

(12) PATENTO APRAŠYMAS

(21) Paraiškos numeris: 2022 521
(22) Paraiškos padavimo data: 2022-05-20
(41) Paraiškos paskelbimo data: 2023-11-27
(45) Patento paskelbimo data: 2024-01-10

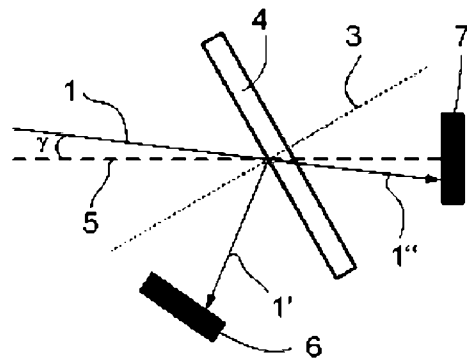
(73) Patento savininkas:
Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras, Savanorių pr. 231, LT-02300 Vilnius, LT
(72) Išradėjas:
Julijanas ŽELUDEVIČIUS, LT
Giedrius DUBOSAS, LT
(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:
Virgina Adolfina DRAUGELIENĖ, 8, UAB TARPINĖ, A.P.Kavoliuko g. 24-152, LT-04328 Vilnius, LT

LT 7041 B

(54) Pavadinimas:
Detektavimo įrenginys, sistema ir būdas, skirti optinio pluošto kritimo kampui nustatyti

(57) Referatas:

Išradimas priklauso optinių technologijų bei telekomunikacinių technologijų sritims ir yra skirtas optinio pluošto krypties nustatymui laisvos erdvės optinio duomenų perdavimo sistemose. Išradimas remiasi interferencinių optinių filtrų (IOF) savybe, kad jų pralaidumas ir atspindys užduoto optinio spektro pluoštui priklauso nuo pluošto kampo atžvilgiu IOF paviršiaus statmens. Pagal pasiūlytą būdą, yra naudojamas bent vienas IOF, kuris yra pasuktas iš anksto užduotu kampu atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies. Detektavimo įrenginio realizacijoje su vienu IOF (4) yra naudojami du optinės galios detektoriai (6, 7) matuojantys atspindėto nuo IOF (1') ir praėjusio IOF (1'') pluoštų optines galias. Remiantis šiais matavimais, nustatomas pluošto kampas atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies (5) vienoje plokštumoje. Pluošto kampo nustatymui kitoje (statmenoje) plokštumoje, naudojamas antras kampo nustatymo įrenginys, kurios IOF yra pasuktas statmenoje plokštumoje. Atlikus pluošto kampų nustatymą abiejuose tarpusavyje statmenose plokštumose yra gaunama pilna informacija apie pluošto kryptį atžvilgiu detektavimo sistemos optinės ašies.



2 pav.

TECHNIKOS SRITIS

Išradimas priklauso optinių technologijų bei telekomunikacinių technologijų sritims ir yra skirtas optinio pluošto kritimo kampui nustatyti laisvos erdvės optinio duomenų perdavimo sistemose. Optinio pluošto kritimo kampo nustatymas yra reikalingas tokiose sistemose optimaliam siųstuvo ir imtuvo nukreipimui vienas į kitą, užtikrinant optinio signalo patekimą į imtuvo detektorius ir duomenų perdavimą.

TECHNIKOS LYGIS

Taikant optinį duomenų perdavimą laisva erdve, imtuvą pasiekia išplitęs erdvėje optinis pluoštas. Dalis šio pluošto persikloja su imtuvo optine apertūra, yra surenkama optinės sistemos ir nukreipiama link optinei spinduliuotei jautraus imtuvo detektoriaus (paprastai fotodiodo). Tačiau sparčių detektorių (kurių dažnių juosta yra 1 GHz ir daugiau) aktyvios srities diametras paprastai yra labai mažas ($<100\ \mu\text{m}$), todėl į detektorius gali patekti tik pluoštas krentantis į imtuvo apertūrą tam tikrais ribotais kampais (pluošto kryptį pilnai apibrėžia du kampai gulintys tarpusavyje statmenose plokštumose). Tam, kad imtuvas galėtų pakoreguoti savo nukreipimo kampus pagal ateinančios spinduliuotės kryptį, reikalinga yra sistema, kuri nustato ateinančio pluošto kryptį arba kampus atžvilgiu detektavimo sistemos optinės ašies. Šiai užduočiai atlikti yra naudojami keli žinomi būdai, kurie turi tam tikrų trūkumų.

Plačiausiai naudojamas būdas realizuojamas naudojant lęšį ir CCD arba CMOS technologijos matricinį optinės spinduliuotės sensorių, sudarytą iš šviesai jautrių elementų masyvo. Toks būdas leidžia vienareikšmiai nustatyti pluošto kryptį (kampus abiejose plokštumose), kadangi vienu metu registruojami yra signalai atitinkantys visą krypčių matymo lauką. Tokiu principu veikiantis žinomas įrenginys yra aprašytas Japonijos patento paraiškoje JPH10176910A, 1998. Tačiau šis metodas turi nemažai trūkumų. Matriciniai sensoriai yra sudėtingi įrenginiai, veikiantys tik tam tikrose spektriniuose ruožuose. Si technologijos sensoriai – nuo 300 nm iki 1100 nm, InGaAs technologijos sensoriai – nuo 950 nm iki 2550 nm. Kitas šio metodo trūkumas yra tokių sensorių lėtas atsakas (paprastai 100–300 Hz, priklauso nuo aktyvių elementų kiekio) ir labai dideli informacijos kiekiai, kuriuos reikia apdoroti tam, kad galėtų būti nustatyta pluošto kryptis. Visa tai lemia tokių sistemų sudėtingumą, didelį energijos suvartojimą ir tuo pačiu nemažą šilumos išsiskyrimą.

Kitas žinomas būdas yra naudojant lęšį ir „šoninio efekto“ fotodiodą (angl. *lateral effect photodiode*). Tokie fotodiodai turi vieną bendrą kontaktą (katodą) ir du arba tris atskirus išvadus (anodus). Fotodiodai turintys du anodus leidžia nustatyti pluošto padėtį išilgai vienos koordinačių ašies, o turintys keturis anodus – pluošto padėtį plokštumoje. Fotodiodo generuojama fotosrovė priklauso nuo padėties kur pataiko optinis pluoštas: kuo labiau pluoštas pasislenka link vieno krašto, tuo didesnė srovė registruojama šį kraštą atitinkančiame išvade. Tokiu būdu, matuojant srovės skirtumus tarp visų išvadų, gali būti nustatyta pluošto padėtis fotodiodo aktyvios srities atžvilgiu. Tokiu principu veikiantis žinomas įrenginys su dviejų anodo išvadų fotodiodu yra aprašytas Kanados patento paraiškoje CA2016685A1, 1991. Naudojant tokius fotodiodus pluošto krypties nustatymas nepriklauso nuo pluošto optinės galios (viršijus minimalų lygį) ir pluošto intensyvumo pasiskirstymo. Tačiau pagrindinis tokio metodo trūkumas yra tai, kad tokie fotodiodai yra pakankamai sudėtingi įrenginiai ir gaminami pritaikyti tik tam tikram spektriniam ruožui. Remiantis turimais duomenimis, šiuo metu gaminami yra tik detektoriai veikiantys spektro ruože nuo 300 nm iki 1100 nm.

Kitas žinomas būdas yra naudojant lęšį arba apertūrą ir segmentuotą fotodiodą. Nustatant pluošto kampus dviejose plokštumose naudojami yra 4 segmentų fotodiodai dar vadinami „quad“ detektoriais. Tokį detektorių sudaro 4 nepriklausomos aktyvios sritys. Į detektorių krentantis pluoštas turi būti tam tikrų optimalių matmenų, kad iš dalies persiklotų su kiekvienu segmentu. Tam pasiekti yra naudojama optinė sistema, kurią sudaro lęšiai ir (arba) optinės apertūros. Matuojami yra kiekvieno segmento generuojamos fotosrovės signalai, proporcingi optinei galiai. Priklausomai nuo pluošto padėties šių segmentų atžvilgiu, keičiasi segmentų generuojamų signalų lygiai ir pagal tai gali būti nustatyta pluošto padėtis. Tokiu principu veikiantis žinomas įrenginys, kuriame naudojamas lęšis yra aprašytas Prancūzijos patente FR2420144B1, 1982. Kitas žinomas įrenginys, kuriame naudojama apertūra, yra aprašytas JAV patento paraiškoje US4946277A, 1990. Šio būdo trūkumas yra tas, kad segmentuoti fotodiodai yra gaminami naudojant Si ir InGaAs puslaidininkių technologijas, todėl jų veikimo spektrinis ruožas yra ribotas. Prieinami yra detektoriai optimizuoti spektriniam ruožams nuo 300 nm iki 1100 nm, bei nuo 900 nm iki 1700 nm. Kitas šio metodo trūkumas yra tai, kad tokių detektorių atsakas (signalas) priklauso nuo pluošto kampų) priklauso dar ir nuo pluošto intensyvumo pasiskirstymo. Sklindant optiniam pluoštui per atmosferą dideliais atstumais, jis yra

iškraipomas turbulencijų, todėl imtuvą pasiekiantis intensyvumo pasiskirstymas gali stipriai skirtis nuo Gausinio ir kisti laike, o tai įneša krypties nustatymo paklaidas naudojant 4 segmentų detektorius.

Artimiausias pagal techninę paskirtį ir išpildymą yra detektavimo įrenginys, skirtas optinio pluošto kritimo kampui nustatyti, aprašytas Didžiosios Britanijos patento paraiškoje GB0521253D0, 2005. Žinomas įrenginys apima du optinės galios detektorius ir optinį elementą, pasižymintį nuo optinio pluošto kritimo kampo priklausančiu optiniu pralaidumu, įtaisytą prieš bent vieną iš optinių detektorių. Kaip minėtas optinis elementas, kurio pralaidumas priklauso nuo pluošto kritimo kampo, gali būti naudojamas ir interferencinis optinis filtras (IOF), kurio spektrinis atsakas pasikeičia priklausomai nuo pluošto kritimo kampo. Detektuojant optinio pluošto, kurio spektras yra užduotas ir pastovus, kampą yra registruojamos abiejų detektorių išmatuotos optinės galios vertės ir pagal verčių palyginimą nustatomas pluošto kritimo kampas atžvilgiu IOF statmens.

Minėto išradimo aprašyme aprašytas detektavimo būdas, skirtas optinio pluošto kritimo kampui nustatyti, kai optinio pluošto spektras yra iš anksto užduotas ir pastovus. Žinomas būdas apima optinio pluošto nukreipimą į detektavimo įrenginio interferencinį optinį filtrą (IOF), kurio optinis pralaidumas priklauso nuo optinio pluošto kritimo kampo į IOF ir optinio pluošto kritimo kampo nustatymą pagal praėjusio pro IOF optinio pluošto ir nepraėjusio pro IOF optinio pluošto optinių galių palyginimą.

Žinomas detektavimo įrenginys ir detektavimo būdas turi šiuos trūkumus. Pirma, kadangi optinis elementas nėra orientuojamas tam tikru kampu, vienodą detektuojamo kampo vertę atitinka pluošto krypčių visuma atitinkantį vienodą kampą atžvilgiu interferencinio optinio filtro paviršiaus statmens. Toliajame lauke tai atitiktų krypčių „žiedą“. Kitaip tariant, žinomas įrenginys ir detektavimo būdas leidžia nustatyti kokių kampu pluoštas yra nukrypęs nuo interferencinio optinio filtro paviršiaus statmens, bet nesuteikia informacijos kuria kryptimi yra nukrypęs pluoštas, todėl optinio pluošto kritimo kampo nustatymas žinomu detektavimo įrenginiu ir būdu nėra tikslus. Kitas šio metodo trūkumas yra tai, kad matuojama yra tik praeinančio per optinį elementą pluošto galia. Interferenciniai optiniai filtrai pasižymi tuo, kad pluošto dalis, kuri nepraeina per IOF yra nuo jo atspindima. Žinomame detektavimo įrenginyje ir būde ši spinduliuotė nėra nekaip panaudojama, o tai nėra optimalu ir apriboja taikymo galimybes.

Sprendžiama techninė problema

Išradimu siekiama padidinti optinio pluošto kritimo kampo nustatymo tikslumą ir praplėsti taikymo galimybes.

IŠRADIMO ESMĖS ATSKLEIDIMAS

Uždavinio sprendimo esmė pagal pasiūlytą išradimą yra ta, kad detektavimo įrenginyje, skirtame optinio pluošto kritimo kampui nustatyti, kai minėto optinio pluošto spektras yra iš anksto užduotas ir pastovus, apimančiame bent du optinės galios detektorius, bent vieną interferencinį optinį filtrą (IOF), išdėstytą optinio pluošto kelyje, kur nuo optinio pluošto kritimo kampo į IOF paviršių priklauso jo optinis pralaidumas ir atspindys nuo IOF, o pagal gautus optinio pluošto galios palyginimus nustatomas optinio pluošto kritimo kampas, atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies, kur minėtas (-i) interferencinis (-iai) filtras (-ai) IOF yra pasuktas (-ti) iš anksto nustatytu kampu atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies detektavimo plokštumoje, kurioje išdėstyta detektavimo įrenginio optinė ašis ir statmuo IOF paviršiui, o optinio pluošto kritimo kampas nustatomas pagal optinio pluošto (-ų), praėjusio (-ių) per IOF ir (arba) atsispindėjusio (-ių) nuo IOF paviršiaus (-ių) optinių galingumų palyginimą.

Detektavimo įrenginys turi vieną IOF, pasuktą iš anksto užduotu kampu detektavimo plokštumoje atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies, ir du detektorius, kur pirmasis detektorius yra išdėstytas atsispindėjusio nuo IOF paviršiaus optinio pluošto kelyje ir matuoja atspindėto nuo IOF pluošto optinę galią P1, o antrasis detektorius, išdėstytas praėjusio per IOF optinio pluošto kelyje ir matuoja praėjusio per IOF pluošto optinę galią P2.

Detektavimo įrenginys turi du IOF, išdėstytus nuosekliai vienas prieš kitą ir pasuktus iš anksto užduotais kampais minėtoje detektavimo plokštumoje atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies, kur pirmasis detektorius yra išdėstytas atsispindėjusio nuo pirmojo IOF paviršiaus optinio pluošto kelyje, o antrasis detektorius yra išdėstytas atsispindėjusio nuo antrojo IOF optinio pluošto kelyje arba praėjusio per antrąjį IOF optinio pluošto kelyje.

Pirmasis IOF ir antrasis IOF yra pasukti vienodais kampais į priešingas puses, kur pirmasis detektorius matuoja atspindėto nuo pirmojo IOF pluošto optinę galią P1, o antrasis detektorius matuoja atspindėto nuo antrojo IOF pluošto optinę galią P2.

Pirmasis IOF ir antrasis IOF yra pasukti vienodais kampais į tą pačią pusę, kur pirmasis detektorius matuoja atspindėto nuo pirmojo IOF pluošto optinę galią P1, o antrasis detektorius matuoja praėjusio pro antrojo IOF pluošto optinę galią P2.

Minėtas optinio pluošto kritimo kampas atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies yra nustatomas optinių galingumų santykiu $(P1-P2)/(P1+P2)$, kur P1 yra atspindėjusio nuo pirmojo IOF pluošto optinis galingumas, o P2 yra praėjusio per pirmąjį IOF pluošto optinis galingumas arba P2 yra praėjusio per antrąjį IOF arba atspindėjusio nuo antrojo IOF pluošto optinis galingumas.

Sistema, skirta optinio pluošto kritimo kampams dviejose plokštumose nustatyti, apimanti du detektavimo įrenginius pagal 2 punktą, kurie orientuoti tarpusavyje statmenose plokštumose, kur optinis pluoštas, kurio kryptis nustatoma, pluošto dalikliu yra padalinamas į dvi dalis, kurio pirmoji dalis yra nukreipiama į pirmąjį detektavimo įrenginį pagal 2 punktą, kurio IOF yra pasuktas XY plokštumoje, ir kuris nustato pluošto kampą XY plokštumoje, o antroji optinio pluošto dalis pluošto dalikliu nukreipiama į antrąjį detektavimo įrenginį pagal 2 punktą, kurio filtras yra pasuktas XZ plokštumoje, ir kuri nustato pluošto kampą XZ plokštumoje.

Sistema, skirta optinio pluošto kritimo kampams dviejose plokštumose nustatyti, apimanti du detektavimo įrenginius pagal bet kurį iš 3–6 punktų, kurie orientuoti tarpusavyje statmenose plokštumose, kur optinis pluoštas, kurio kryptis yra nustatoma, iš pradžių patenka į pirmąjį detektavimo įrenginį pagal bet kurį iš 3–6 punktų, kurio IOF yra pasukti XY plokštumoje, ir kuris nustato pluošto kampą XY plokštumoje, o optinis pluoštas praėjęs pirmąjį detektavimo įrenginį patenka į antrąjį detektavimo įrenginį pagal bet kurį iš 3–6 punktų, kurio IOF yra pasukti XZ plokštumoje, ir kuris nustato pluošto kampą XZ plokštumoje.

Numatyta $\lambda/4$ banginė plokštelė (9), skirta apskritimiškai poliarizuotam pluoštui konvertuoti į tiesiškai poliarizuotą, kuris patenka į pirmąjį IOF (4).

Numatytas papildomas stabilus spektro lazerinis šaltinis, skirtas optinės galios detektoriams sukalibruoti, kurio pluoštas nukreiptas į pirmąjį IOF per pluošto daliklį.

Detektavimo būdas, skirtas optinio pluošto kritimo kampui nustatyti, kai optinio pluošto spektras yra iš anksto užduotas ir pastovus, apimantis:

- optinio pluošto nukreipimą į detektavimo įrenginio bent vieną interferencinį optinį

filtrą (IOF), kurio optinis pralaidumas ir atspindys nuo IOF priklauso nuo optinio pluošto kritimo kampo į IOF,

- optinio pluošto kritimo kampo atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies nustatymą pagal gautus optinio pluošto praėjusio pro IOF optinių galingumų palyginimus, kur minėtas (-i) IOF į kurį (-iuos) yra nukreipiamas optinis pluoštas yra pasuktas (-i) iš anksto nustatytu kampu atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies detektavimo plokštumoje, kurioje išdėstyta detektavimo įrenginio optinė ašis ir statmuo IOF paviršiui, o optinio pluošto kryptis nustatoma pagal optinio pluošto (-ų), praėjusio (-ių) per IOF ir (arba) atsispindėjusio (-ių) nuo IOF paviršiaus (-ių) optinių galingumų palyginimą.

Išradimo naudingumas

Pasiūlyto detektavimo įrenginio ir būdo pranašumas, lyginant su artimiausiu pagal techninę paskirtį ir konstrukciją analogu, yra tas, kad gaunamas žymiai didesnis kampo nustatymo tikslumas dėl to, kad IOF yra pasukti tam tikru kampu atžvilgiu detektavimo įrenginio (sistemos) optinės ašies, kas leidžia vienareikšmiškai nustatyti pluošto kampą atžvilgiu detektavimo įrenginio (sistemos) optinės ašies vienoje plokštumoje. Naudojant sistemą su dviem detektavimo įrenginiais su IOF pasuktais dviejose tarpusavyje statmenose detektavimo plokštumose, gali būti vienareikšmiškai nustatoma pilna informacija apie pluošto kryptį. Papildomas pasiūlyto būdo pranašumas yra tai, kad detektuojamas yra ir nuo IOF atsispindėjęs pluoštas, kas būdo realizacijoje su dviem filtrais leidžia naudingai panaudoti praėjusį pluoštą ir nukreipti jį į imtuvą duomenų priėmimui, o dėl to įrenginio sandara yra optimalesnė ir turi platesnes pritaikymo galimybes.

TRUMPAS BRĖŽINIŲ APRAŠYMAS

Išradimas detaliau paaiškinamas brėžiniais, kurie neapriboja išradimo apimties, ir kuriose pavaizduota:

1a pav. pavaizduotas interferencinis optinis filtras (IOF) ir du optiniai pluoštai, krentantys į IOF paviršių skirtingais kampais bei pro IOF praėję ir nuo jo atsispindėję optiniai pluoštai.

1b pav. pavaizduotas IOF spektrinis atsakas krentantiems optiniams

pluoštams pagal 1 pav.

2 pav. pavaizduotas detektavimo įrenginys su vienu IOF, pasuktu fiksuotu kampu atžvilgiu įrenginio optinės ašies, ir dviem detektoriais.

3 pav. pavaizduotas detektavimo įrenginys su dviem IOF, pasuktais vienodais kampais į priešingas puses atžvilgiu įrenginio optinės ašies, ir dviem detektoriais, išdėstytais atsispindėjusių nuo skirtingų IOF optinių pluoštų atitinkamuose keliuose.

4 pav. pavaizduota eksperimentiškai išmatuota optinio pluošto kampo nustatymo atsako priklausomybė nuo pluošto kampo atžvilgiu detektavimo sistemos optinės ašies, kampo nustatymo sistemos realizacijai su dviem IOF (kuri pavaizduota 3 pav).

5 pav. pavaizduotas optinio pluošto, kuris buvo naudojamas kampo nustatymo eksperimentui, bangos ilgių spektras.

6 pav. pavaizduota interferencinio optinio filtro, kuris buvo naudojamas kampo nustatymo eksperimentui, spektrinis atsakas esant 0° pluošto kritimo į IOF kampui.

7 pav. pavaizduotas detektavimo įrenginys pagal 3 pav su papildomai numatyta $\lambda/4$ bazine plokšte poliarizacijos suderinimui.

8 pav. pavaizduotas detektavimo įrenginys pagal 3 pav su papildomu pluošto dalikliu ir lazeriniu šaltiniu, kurie yra skirti fotodiodų atsako kalibracijai.

9 pav. pavaizduota sistemos, skirtos pluošto kampų, atžvilgiu detektavimo sistemos optinės ašies nustatymo dviejose plokštumose realizacija, kuri susideda iš dviejų, nuosekliai išdėstytų ir orientuotų tarpusavyje statmenose plokštumose detektavimo įrenginių pagal 3 pav.

IŠRADIMO REALIZAVIMO PAVYZDŽIAI

1a pav. pavaizduoti du optiniai pluoštai 1 ir 2, kurie sklinda skirtingais kampais α , ir β atžvilgiu statmens 3 optiniam filtrui (IOF) 4. Šiame brėžinyje taip pat pavaizduoti pluošto 1 atsispindėjęs nuo IOF 4 pluoštas 1' ir praėjęs per IOF 4 pluoštas 1'', bei pluošto 2 atsispindėjęs nuo IOF 4 pluoštas 2' ir praėjęs per IOF 4 pluoštas 2''.

2 pav. pavaizduota optinio pluošto 1 kritimo kampo γ atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies 5 nustatymo realizacija vienoje plokštumoje, kurioje išdėstyta

įrenginio optinė ašis 5 ir statmuo 3 IOF paviršiui, naudojant vieną interferencinį optinį filtrą 4, kur IOF 4 yra pasuktas kampu atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies 5, ir kur nuo IOF 4 atsispindėjęs optinis pluoštas 1' patenka į optinės galios detektorių 6, o per IOF 4 praėjęs optinis pluoštas 1'' patenka į optinės galios detektorių 7.

3 pav. – pavaizduota optinio pluošto 1 kritimo kampo γ , atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies 5, nustatymo realizacija vienoje plokštumoje, kurioje išdėstyta įrenginio optinė ašis 5 ir statmuo 3 IOF paviršiui, naudojant du interferencinius optinius filtrus 4 ir 4b, pasuktas kampu atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies 5. Nuo IOF 4 atsispindėjęs pluoštas 1' patenka į detektorių 6, o praėjęs optinis pluoštas 1'' patenka į antrąjį IOF 4b ir nuo jo atsispindėjęs optinis pluoštas 1b' patenka į detektorių 7. Numatytas imtuvo detektorius 8, kuris gali būti montuojamas iškart po IOF 4b, optinės ašies 5 kelyje.

7 pav. pavaizduota pluošto kampo, atžvilgiu detektavimo sistemos optinės ašies 5, nustatymo vienoje plokštumoje realizacija naudojant du interferencinius optinius filtrus pagal 3 pav., ir $\lambda/4$ banginę plokštelę 9 poliarizacijos suderinimui.

8 pav. pavaizduota pluošto kampo, atžvilgiu detektavimo sistemos optinės ašies 5, nustatymo vienoje plokštumoje sistemos realizacija naudojant du interferencinius optinius filtrus pagal 3 pav. su papildomu stabilaus spektro lazeriniu šaltiniu 10, skirtu optinės galios detektoriams 6 ir 7 sukalibruoti t.y. IOF atsako kalibracijai optinis pluoštas iš lazerinio šaltinio 10 yra nukreiptas į pirmąjį IOF 4, per pluošto daliklį 11.

9 pav. pavaizduota sistema, skirta optinio pluošto kritimo kampams dviejose plokštumose nustatyti, apimanti du detektavimo įrenginius pagal 3 pav., kurie orientuoti tarpusavyje statmenose plokštumose, kur optinis pluoštas, kurio kryptis yra nustatoma, iš pradžių patenka į pirmąjį detektavimo įrenginį pagal 3 pav., kurio IOF yra pasukti XY plokštumoje, ir kuris nustato pluošto kampą XY plokštumoje, o optinis pluoštas praėjęs pirmąjį detektavimo įrenginį patenka į antrąjį detektavimo įrenginį pagal 3 pav., kurio IOF yra pasukti XZ plokštumoje, ir kuris nustato pluošto kampą XZ plokštumoje.

Veikimo principas

Pasiūlytas išradimas remiasi interferencinių optinių filtrų (IOF) savybe, kad IOF

spektrinis atsakas priklauso nuo pluošto kampo atžvilgiu filtro paviršiaus statmens. Išradimo įgyvendinimui yra reikalingi IOF pasižymintys tiesine arba artima tiesinei atspindžio (ir pralaidumo) priklausomybe nuo bangos ilgio – spektriniu šlaitu. Naudojant terminą interferencinis optinis filtras (IOF), turima omeny IOF turintį bent vieną spektrinį šlaitą. Tokie IOF yra sudaryti iš daugelio plonų sluoksnių, kurių storiai yra optimizuoti taip, kad tam tikrų bangos ilgių spinduliuotė patirtų konstruktyvią arba destruktivią interferenciją ir būtų atspindima arba praleidžiama filtro. Įprastai IOF yra naudojami lazerinėse sistemose kaip dichroiniai veidrodžiai, leidžiantys padalinti arba apjungti optinius pluoštus pagal jų spektrines komponentes. Pakitus spinduliuotės kritimo kampui į IOF paviršių, sluoksnių efektyvūs storiai, per kuriuos praeina spinduliuotė, pakinta, o tai lemia spektrinių charakteristikų tam tikrą pokytį. Praktiškai tai lemia, kad didinant kritimo kampą (t.y. kampą tarp krentančio pluošto ir IOF paviršiaus statmens), IOF atsakas pasislenka bangos ilgių skalėje link trumpesnių bangų. Šlaitiniam IOF praleidžiančiam ilgąsias bangas, tai iliustruota 1 pav. Iliustracijoje 1a pav. yra pavaizduoti atvejai kai į filtro 4 paviršių pluoštas 1 krenta kampu α , o pluoštas 2 – kampu β , kai kampai yra tokie, kad $\alpha < \beta$. Priklausomai nuo spinduliuotės bangos ilgio, dalis pluošto gali atsispindėti (1' ir 2'), o kita dalis yra praleidžiama per IOF (1'' ir 2''). 1b pav. vaizduoja IOF pralaidumo spektrinį atsaką. Pluoštui 1, krentančiam kampu α , jo atsakas yra pažymėtas 21, o 50 % pralaidumo bangos ilgis yra λ_1 . Pluoštui 2, krentančiam kampu β , jo atsakas yra pažymėtas 22, o 50 % pralaidumo bangos ilgis yra λ_2 . Matome, kad $\lambda_1 > \lambda_2$, taigi IOF „šlaitas“ pasislenka bangos ilgių srityje.

Šiame išradime, minėta interferencinių optinių filtrų savybė yra panaudojama pluošto krypties nustatymui. Kadangi lazerinės spinduliuotės spektras gali būti tiksliai išmatuotas ir yra pastovus laike, nuo kampo priklausantis IOF spektrinio atsako pokytis gali būti konvertuotas į optinės galios pokytį, kuris gali būti išmatuotas naudojant bet kokius optinės spinduliuotės galios detektorius ir taip nustatytas pluošto kampo pokytis atžvilgiu IOF paviršiaus statmens.

Skirtingai nuo artimiausio žinomo analogo, šiame išradime siūlomas kampo nustatymo būdas naudojant IOF, pagal kurį vienas ar daugiau IOF yra pasukti iš anksto pasirinktu kampu atžvilgiu detektavimo sistemos optinės ašies. Detektavimo plokštumoje, kurioje yra išsidėstę sistemos optinė ašis ir IOF paviršiaus statmuo, yra nustatomas pluošto kampas atžvilgiu sistemos optinės ašies. Tuo tarpu pluošto

kampas plokštumoje statmenoje detektavimo plokštumai, beveik neturi įtakos matavimo rezultatams. Norint išmatuoti pluošto kampą statmenoje plokštumoje, gali būti naudojama antra vieno ar daugiau filtrų sistema, orientuota kitoje plokštumoje.

Tokiu būdu siūlomas metodas ir jo pagrindu sudaryta sistema suteikia pilną informaciją apie pluošto kryptį atžvilgiu detektavimo sistemos optinės ašies (kiek ir kokia kryptimi pluoštas nukrypęs nuo detektavimo sistemos optinės ašies).

Taip pat, skirtingai nuo artimiausio žinomo būdo, šiame išradime yra panaudojamas atsispindėjęs nuo IOF pluoštas. Tai leidžia išradimo realizacijoje su dviem filtrais naudingai panaudoti praėjusį pluoštą, pavyzdžiui nukreipiant jį į imtuvą duomenų priėmimui.

Išradimo įgyvendinimui užtenka, kad IOF spektrinis atsakas turėtų bent vieną šlaitą. Neturi didelės reikšmės ar tai būtų ilgąsias bangas praleidžiantis šlaitinis IOF, trumpąsias bangas praleidžiantis šlaitinis IOF, ar juostinis IOF. Tačiau svarbu yra tai, kad detektuojamo pluošto spektro centrinis bangos ilgis būtų toks ir IOF pasukimas suderintas taip, kad esant pluošto kritimo į IOF kampui atitinkančiam detektavimo sistemos optinę ašį (ir optimalų pataikymą į imtuvo detektorius), priimamo pluošto centrinis bangos ilgis atitiktų tam tikrą IOF spektrinio šlaito tašką. Optimaliausiu atveju, kai norima matuoti kritimo kampo pokytį tiek didėjimo, tiek mažėjimo kryptimis, tai turėtų būti IOF spektrinio šlaito vidurys. Taikant aprašytą būdą, priklausomai nuo lazerinio pluošto spektro pločio yra galimi du atspindžio (arba pralaidumo) priklausomybės nuo kampo atsako variantai:

- 1) Kai lazerinio pluošto spektro plotis yra daug mažesnis negu filtro spektrinio šlaito plotis. Šiuo atveju kampo nustatymo atsaką lemia tik filtro spektrinio šlaito charakteristikos (plotis).
- 2) Kai lazerinio pluošto spektro plotis yra palyginamas arba didesnis negu filtro spektrinio šlaito plotis. Šiuo atveju kampo nustatymo atsakui turi įtakos ir pačio lazerinio pluošto spektras ir jo forma.

Išradimo realizacijų iliustracijai yra laikoma, kad į pluošto kampo nustatymo įrenginį patenka beveik kolimuotas pluoštas, kurį suformuoja optinis teleskopas konvertuojantis didelio diametro pluoštą iš priimančios apertūros į vieno-kelių milimetrų diametro pluoštą. Tai yra įprasta sistemos konfigūracija priimant optinį signalą dideliais atstumais, pavyzdžiui iš palydovo. Iš pradžių yra pateikiami sistemos įgyvendinimo

pavyzdžiai pluošto kampo nustatymui vienoje plokštumoje. Kampų nustatymas abiejose plokštumose yra pasiekiamas apjungus dvi kampo nustatymo vienoje plokštumoje realizacijas, kurios yra orientuotos tarpusavyje statmenose plokštumose.

Paprasčiausia pasiūlyto būdo realizacija pluošto kampo pokyčiui nustatyti vienoje plokštumoje yra naudojant tik vieną interferencinį optinį filtrą 4 kaip iliustruota 2 pav. Šiuo atveju naudojami du didelės aktyvios srities optinei spinduliuotei jautrūs detektoriai (pvz. fotodiodai) atspindėto pluošto 1' ir praėjusio pluošto 1'' optinės galios matavimui. Detektorius 6 matuoja atspindžio optinę galią P1, o detektorius 7 – pralaidumo optinę galią P2. Filtro pasukimo kampas ir krentančios spinduliuotės bangos ilgiai yra suderinti taip, kad esant pluošto kritimo kampui, atitinkančiam detektavimo sistemos optinę ašį (ir optimalų pataikymą į imtuvo detektorių), dalis krentančios spinduliuotės būtų atspindima filtro, o dalis praeitų. Idealiu atveju 50 % krentančios spinduliuotės galios turėtų būti atspindima, o likusi 50 % dalis – praleidžiama. Tačiau dalinimo santykis gali būti ir kitoks, priklausomai nuo kitų sistemos parametrų (jei nereikia plataus kampo nustatymo intervalo). Kampo nustatymui apskaičiuojamas yra santykis $(P1-P2)/(P1+P2)$, kuris nepriklauso nuo krentančio pluošto optinės galios, bet apibrėžia pluošto kampą atžvilgiu IOF paviršiaus statmens 3 ir tuo pačiu atžvilgiu detektavimo sistemos optinės ašies 5. Ši metodo realizacija yra labai paprasta, reikalauja tik vieno interferencinio optinio filtro kampo nustatymui vienoje plokštumoje.

Kita, labiau patobulinta metodo realizacija yra naudojant du vienodus IOF pasuktus vienodais kampais į priešingas puses kaip pavaizduota 3 pav. Krentančio pluošto 1 kampo pokyčiui nustatyti (atžvilgiu detektavimo sistemos optinės ašies 5) matuojama yra optinė galia atsispindėjusi nuo IOF 4 ir 4b. Detektorius 6 matuoja optinę galią P1 atsispindėjusią nuo IOF 4, o detektorius 7 matuoja optinę galią P2 atsispindėjusią nuo IOF 4b. Plačiausiam kampo nustatymo intervalo užtikrinimui, IOF ir spinduliuotės bangos ilgis turi būti suderinti taip, kad esant pluošto kampui atitinkančiam detektavimo sistemos optinę ašį 5 (kai spinduliuotė yra suvedama į imtuvo detektorių) nuo kiekvieno iš IOF atsispindėtų 50 % krentančios optinės galios. Tačiau ši sąlyga nėra kritinė, galima naudoti ir mažesnę atspindžio procentą, jei norima, kad optimalaus pataikymo padėtyje daugiau galios praeitų per IOF ir būtų nukreipiama į imtuvo detektorių 8, kuris gali būti montuojamas iškart po IOF 4b. Kampo nustatymui (atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies 5) apskaičiuojamas yra parametras $(P1-P2)/(P1+P2)$, kuris

nepriklauso nuo krentančio pluošto optinės galios. Dviejų IOF realizacijos pagrindinis privalumas lyginant su vieno IOF realizacija yra tai, kad praėjusi pro filtrus spinduliuotė gali būti naudingai panaudota, pavyzdžiui nukreipiant ją į imtuvo detektorių duomenų priėmimui. Pavyzdinis atsakas sudarius pateiktą realizaciją eksperimentiškai ir naudojant prieinamus interferencinius optinius filtrus yra pateiktas 4 pav. Šiuo atveju buvo naudota optinė spinduliuotė, kurios spektras yra pavaizduotas 5 pav. IOF spektrinis atsakas optiniam pluoštui krentančiam 0° kampu yra pavaizduotas 6 pav. IOF buvo optimizuoti taip, kad nuo jų atsispindėtų 30 % krentančio pluošto galios.

Yra žinoma, kad interferencinių optinių filtrų atsakas gali priklausyti nuo optinio pluošto poliarizacijos. Prieš tai pateiktos realizacijos puikiai veikia, kai optinio pluošto poliarizacija yra tiesinė ir orientuota lygiagrečiai arba statmenai atžvilgiu kritimo plokštumos į IOF. Tačiau realiose sistemose gali būti sudėtinga užtikrinti, kad siųstuvo siunčiama tiesinės poliarizacijos orientacija nepakistų judant imtuvui ar/ir siųstuvui. Tokiais atvejais galimi du sprendimai:

- 1) Naudoti nepoliarizuotą optinį pluoštą iš siųstuvo ir specialų filtrų suderinimą, kad kampo nustatymas būtų optimizuotas vienai poliarizacijai, o statmenos poliarizacijos spinduliuotė būtų tiesiog praleidžiama filtrų (link imtuvo detektoriaus 8);
- 2) Naudoti apskritimiškai poliarizuotą optinį pluoštą iš siųstuvo ir $\lambda/4$ banginę plokštelę prieš kampo nustatymo įrenginį (7 pav.). Tokiu atveju $\lambda/4$ banginė plokštelė 9 yra pasukama taip, kad į pluošto kampo nustatymą įrenginį patenkančio pluošto poliarizacija būtų tiesinė ir lygiagrečiai arba statmenai orientuota atžvilgiu kritimo plokštumos į IOF.

Jei kampo nustatymo įrenginyje yra naudojami fotodiodai optinės galios matavimui, gali atsitikti taip, kad dėl temperatūros poveikio ar senėjimo atsiras galios matavimo parodymų skirtumas tarp abiejų fotodiodų. Atsiradęs disbalansas gali paveikti kampo nustatymo charakteristikas ir įnešti paklaidas. Tokiais atvejais gali būti naudojama modifikuota įrenginio realizacija, kai papildomai yra integruojamas stabilaus spektro lazerinis šaltinis 10 (8 pav.). Lazerinio šaltinio 10 bangos ilgis parenkamas toks, kad nuo abiejų filtrų atsispindėtų apytiksliai 50 % krentančios spinduliuotės galios. Papildomas lazerinis šaltinis 10 gali būti nukreiptas į kampo nustatymo įrenginį naudojant pluošto daliklį 11. Esant fotodiodų kalibravimo poreikiui, būtų įjungiamas toks šaltinis ir matuojamas galių santykis detektuojamas detektorių 6

ir 7. Naudojant išmatuotą optinės galios parodymų santykį, toliau galėtų būti apskaičiuojamas korekcijos koeficientas kampo nustatymo įrenginiui. Tokiu būdu galėtų būti užtikrinamas tikslus kampo nustatymas net esant detektorių atsako pokyčiams.

Tam, kad pilnai galėtų būti nustatoma pluošto kryptis (nustatomos dvi kritimo kampo vertės atžvilgiu įrenginio optinės ašies), kampo matavimai turi būti atliekami dviejose tarpusavyje statmenose plokštumose. Tam skirta išradimo realizacija sudaroma pritaikius dvi kampo nustatymo vienoje plokštumoje realizacijas. Viena jų yra orientuojama taip, kad filtrai būtų pasukti (ir pluošto kampas nustatomas) XY plokštumoje 13, o kita, kad filtrai būtų pasukti XZ plokštumoje 14 (plokštumų žymėjimai pasirinkti laikant, kad pluošto sklidimo kryptis atitinka X ašį). Atitinkama išradimo realizacijos iliustracija pluošto kampo pokyčio nustatymui dviejuose plokštumose naudojant dviejų IOF realizacijas yra pateikta 9 pav. Šiuo atveju gali būti taikomas nuoseklus pluošto kampo nustatymo realizacijų išdėstymas, kai iš pradžių yra nustatomas kampas XY plokštumoje 13, o toliau naudojant praėjusį pluoštą yra nustatomas kampas XZ plokštumoje 14.

Nustatant pluošto kampus dviejose plokštumose su vienu IOF per plokštumą, turi būti naudojamas lygiagretus pluošto kampo nustatymo realizacijų išdėstymas. Tokiu atveju krentantis pluoštas yra padalinamas naudojant pluošto daliklį į dvi dalis, kurios patenka į dvi pluošto kampo nustatymo realizacijas su vienu IOF, atitinkančias pavaizduotas 2.pav, bet orientuotas tarpusavyje statmenose plokštumose. Taigi viena pluošto dalis patenka į pirmą vieno IOF realizaciją orientuotą kampo nustatymui XY plokštumoje, o kita – į antrą vieno IOF realizaciją orientuotą kampo nustatymui XZ plokštumoje. Abi vieno IOF kampo nustatymo realizacijos turi po du galios detektorius, kurie matuoja atspindėto nuo filtro ir praėjusio per filtrą pluoštų optines galias. Pagal šių galios detektorių parodymus, naudojant anksčiau nurodytą formulę, yra nustatoma pluošto kampo vertė atžvilgiu sistemos optinės ašies atskirai XY plokštumoje ir XZ plokštumoje.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Detektavimo įrenginys, skirtas optinio pluošto kritimo kampui nustatyti, kai minėto optinio pluošto spektras yra iš anksto užduotas ir pastovus, apimantis:

- bent du optinės galios detektorius,
- bent vieną interferencinį optinį filtrą (IOF), išdėstytą optinio pluošto kelyje, kur nuo optinio pluošto kritimo kampo į IOF paviršių priklauso jo optinis pralaidumas, o pagal gautus praėjusio per IOF optinio pluošto galios palyginimus nustatomas optinio pluošto kritimo kampas, b e s i s k i r i a n t i s t u o, kad

minėtas (-i) IOF yra pasuktas (-ti) iš anksto nustatytu kampu atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies (5) detektavimo plokštumoje, kurioje išdėstyta detektavimo įrenginio optinė ašis (5) ir statmuo IOF paviršiui, o optinio pluošto kritimo kampas, atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies (5), nustatomas pagal optinio pluošto (-ų), praėjusio (-ių) per IOF ir (arba) atsispindėjusio (-ių) nuo IOF paviršiaus (-ių) optinių pluoštų galių palyginimą.

2. Detektavimo įrenginys pagal 1 punktą, turintis vieną IOF (4), pasuktą iš anksto užduotu kampu detektavimo plokštumoje atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies (5), ir du detektorius (6) ir (7), kur pirmasis detektorius (6) yra išdėstytas atsispindėjusio nuo IOF (4) paviršiaus optinio pluošto (1') kelyje ir matuoja atspindėto nuo IOF (4) pluošto (1') optinę galią P1, o antrasis detektorius (7), išdėstytas praėjusio per IOF (4) optinio pluošto (1'') kelyje ir matuoja praėjusio per IOF (4) pluošto optinę galią P2.

3. Detektavimo įrenginys pagal 1 punktą, turintis du IOF (4) ir (4b), išdėstytus nuosekliai vienas prieš kitą ir pasuktus iš anksto užduotais kampais minėtoje detektavimo plokštumoje atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies (5), kur pirmasis detektorius (6) yra išdėstytas atsispindėjusio nuo pirmojo IOF (4) paviršiaus optinio pluošto 1' kelyje, o antrasis detektorius (7) yra išdėstytas atsispindėjusio nuo antrojo IOF (4b) optinio pluošto (1b') kelyje arba praėjusio per antrąjį IOF (4b) optinio pluošto

(1b'') kelyje.

4. Detektavimo įrenginys paga 3 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad pirmasis IOF (4) ir antrasis IOF (4b) yra pasukti vienodais kampais į priešingas puses, kur pirmasis detektorius (6) matuoja atspindėto nuo pirmojo IOF (4) pluošto (1') optinę galią P1, o antrasis detektorius (7) matuoja atspindėto nuo antrojo IOF (4b) pluošto (1b') optinę galią P2.

5. Detektavimo įrenginys pagal 3 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad pirmasis IOF (4) ir antrasis IOF (4b) yra pasukti vienodais kampais į tą pačią pusę, kur pirmasis detektorius (6) matuoja atspindėto nuo pirmojo IOF (4) pluošto (1') optinę galią P1, o antrasis detektorius (7) matuoja praėjusio pro antrojo IOF (4b) pluošto (1b'') optinę galią P2.

6. Detektavimo įrenginys pagal bet kurį iš 2–5 punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad minėtas optinio pluošto kritimo kampas atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies (5) yra nustatomas optinių galių santykiu $(P1-P2)/(P1+P2)$, kur P1 yra atspindėjusio nuo pirmojo IOF pluošto optinė galia, o P2 yra praėjusio per pirmąjį IOF pluošto optinė galia arba P2 yra praėjusio per antrąjį IOF arba atspindėjusio nuo antrojo IOF pluošto optinė galia.

7. Sistema, skirta optinio pluošto kritimo kampams dviejose plokštumose nustatyti, apimanti du detektavimo įrenginius pagal 2 punktą, kurie orientuoti tarpusavyje statmenose plokštumose, kur optinis pluoštas, kurio kryptis nustatoma, pluošto dalikliu yra padalinamas į dvi dalis, kurio pirmoji dalis yra nukreipiama į pirmąjį detektavimo įrenginį pagal 2 punktą, kurio IOF yra pasuktas XY plokštumoje, ir kuris nustato pluošto kampą XY plokštumoje, o antroji optinio pluošto dalis pluošto dalikliu nukreipiama į antrąjį detektavimo įrenginį pagal 2 punktą, kurio filtrai yra pasukti XZ plokštumoje, ir kuris nustato pluošto kampą XZ plokštumoje.

8. Sistema, skirta optinio pluošto kritimo kampams dviejose plokštumose

nustatyti, apimanti du detektavimo įrenginius pagal bet kurį iš 3–6 punktų, kurie orientuoti tarpusavyje statmenose plokštumose, kur optinis pluoštas, kurio kryptis yra nustatoma, iš pradžių patenka į pirmąjį detektavimo įrenginį pagal bet kurį iš 3–6 punktų, kurio IOF yra pasukti XY plokštumoje, ir kuris nustato pluošto kampą XY plokštumoje, o optinis pluoštas praėjęs pirmąjį detektavimo įrenginį patenka į antrąjį detektavimo įrenginį pagal bet kurį iš 3–6 punktų, kurio IOF yra pasukti XZ plokštumoje, ir kuris nustato pluošto kampą XZ plokštumoje.

9. Detektavimo įrenginys pagal bet kurį iš 2–8 punktų, **b e s i s k i r i a n t** i s tuo, kad numatyta $\lambda/4$ banginė plokštelė (9), skirta apskritimiškai poliarizuotam pluoštui konvertuoti į tiesiškai poliarizuotą, kuris patenka į pirmąjį IOF (4).

10. Detektavimo įrenginys pagal bet kurį 2–9 punktų, **b e s i s k i r i a n t i** s tuo, kad numatytas papildomas stabilaus spektro lazerinis šaltinis (10), skirtas optinės galios detektoriams (6) ir (7) sukalibruoti, kurio pluoštas nukreiptas į pirmąjį IOF per pluošto daliklį (11).

11. Detektavimo būdas, skirtas optinio pluošto kritimo kampui nustatyti, kai optinio pluošto spektras yra iš anksto užduotas ir pastovus, apimantis:

- optinio pluošto nukreipimą į detektavimo įrenginio bent vieną interferencinį optinį filtrą (IOF), kurio optinis pralaidumas priklauso nuo optinio pluošto kritimo kampo į IOF,
- optinio pluošto kritimo kampo nustatymą pagal gautus optinių pluoštų, praėjusių pro IOF optinių galių palyginimus,

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

minėtas (-i) IOF į kurį (-iuos) yra nukreipiamas optinis pluoštas yra pasuktas (-i) iš anksto nustatytu kampu atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies (5) detektavimo plokštumoje, kurioje išdėstyta detektavimo įrenginio optinė ašis (5) ir statmuo IOF paviršiui, o optinio pluošto kritimo kampas atžvilgiu detektavimo įrenginio optinės ašies (5) nustatomas pagal optinio pluošto (-ų), praėjusio (-ių) per IOF ir (arba) atsispindėjusio (-ių) nuo IOF paviršiaus (-ių) optinių galių palyginimą.

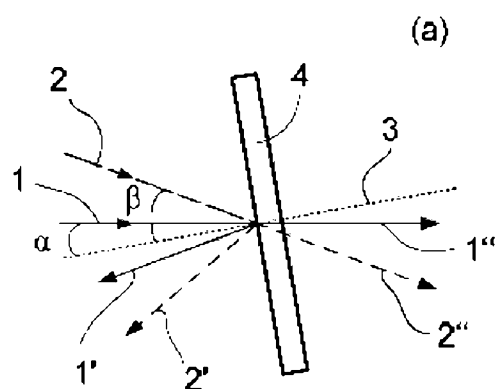


Fig. 1a

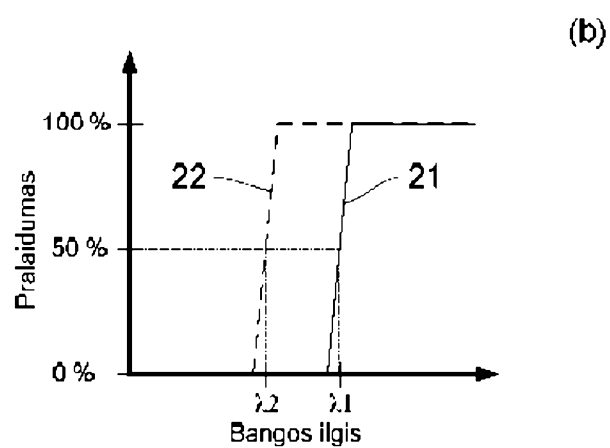


Fig.1b

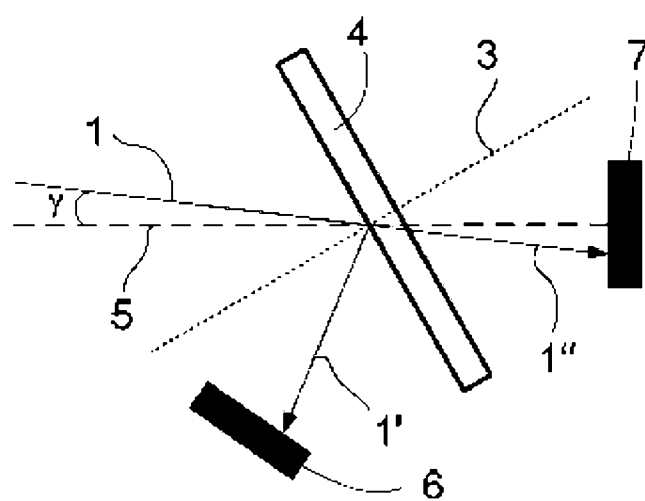


Fig. 2

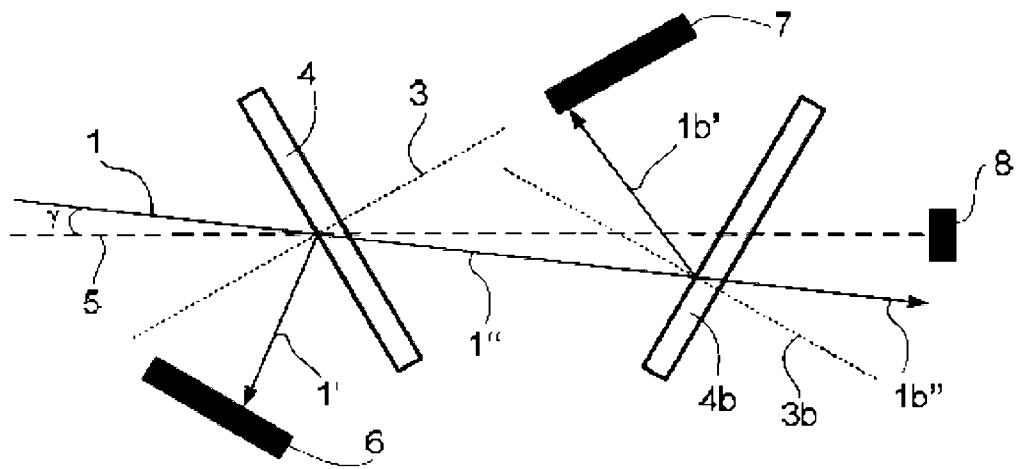


Fig. 3

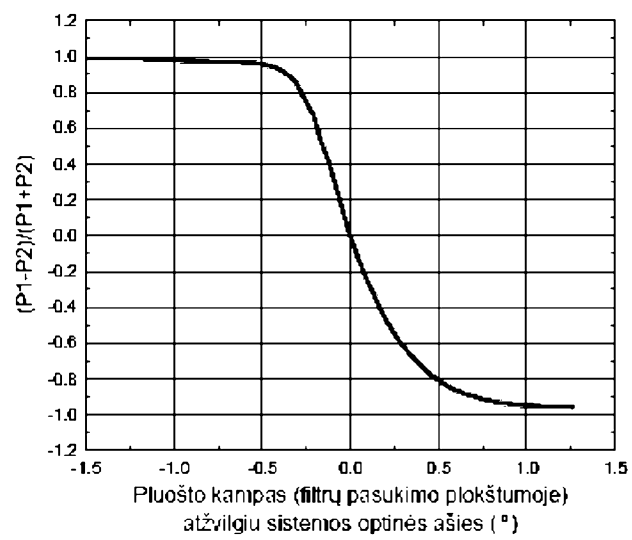


Fig. 4

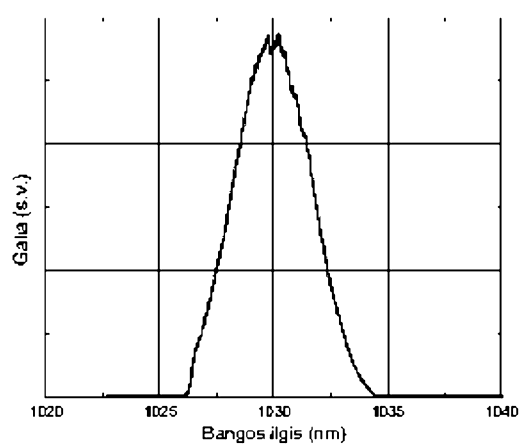


Fig. 5

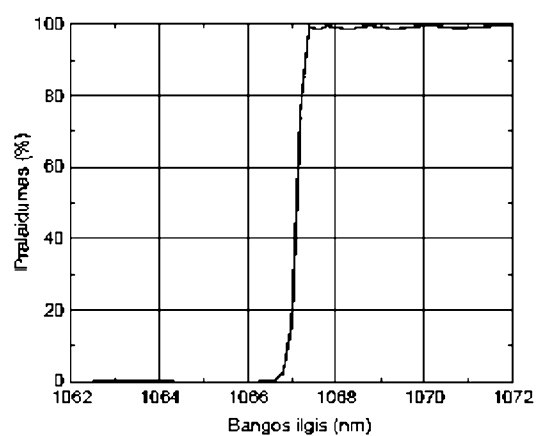


Fig. 6.

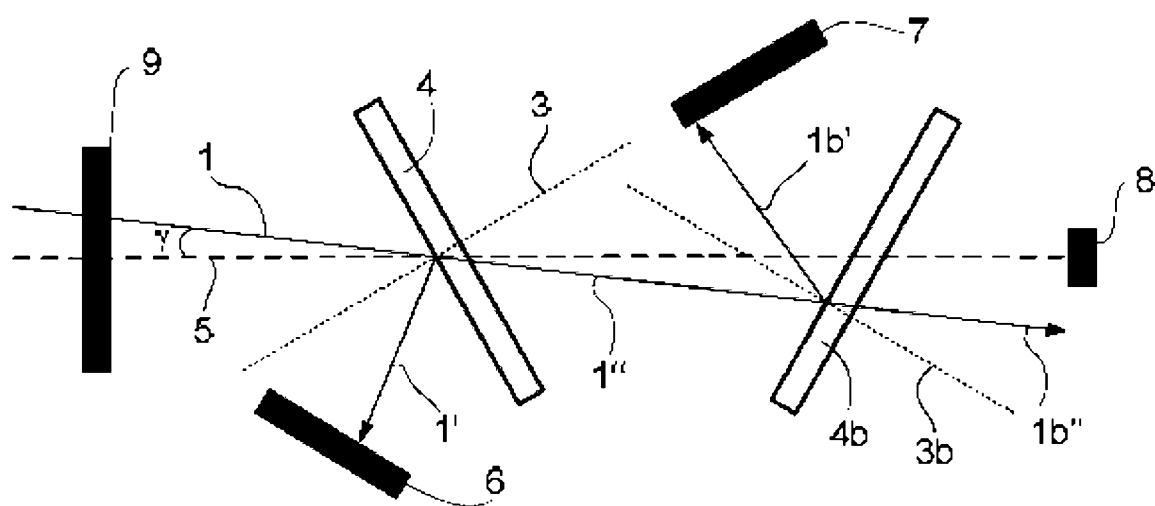


Fig. 7.

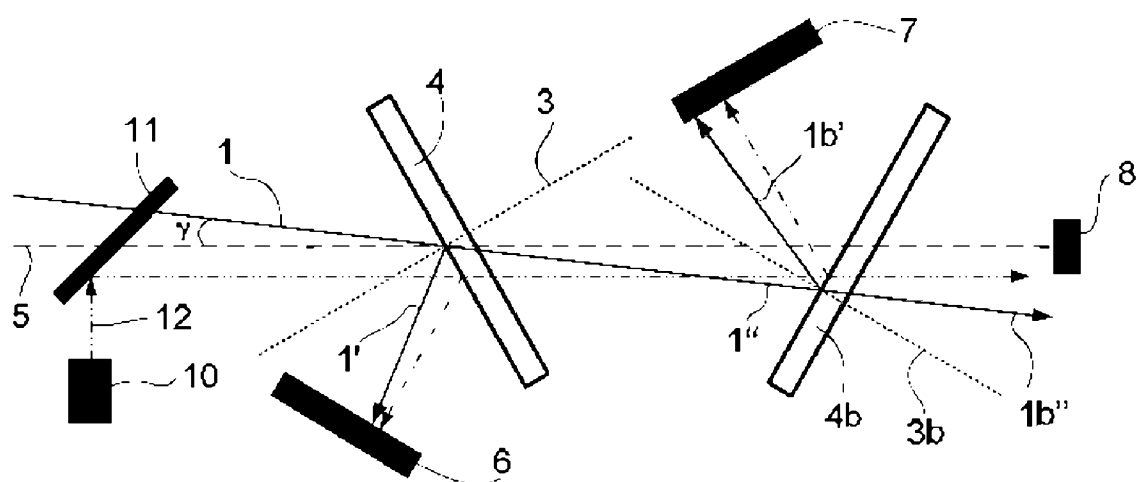


Fig. 8.

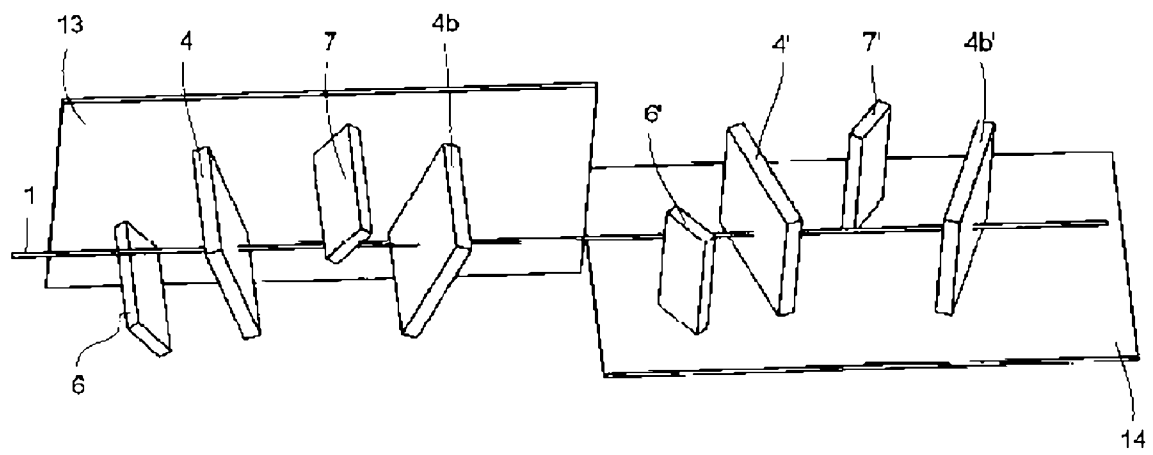


Fig. 9.