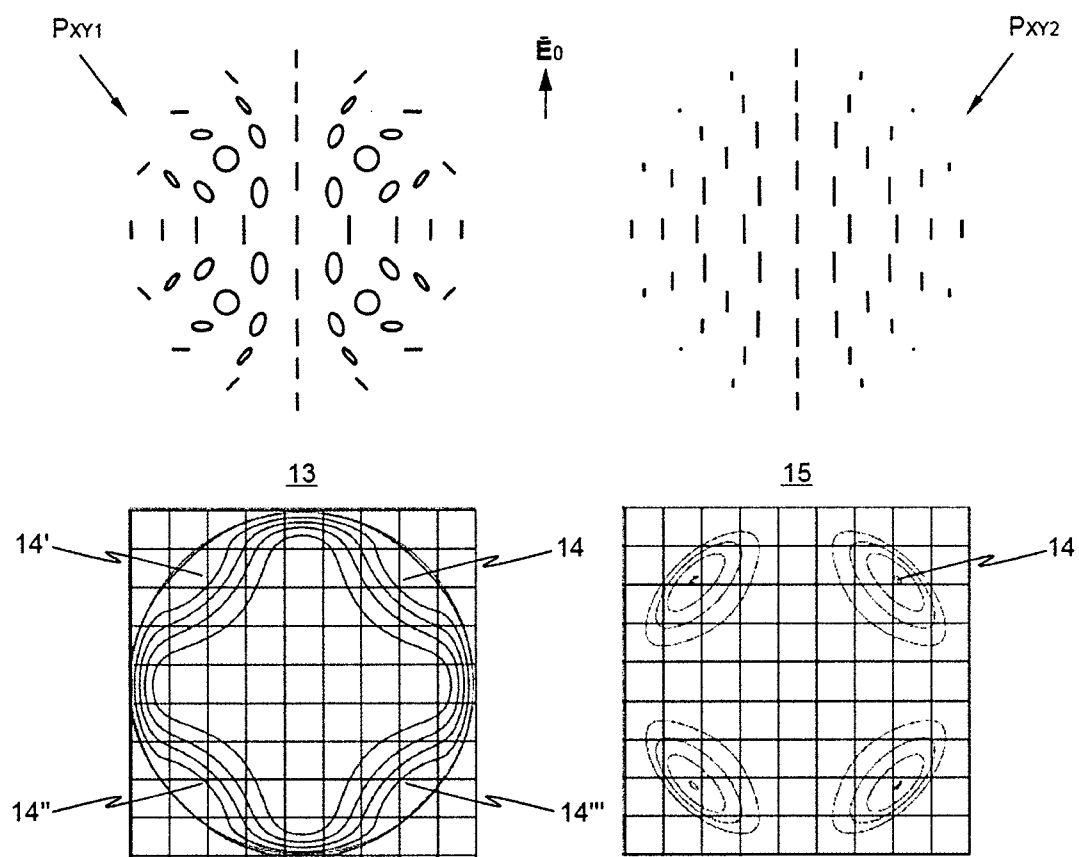




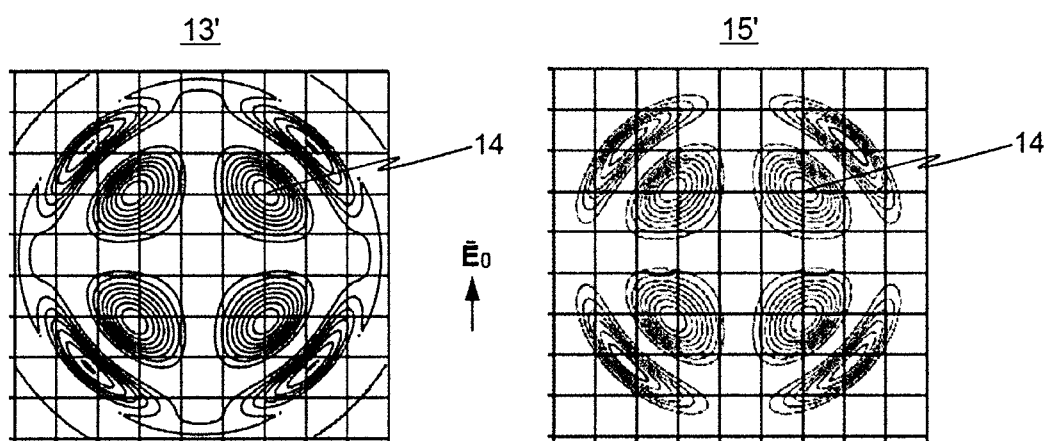
Pav. 1D



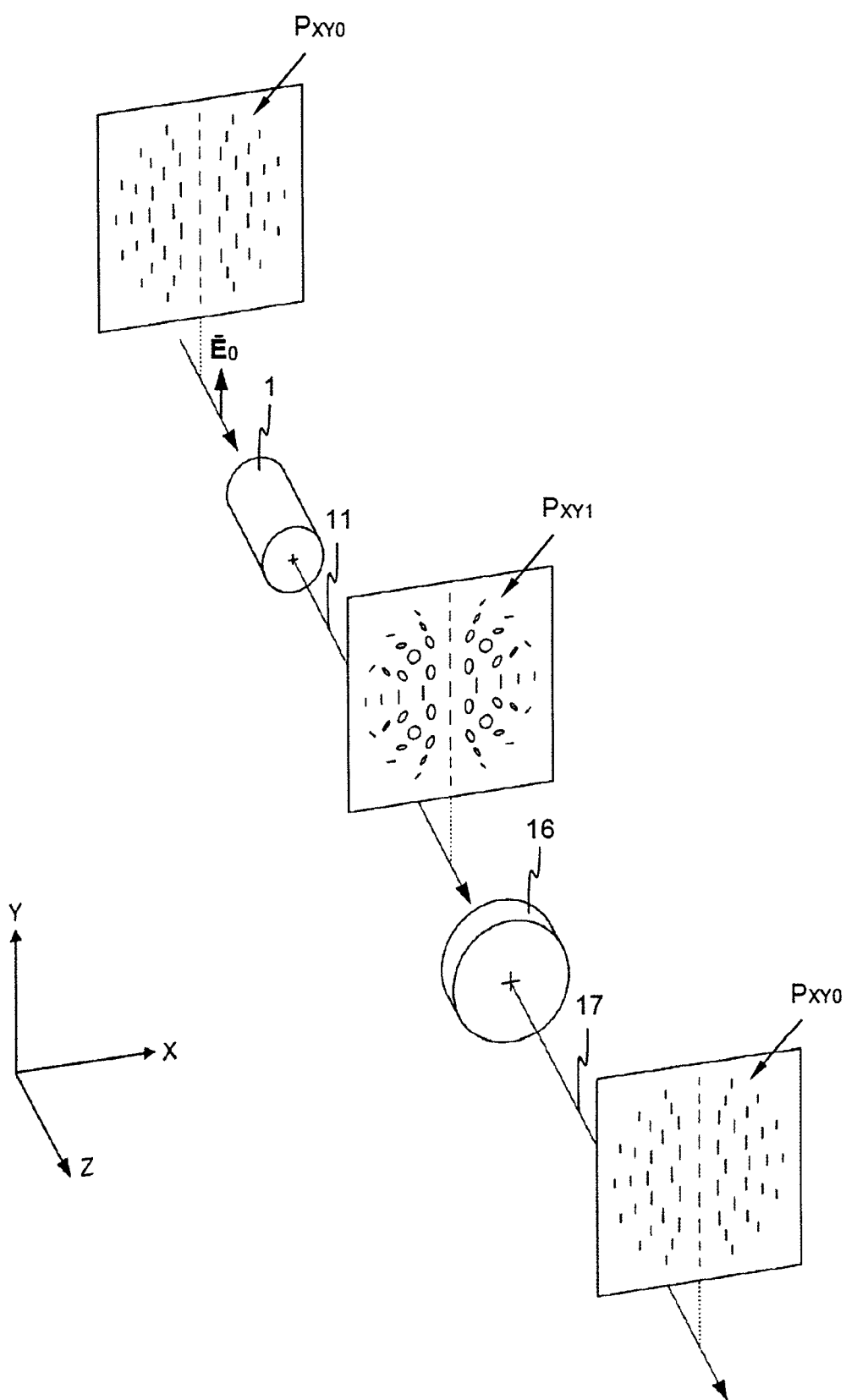
Pav. 2



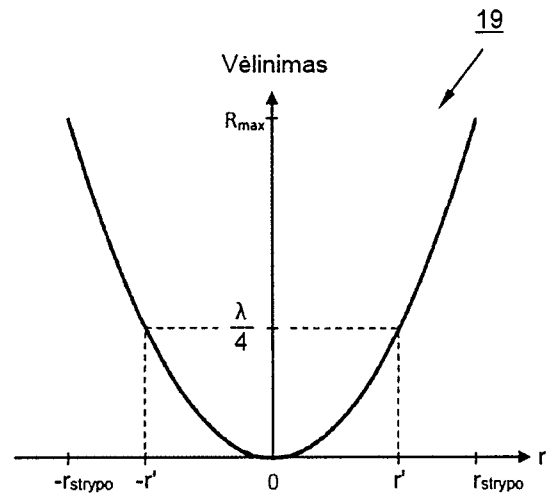
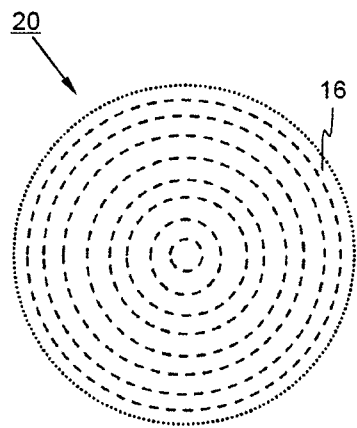
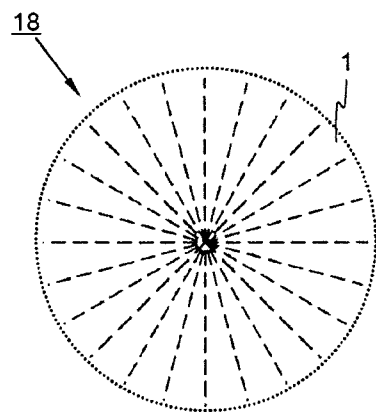
Pav. 3



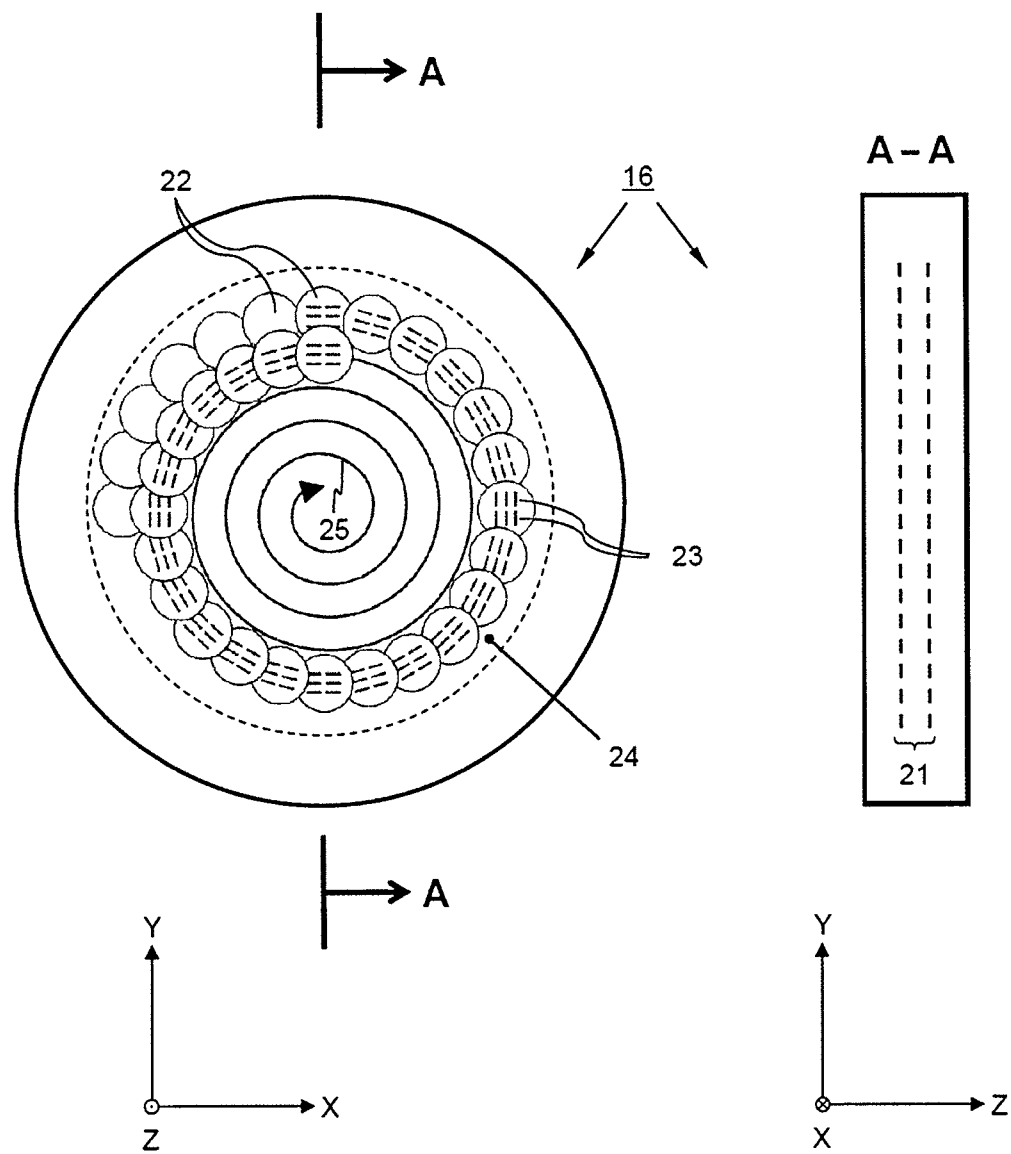
Pav. 4

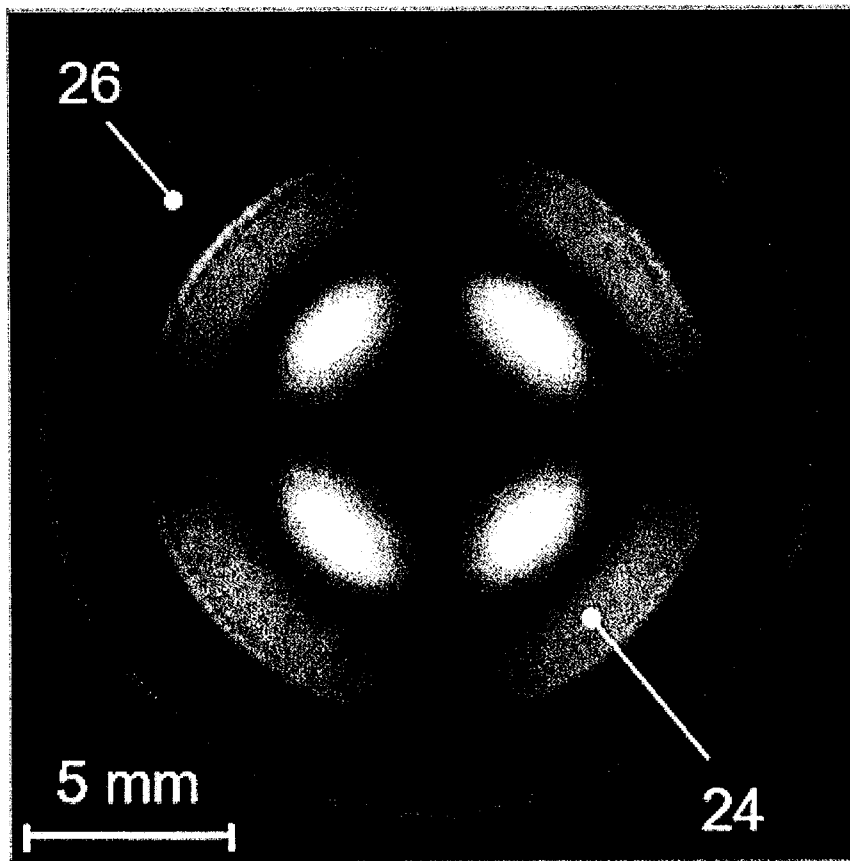


Pav. 5

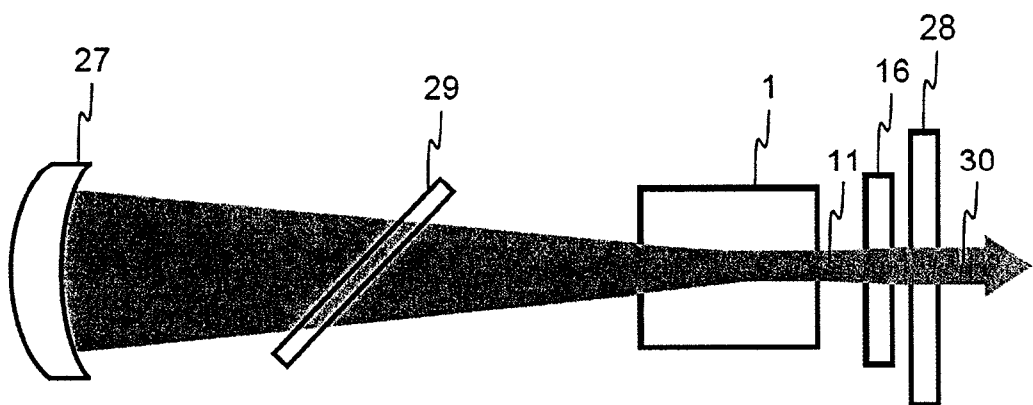


Pav. 6

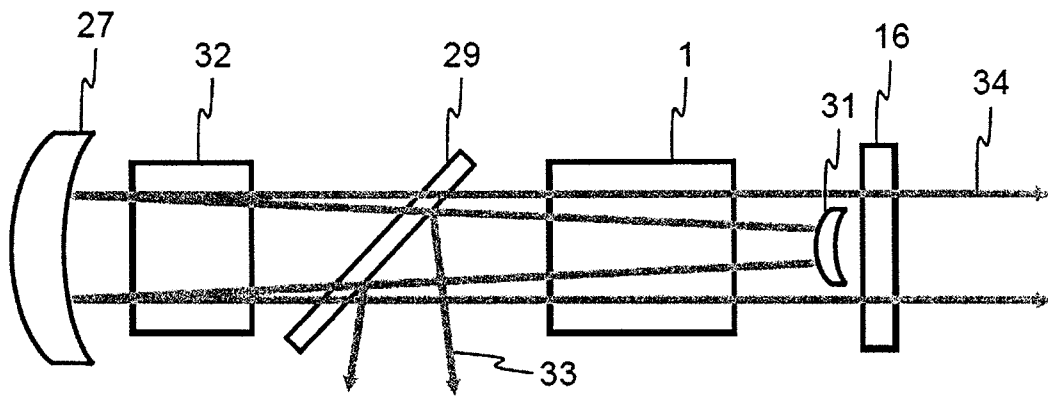




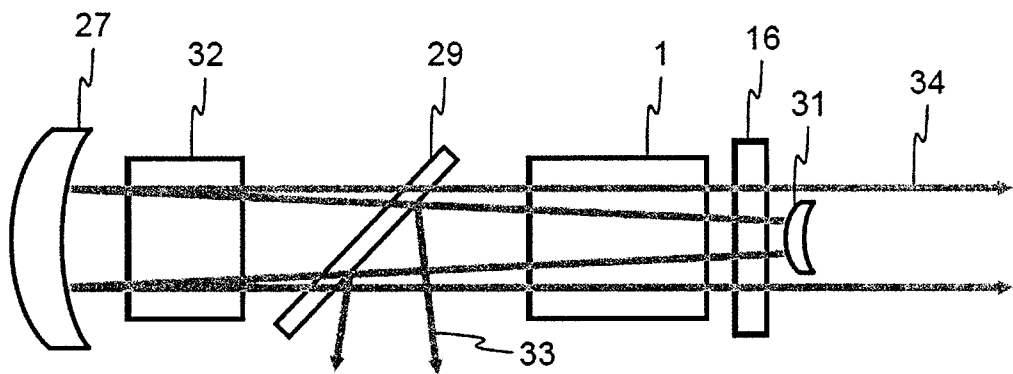
Pav. 8



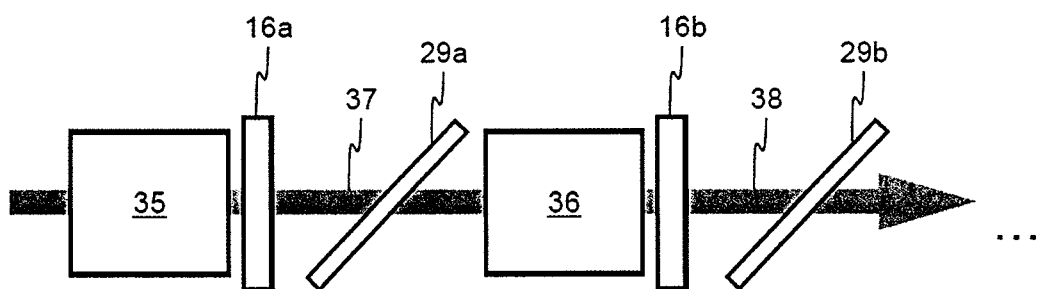
Pav. 9



Pav. 10



Pav. 11



Pav. 12