



(10) **LT 5663 B**

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

(11) Patent numeris: **5663** (51) Int. Cl. (2006): **H01S 3/10**

(21) Paraiškos numeris: **2008 089**

(22) Paraiškos padavimo data: **2008 11 13**

(41) Paraiškos paskelbimo data: **2010 05 25**

(45) Patent paskelbimo data: **2010 07 26**

(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
Saulius MIKALAUSKAS, LT
Kęstutis REGELSKIS, LT
Valerijus SMILGEVIČIUS, LT

(73) Patent savininkas:

UAB „EKSPLA”, Savanorių pr. 231, LT-02300 Vilnius, LT

(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:

Virgina Adolfina DRAUGELIENĖ, UAB TARPINĖ, A.P.Kavoliuko g. 24-152, LT-04328 Vilnius, LT

(54) Pavadinimas:

Lazerinių pluoštų kombinavimo būdas ir įrenginys

(57) Referatas:

Išradimas priklauso lazerinių technologijų sričiai ir yra skirtas lazerio pluoštų, sklindančių iš kelių pirminių lazerinių šaltinių, kombinavimui optinėje netiesinėje terpėje į vieną didesnio dažnio ir didesnės energijos lazerio pluoštą. Optinė netiesinė terpė yra kvadratinio jautrio medžiaga, kurioje pradiniai lazeriniai pluoštai, panaudojant netiesinę sąveiką, sumuojami poromis sudedant jų dažnius, o suminio dažnio pluoštai, tenkinant fazinio sinchronizmo sąlygą, kombinuojami į vieną pluoštą, kur į kvadratinio jautrio medžiagą nukreipia lyginį skaičių pradinių lazerinių pluoštų, mažiausiai du.

Išradimas priklauso lazerinių technologijų sričiai ir yra skirtas lazerinių pluoštų, sklindančių iš kelių pirminių lazerinių šaltinių, kombinavimui optinėje netiesinėje terpėje į vieną didesnio dažnio ir didesnės energijos lazerinį pluoštą. Išradimas gali būti panaudotas medžiagų apdirbimui lazerinėmis technologijomis, kur reikalaujama, kad lazerinio šaltinio generuojami impulsai, kurie sąveikauja su apdirbama medžiaga, turėtų aukštą vidutinę galią/energiją, būtų didelis lazerio impulsų pasikartojimo dažnis ir kuo trumpesnis bangos ilgis (optimaliai tinkantis medžiagai apdirbti). Lazerinio pluošto kokybė taip pat turi būti gera.

Sistamai, kuri generuotų didelės energijos lazerinius impulsus, sukurti galima panaudoti kelis lazerinius šaltinius ir jų visų generuojamą spinduliuotę sujungti į vieną pluoštą. Kelių lazerinių pluoštų sujungimas į vieną įmanomas tuomet, kai sklindančių pluoštų kelyje yra pastatoma specializuota įranga, kuri sukombinuoja pluoštus į vieną pluoštą. O norint turėti pluoštą, kurio bangos ilgis yra trumpesnis už pirminių lazerinių pluoštų bangos ilgį, reikia spindulio kelyje pastatyti optiškai netiesinę medžiagą, pro kurią praėjusio pluošto bangos ilgis sutrumpėja. Šiuo būdu gautas pluoštas yra didelės vidutinės energijos ir trumpesnio bangos ilgio, tačiau tokia sistema nėra labai efektyvi ir praktiška, nes naudojama keletas bendruoju atveju nekoherentinių lazerinių šaltinių ir du skirtingi įrenginiai – vienas pluoštų kombinavimui, kitas trumpesnio bangos ilgio pluošto generacijai (pvz., antrajai harmonikai, kurios efektyvumas nekoherentinio kombinuoto pluošto atveju yra žemas).

Yra žinomas lazerinių pluoštų kombinavimo būdas ir įrenginys, kuriuose iš daug skaidulinių lazerių pluoštų sukombinuojamas vienas koherentinis pluoštas. Lazerinių pluoštų kombinavimas vykdomas taip, kad kiekvienas lazerinis pluoštas sąveikuoja su bent vienu kitu skaidulinio lazerio pluoštu taip, kad priverčia pakeisti kito skaidulinio lazerio pagrindinį dažnį ir tokiu būdu iš daugelio skaidulinių lazerių pluoštų suformuoja vieną koherentinį pluoštą (žiūrėti išradimo aprašymą pagal tarptautinę patentinę paraišką WO 2004.068652).

Suminis lazerinis pluoštas sklinda skaidula, todėl yra neišvengiamas pagrindinis skaidulinių lazerių apribojimas – skaidulos atsparumas individualaus impulso energijai. Tokiu būdu šis išradimas neišsprendžia mažos impulso energijos problemos.

Yra žinomas lazerinių pluoštų kombinavimo būdas ir įrenginys, kai trijų skirtingų bangos ilgių lazerinių šaltinių pluoštai nukreipiami į netiesinę optinę terpę, būtent parametrinę optinę struktūrą, pro kurią praeidami lazeriniai pluoštai suformuoja vieną pakeisto dažnio pluoštą (žiūrėti išradimo aprašymą pagal Prancūzų patentą FR2811149).

Parametrinės sąveikos esmė yra ta, kad pradiniam trijų bangų ilgių pluoštų rinkinyje vieno pluošto bangos ilgis būtinai turi būti lygus „sukombinuoto“ pluošto bangos ilgiui. Tai yra, norint turėti kombinuotą bangos ilgį λ_k reikia, kad pradinių trijų lazerinių pluoštų rinkinyje tokio bangos ilgio lazerinis pluoštas jau būtų, o tai yra rimtas apribojimas. Kitas žinomo būdo ir įrenginio trūkumas yra tas, kad sukombinuotas pluoštas yra mažesnio arba tokio pat optinio dažnio kaip kombinuojamų pluoštų optiniai dažniai. Tai reiškia, kad norint turėti antros harmonikos arba suminio dažnio lazerinį pluoštą reikės papildomai generuoti ketvirtą harmoniką.

Be to, žinomu būdu, kai lazerinių pluoštų kombinavimui naudojama parametrinė optinė struktūra, be sukombinuoto pluošto yra generuojami ir šalutiniai pluoštai, ko pasekmėje sumažėja lazerinių pluoštų kombinavimo energetinis našumas.

Išradimu siekiama sukurti lazerinių pluoštų kombinavimo būdą ir įrenginį, kurie leistų gauti vieną lazerinį pluoštą didesnio energetinio našumo ir didesnių optinių dažnių nei kombinuojamų pluoštų optiniai dažniai.

Uždavinio sprendimo esmė yra ta, kad lazerinių pluoštų kombinavimo būde, apimančiame kelių pradinių lazerinių pluoštų nukreipimą į optinę netiesinę terpę, kurioje vyksta pluoštų kombinavimas, gaunant pakeisto dažnio lazerinį pluoštą, optinė netiesinė terpė yra kvadratinio jautrio medžiaga, kurioje pradiniai lazeriniai pluoštai, panaudojant netiesinę sąveiką, sumuojami poromis sudedant jų dažnius, o suminio dažnio pluoštai, tenkinant fazinio sinchronizmo sąlygą, kombinuojami į vieną pluoštą, kur į kvadratinio jautrio medžiagą nukreipiamas lyginis skaičius pradinių lazerinių pluoštų, mažiausiai du.

Siūlomu būdu sukombinuotas pluoštas yra suminio dažnio pluoštas, kuris gali būti antros harmonikos pluoštas. Generuojant nekolonarią antrąją harmoniką arba suminį dažnį kvadratinio jautrio medžiagoje, pasiūlytu būdu nereikalingi spektriniai filtrai antros harmonikos arba suminio dažnio pluoštams atskirti nuo pagrindinės harmonikos

spinduliuotės. Sklindantys skirtingomis kryptimis pluoštai erdvėje lengvai atskiriami. Šis būdas leidžia padidinti išeinančio pluošto optinį dažnį (sutrumpinti bangos ilgį) ir galingumą nenaudojant papildomų priemonių, t.y. ir kombinavimas, ir harmonikos generacija, ir spektrinis pluoštų atskyrimas atliekami viename elemente, t.y. netiesiniame kristale.

Kvadratinio jautrio medžiaga yra netiesiniai kristalai KTP, LBO, DKDP, periodiškai orientuotos medžiagos PPLN, PPKTP ir kiti netiesiniai kristalai.

Prieš nukreipiant į kvadratinio jautrio medžiagą, kiekvienas pradinis lazerinis pluoštas yra kolimuojamas, o po to fokusuojamas į netiesinį kristalą. Tai leidžia pasiekti optimalias lazerinio pluošto savybes, reikalingas tolimesniam pluoštų kombinavimui generuojant harmonikas.

Pradiniai lazeriniai pluoštai, nukreipti į kvadratinio jautrio medžiagą, tarpusavyje yra nekolinearūs. Pluoštų nekolinearumas leidžia erdvėje patogiai išdėstyti kombinuojamus pluoštus, nenaudojant tam papildomų optinių elementų. Be to, nekolinearios sąveikos metu generuojamo antros harmonikos arba suminio dažnio pluošto sklidimo kryptis nesutampa nei su viena pradinių pluoštų kryptimi. Tai leidžia erdvėje sukombinuotą pluoštą atskirti nuo pradinių pluoštų nenaudojant jokių papildomų optinių elementų.

Pluoštų sumavimas ir kombinavimas vykdomas lygiagrečiai vienoje kvadratinio jautrio medžiagoje. Šiuo atveju pluoštų skaičių apriboja tik netiesinio kristalo apertūra. Šis realizavimo būdas turi privalumus kombinuojant nedidelės vidutinės galios lazerinius pluoštus, (geriau iki 100 W vienam pluoštui).

Pluoštų sumavimas ir kombinavimas vykdomas nuosekliai panaudojant vieną arba keletą atskirų kvadratinio jautrio medžiagų (netiesinių kristalų).

Šis būdo realizavimo variantas turi privalumus kombinuojant didelės vidutinės galios lazerinius pluoštus, (daugiau kaip 100 W vienam pluoštui), nes pagerina netiesinių kristalų temperatūrinius režimus. Pluoštų susikirtimo vietoje išskiriama šiluma paskirstoma tolygiai per vieną arba kelis netiesinius kristalus.

Pluoštų sumavimas ir kombinavimas vykdomas mišriu būdu panaudojant nuoseklų ir lygiagretų pradinių pluoštų sumavimą ir kombinavimą viename arba keliuose atskiruose netiesiniuose kristaluose.

Mišrus kombinavimo būdas turi privalumus tuomet, kai kelių kombinuojamų lazerinių pluoštų vidutinė galia yra didelė (pvz., daugiau kaip 200 W). Šiuo atveju optimaliai išnaudojama kristalų apertūra, kad būtų galima sukombinuoti kuo daugiau pluoštų neviršijant 200 W vidutinę galią atskiruose netiesiniuose kristaluose, paskirstant šilumą per kelis netiesinius kristalus tam, kad būtų pasiekta didesnė nei 200 W vidutinė galia.

Vienu metu sumuojami ir kombinuojami pradiniai lazeriniai pluoštai bet kuriame iš nuosekliai vykstančių etapų tarpusavyje yra nekolinearūs, tačiau gali būti kolinearūs su pluoštais, nuosekliai sumuojamais kituose nuosekliai vykstančiuose etapuose.

Pradinių sumuojamų pluoštų ir sukombinuoto pluošto sklidimo kryptys yra skirtingos. Tai palengvina jų atskyrimą leidžiant jiems laisvai skliti erdvėje.

Į netiesinę kvadratinio jautrio medžiagą (netiesinį kristalą) nukreipia vienodo bangos ilgio tarpusavyje nekoherentinius pluoštus. Šiuo atveju yra generuojama antroji harmonika.

Į netiesinę kvadratinio jautrio medžiagą (netiesinį kristalą) nukreipia nekoherentinius pradinius lazerinius pluoštus, kurių bangos ilgiai gali būti skirtingi.

Poroje esančių sumuojamų lazerinių pluoštų bangos ilgiai yra vienodi, tačiau skiriasi nuo pluoštų bangos ilgių nuosekliai sumuojamų kitose porose. Šiuo atveju sukombinuotas pluoštas turės skirtingų bangos ilgių harmonikų kombinaciją.

Poroje esančių sumuojamų lazerinių pluoštų bangos ilgiai yra skirtingi, bet nesiskiria nuo pluoštų bangos ilgių nuosekliai sumuojamų kitose porose.

Lazerinių pluoštų kombinavimo įrenginys, apimantis kelis lazerius, kurių pluoštai yra nukreipti į optinę netiesinę terpę, kurioje vykdomas pluoštų kombinavimas, gaunant pakeisto bangos ilgio lazerinį pluoštą, optinė netiesinė terpė yra kvadratinio jautrio medžiaga, kurioje lazeriniai pluoštai panaudojant netiesinę sąveiką sumuojami poromis

sudedant jų dažnius, o suminio dažnio pluoštai, tenkinant fazinio sinchronizmo sąlygas, kombinuojami į vieną pluoštą.

Įrenginyje naudojami lazeriai yra skaiduliniai lazeriai. Skaidulinių lazerių generuojamų impulsų energijos yra mažos, todėl šiems lazeriams pluoštų kombinavimas yra ypač aktualus. Kai kombinuojant atskirų skaidulinių lazerių pluoštus generuojama antra harmonika, į antros harmonikos pluoštą galima perduoti kelių skaidulinių lazerių impulsų energiją ir pasiekti kelis kartus didesnę antros harmonikos impulso energiją.

Kvadratinio jautrio medžiaga yra netiesinis kristalas toks kaip KTP, LBO, DKDP, periodiškai orientuotos medžiagos PPLN, PPKTP ir kt. netiesiniai kristalai.

Kiekvieno lazerio pluoštas yra fokusuojamas į kvadratinio jautrio medžiagą per kolimatorių.

Detaliau išradimas paaiškinamas brėžiniais, kur

Fig. 1 pavaizduota lazerinių pluoštų kombinavimo įrenginio blokinė schema.

Fig.2 pavaizduota

- (a) sudėtinio pluošto, sudaryto iš keturių pradinių lazerinių pluoštų, sklindančių skirtingais kampais ir susikertančių kvadratinio jautrio medžiagoje, amplitudės kampinis skirstinys;
- (b-d) poliarizacinės bangos spinduliuojamų suminių dažnių šviesos bangų amplitudžių kampinis skirstinys.
- (b) suminių dažnių bangų fazės vienodos;
- (c) suminių dažnių bangų fazės priešingos;
- (d) kaip ir (c) atveju, bet uždengus vieną pradinių pluoštą.

Fig. 3 - pavaizduotos koherentinių lazerinių pluoštų sumavimo ir kombinavimo kvadratinio jautrio medžiagoje fazinio sinchronizmo kreivės.

Fig. 4 - pavaizduota nekoherentinių lazerinių pluoštų kombinavimo kvadratinio jautrio medžiagoje fazinio sinchronizmo kreivės.

Fig. 5 - pavaizduota lygiagrečių lazerinių pluoštų sumavimo ir kombinavimo kvadratinio jautrio medžiagoje schema.

Fig.6 – pavaizduota nuoseklaus lazerinių pluoštų sumavimo ir kombinavimo keliose kvadratinio jautrio medžiagose schema.

Fig.7.- pavaizduota nuoseklaus lazerinių pluoštų sumavimo ir kombinavimo vienoje kvadratinio jautrio medžiagoje schema.

Fig. 8. Pavaizduota mišraus lazerinių pluoštų sumavimo ir kombinavimo kvadratinio jautrio medžiagoje schema.

Fig. 9 –pavaizduotas pradinių ir sukombinuoto pluoštų kampinis išsidėstymas.

Lazerinių pluoštų kombinavimo būdas apima lyginio skaičiaus pradinių lazerinių pluoštų nukreipimą į kvadratinio jautrio medžiagą (netiesinį kristalą), kur prieš nukreipiant į netiesinį kristalą kiekvienas pradinis pluoštas yra kolimuojamas, o po to fokusuojamas į netiesinį kristalą, kuriame dėl pluoštų netiesinės sąveikos vyksta pluoštų sumavimas sudedant poromis pradinių pluoštų dažnius, o suminio dažnio pluoštai, tenkinant fazinio sinchronizmo sąlygas, kombinuojami į vieną pluoštą.

Lazerinių pluoštų kombinavimo įrenginys (Fig. 1), skirtas siūlomam būdai realizuoti turi lyginį skaičių lazerinių šaltinių, geriau skaidulinių lazerių ($1_1...1_n$), kiekvieno kurių išėjimo pluoštas per atitinkamą kolimatorių ($2_1...2_n$) yra fokusuojamas į netiesinį kristalą 3, būtent į kvadratinio jautrio medžiagą, kuri gali būti parinkta iš KTP, LBO, DKDP netiesinių kristalų, periodiškai orientuotų medžiagų PPLN, PPKTP ir kitų. Pradiniai lazeriniai pluoštai 4, nukreipti į netiesinį kristalą 3, tarpusavyje yra nekolinearūs ir jų sklaidimo kryptys nesutampa su suminio dažnio pluoštu, 5, kombinuojamų į vieną išėjimo pluoštą 6, kryptimi. Lazeriniai spinduliai ($7_1...7_n$), kurių sklaidimo kryptis nesutampa su sukombinuoto pluošto 6 sklaidimo kryptimi, už netiesinio kristalo 3 yra sustabdomi gaudyklėmis ($8_1...8_n$). Taip pat yra numatyti lazerinių pluoštų fazės valdikliai 9 ir 10 (Fig.8).

Sumuojami dviejų arba daugiau lazerių ($1_1...1_n$) sukolimuoti ir sufokusuoti į netiesinį kristalą 3 atitinkamai du arba daugiau pluoštai 4 gali būti vienodų arba skirtingų

poliarizacijų. Pluoštai 4 yra sumuojami poromis taip, kad kiekvienos poros suminio dažnio pluoštas 5 būtų vienodo arba skirtingo dažnio su kitos poros generuojamo pluošto 5 dažniu. Visi suminio dažnio pluoštai 5 sklinda ta pačia kryptimi ir persikloja artimame ir tolimame laukuose taip, kad sudarytų bendrą kombinuojamą pluoštą 6. Kiekviena sumuojamų pluoštų 4 pora tenkina fazinio sinchronizmo sąlygą, o sukombinuoti poroje pluoštai efektingai verčiami į suminio dažnio pluoštą. Fazinio sinchronizmo sąlyga yra pasiekama dvigubo šviesos lūžio rodiklio medžiagose, periodiškai orientuotose medžiagose, bangolaidinėse struktūrose, periodiškai orientuotose bangolaidinėse struktūrose ir t.t. Sumuojami pradiniai pluoštai 4 vienas nuo kito bendru atveju skiriasi sklidimo kryptimi, kai kurių pluoštų sklidimo kryptys gali sutapti, o pluoštai gali būti vienodų arba skirtingų poliarizacijų.

Lazerių ($1_1...1_n$) pluoštai 4, sklindantys skirtingais kampais susikerta (persikloja) kvadratinio jautrio medžiagoje, t.y. netiesiniame kristale 3, sudarydami erdvėje tam tikrą amplitudės skirstinį (taip pat galima įsivaizduoti, kad pradiniai pluoštai sudaro vieną sudėtinį pluoštą (Fig.2). Pradinių pluoštų 4 amplitudės skirstinys kvadratinio jautrio medžiagoje t.y. netiesiniame kristale 3 dėl kvadratinio netiesiškumo sužadina suminių dažnių poliarizacines bangas, kurios sudaro atitinkamą amplitudės erdvinį skirstinį. Šios poliarizacinės bangos lokaliai spinduliuoja suminių dažnių bangas, sudarančias atitinkamą amplitudės erdvinį skirstinį. Amplitudės erdvinis skirstinys yra vienareikšmiškai susietas su amplitudės kampiniu skirstiniu (artimas ir tolimas laukai). Suminių dažnių amplitudės kampinis skirstinys parodo kokiomis kryptimis gali būti generuojamos suminių dažnių bangos. Suminių dažnių poliarizacinių bangų išspinduliuojamos šviesos bangų amplitudės kampinis skirstinys yra pirmoji būtina sąlyga sumuojant ir kombinuojant lazerinius pluoštus kvadratinio jautrio medžiagoje, kuri nurodo, kokiomis kryptimis, iš principo, gali būti generuojamos ir kombinuojamos suminių dažnių šviesos bangos. Kita būtina lazerinių pluoštų sumavimo ir kombinavimo sąlyga yra fazinio sinchronizmo sąlyga, apibrėžianti, kurios suminių dažnių poliarizacinių bangų spinduliuojamos šviesos amplitudžių kampinio skirstinio komponentės bus stiprinamos.

Galimi keli lazerinių pluoštų sumavimo ir kombinavimo kvadrato jautrio medžiagose būdai.

Koherentinis lazerinių pluoštų sumavimas ir kombinavimas kvadratinio jautrio medžiagoje. Yra sumuojami du arba daugiau lazerinių pluoštų, vienodų arba skirtingų poliarizacijų. Šiuo atveju pluoštai yra sumuojami ir kombinuojami taip, kad susumuoatų pradinių pluoštų porų suminiai dažniai ir fazės yra vienodos. Pradinių pluoštų dažniai, bendru atveju gali būti skirtingi, tačiau pradinių pluoštų porų suminiai dažniai turi būti lygūs. Vienodų dažnių suminių pluoštų fazės gali būti bet kokios, todėl būtina taikyti kaupinimo lazerinių pluoštų arba suminių dažnių pluoštų aktyvų fazės valdymą tam, kad suminių dažnių pluoštų fazės būtų vienodos ir jie efektingai būtų kombinuojami į vieną pluoštą. Visų suminių pluoštų fazės turi būti vienodos, kad konstruktyviai tarpusavyje interferuotų ir sudarytų bendrą kombinuojamą pluoštą. Koherentiškai sumuojant ir kombinuojant $2N$ lazerinius pluoštus arba N porų ($N=1, 2, 3, \dots$) (kai kurie sumuojami pluoštai gali sutapti ir sudaryti vieną pluoštą) kvadratinio jautrio medžiagoje, pakanka valdyti $N-1$ pluoštų fazes. Galima valdyti kaupinimo pluoštų fazes arba suminių dažnių pluoštų fazes. Minėtu būdu yra sumuojamos lazerinių pluoštų energijos. Sukombinuoto pluošto spektrinis skaistis yra didesnis nei kombinuojamų-kaupinimo pluoštų spektrinis skaistis ir jis proporcingas sumuojamų pluoštų skaičiui $2N$. Koherentiniu kombinavimo atveju, kai pradinių lazerinių pluoštų suminiai dažniai vienodi ir suminių dažnių pluoštų fazės vienodos, tai sukombinuoto pluošto energija yra proporcinga pradinių pluoštų skaičiui $2N$. Jei suminių dažnių pluoštų fazės atsitiktinės, tai sukombinuoto pluošto maksimali energija yra proporcinga visų pradinių pluoštų energijai ($2N$ pluoštų energijai), minimali energija yra lygi nuliui, o vidutinė sukombinuoto pluošto energija yra proporcinga dviejų pradinių pluoštų energijai. Jei kaupinimo ar suminių dažnių pluoštų fazės nėra valdomos, tai vidutinė sukombinuoto pluošto energija yra ne didesnė kaip dviejų pradinių pluoštų energija, nepriklausomai kiek lazerinių pluoštų yra sumuojama ir kombinuojama.

Šito būdo realizacijai reikalingos labai sudėtingos techninės priemonės tam, kad užtikrintų didelio skaičiaus, pavyzdžiui, skaidulinių lazerių ilgalaikį veikimą ir jų tarpusavio fazės išlaikymą. Todėl nekoherentinis procesas yra žymiai praktiškesnis.

Nekoherentinis (spektrinis) lazerinių pluoštų sumavimas ir kombinavimas kvadratinio jautrio medžiagoje. Kita situacija yra nekoherentinis pluoštų porų sumavimas ir kombinavimas kvadratinio jautrio medžiagoje. Ir tai yra mūsų siūlomo sprendimo atvejis. Yra sumuojami du arba daugiau lazerinių pluoštų, vienodų arba skirtingų poliarizacijų. Kai

sumuojami nepriklausomų skaidulinių lazerių impulsai jie visi yra skirtingų bangos ilgių. Pluoštai yra sumuojami poromis taip, kad kiekvienas suminio dažnio pluoštas būtų skirtingo dažnio. Visi suminio dažnio pluoštai sklinda ta pačia kryptimi ir persikloja (persikloja artimame ir tolimame laukose) taip, kad sudarytų bendrą – kombinuotą pluoštą. Pluoštai yra sumuojami ir kombinuojami taip, kad kiekviena sumuojama pluoštų pora tenkina fazinio sinchronizmo sąlygą ir sukombinuoti pluoštai efektingai verčiami į suminio dažnio pluoštą. Fazinio sinchronizmo sąlyga yra pasiekama dvigubo šviesos lūžio rodiklio medžiagoje, periodiškai orientuotose medžiagoje, bangolaidinėse struktūrose, periodiškai orientuotose bangolaidinėse struktūrose ir t.t. Sumuojami kaupinimo pluoštai vienas nuo kito bendru atveju skiriasi sklaidimo kryptimi, kai kurių pluoštų sklaidimo kryptys gali sutapti, ir yra vienodų arba skirtingų poliarizacijų. Taikant nekoherentinį – spektrinį pluoštų sumavimą ir kombinavimą, kvadratinio jautrio terpėje nebūtina išlaikyti tarpusavio sumuojamų lazerinių pluoštų fazes (tarpusavio fazė netenka prasmės, nes kombinuojami skirtingų dažnių suminiai pluoštai). Tačiau turi būti užtikrinta sąlyga, kad nevyktų sumuojamų pluoštų parametrinis stiprinimas susumuotų pluoštų sąskaita. Nekoherentiniu pluoštų sumavimo ir kombinavimo atveju, ši sąlyga yra tenkinama tik tada, kai kiekvienos sumuojamos poros suminiai dažniai nesutampa ir kiekvienam sumuojamam kaupinimo pluoštui neegzistuoja parametrinio stiprinimo fazinio sinchronizmo sąlyga atžvilgiu susumuotų pluoštų. Tarp skirtingų suminių dažnių bangų ir kaupinimo pluoštų nevyksta parametrinė sąveika ir kombinuojami suminiai pluoštai nėra slopinami. Pradinių pluoštų porų, kurios negeneruoja kombinuojamo pluošto (sklinda kita kryptimi nei kombinuojamas pluoštas, arba nepersikloja erdvėje su kombinuojamu pluoštu), dažniai gali sutapti, nes šios poros nedalyvauja pluoštų kombinavime ir dėl to, kad šioms poroms netenkinamos fazinio sinchronizmo sąlygos, jos nėra stiprinamos. Priešingai nei koherentiniu pluoštų porų kombinavimo kvadratinio jautrio medžiagoje atveju, nekoherentiškai sukombinuoto suminių dažnių pluošto spektrinis skaistis nėra didesnis nei atskirų kaupinimo pluoštų. Yra kombinuojama tik pluoštų energija. Minėtu būdu yra sumuojamos lazerinių pluoštų energijos, tačiau spektrinis skaistis susumavus pluoštus nepadidėja.

Galimas ir trečias variantas - tai mišrus (koherentinis ir nekoherentinis) lazerinių pluoštų sumavimas ir kombinavimas kvadratinio jautrio medžiagoje. Mišriu lazerinių pluoštų sumavimo ir kombinavimo atveju yra kombinuojami vienodų ir skirtingų suminių dažnių pluoštai. Aktyvus fazės valdymas taikomas toms kaupinimo pluoštų poroms, kurių suminiai dažniai sutampa.

Kaip pavyzdys, (Fig.3) yra pavaizduotos koherentinio lazerinių pluoštų sumavimo ir kombinavimo kvadratinio jautrio medžiagoje fazinio sinchronizmo kreivės. Kvadratinio jautrio medžiaga yra KTP tūrinis kristalas, šiuo konkrečiu atveju fazinio sinchronizmo sąlyga yra realizuojama dvejo šviesos lūžio rodiklio kvadratinio jautrio medžiagoje. Kristalo išpjovimo kampai atitinkamai yra $\theta=90^\circ$ ir $\varphi=24^\circ$. Netiesinė sąveika yra II-o tipo, taigi kombinuojamų pluoštų porų poliarizacijos yra statmenos. Fazinio sinchronizmo kreivių pora nurodo galimą kaupinimo pluoštų bangos ilgių ir sklaidimo krypčių sąryšį, taip, kad vyktų koherentinis lazerinių pluoštų kombinavimas į vieną pluoštą. Skrituliukais pavaizduotos penkios pradinių (kaupinimo) pluoštų poros. Kaupinimo pluoštų bangos ilgiai parinkti atsitiktiniai, tik iliustracijai. Kaip matyti, visi kaupinimo pluoštai, išskyrus porą A, yra skirtingų dažnių. Tačiau kombinuotą pluoštą sudaro penki suminių dažnių pluoštai, kurių bangos ilgiai yra vienodi, 532 nm. Visų kaupinimo porų suminiai dažniai yra vienodi, nors kaupinimo poras sudaro skirtingo dažnio pluoštai. Būtinas fazės valdymas!

Kombinuotas pluoštas sklinda kryptimi, kurios koordinatės atitinkamai yra $\theta=90^\circ$ ir $\varphi=24^\circ$.

Kitas pavyzdys (Fig. 4) iliustruoja nekoherentinio lazerinių pluoštų sumavimo ir kombinavimo kvadratinio jautrio medžiagoje atvejo fazinio sinchronizmo kreives. Kaip ir ankstesniame pavyzdyje, kvadratinio jautrio medžiaga yra KTP tūrinis kristalas. Kiekviena fazinio sinchronizmo kreivių pora nurodo galimą kaupinimo pluoštų bangos ilgių ir sklaidimo krypčių sąryšį, taip, kad vyktų nekoherentinis šešių lazerinių pluoštų kombinavimas į vieną pluoštą. Kiekviena kaupinimo pora atitinka atskirą fazinio sinchronizmo kreivių porą. Bangos ilgiai, atitinkantys vieną sinchronizmo kreivių porą, atitinka vieną suminio dažnio bangos ilgį. Kombinuotą pluoštą sudaro trys suminių dažnių pluoštai, kurių bangos ilgiai atitinkamai yra 525 nm, 535 nm ir 545 nm. Nekoherentiniu lazerinių pluoštų sumavimo ir kombinavimo atveju negali būti daugiau kaip viena kaupinimo pora atitinkanti vieną fazinio sinchronizmo kreivių porą tam, kad nebūtų vienodų suminių dažnių pluoštų (viena fazinio sinchronizmo kreivių pora atitinka įvairias kaupinimo pluoštų dažnių kombinacijas taip, kad suminis dažnis bet kuriai poros kombinacijai yra vienas ir tas pats). Nekoherentinio lazerinių pluoštų sumavimo ir kombinavimo atveju visų pradinių pluoštų porų suminiai dažniai turi būti skirtingi. Kombinuotas pluoštas sklinda kryptimi, kurios koordinatės atitinkamai yra $\theta=90^\circ$ ir $\varphi=24^\circ$.

Lygiagretus suminių dažnių lazerinių pluoštų kombinavimas kvadratinio jautrio medžiagoje. Lygiagretusis suminių dažnių kombinavimas yra toks kombinavimas, kai poromis sumuojami pradiniai pluoštai 4 ir tuo pačių metu suminiai pluoštai 5 kombinuojami į vieną lazerinį pluoštą 6 (Fig. 5). Pradinių pluoštų 4 sumavimas poromis ir suminių dažnių pluoštų 5 kombinavimas vyksta tuo pačiu metu, toje pačioje kvadratinio jautrio medžiagoje t.y. netiesiniame kristale 3.

Nuoseklusis suminių dažnių pluoštų kombinavimas kvadratinio jautrio medžiagoje. Fig.6 pavaizduotas nuoseklusis suminių dažnių pluoštų kombinavimas, kai kiekviena nauja pradinių pluoštų pora susumuojama ir sukombinuojama atskirose nuosekliai išdėstytose kvadratinio jautrio medžiagose t.y. netiesiniuose kristaluose ($3...3^n$). Pirmame netiesiniame kristale (3) yra susumuojama pirmoji pradinių pluoštų 4 pora į suminio dažnio pluoštą 5. Kristalo 3 išėjime gautas suminio dažnio lazerinis pluoštas 6 yra kombinuojamas kitame netiesiniame kristale 3' su kitos pradinių lazerinių pluoštų 4' poros suminio dažnio pluoštu 5', o kristalo 3' išėjime gautas sukombinuotas lazerinis pluoštas 6' toliau kombinuojamas netiesiniame kristale 3'' su dar kitos pradinių pluoštų 4'' poros suminio dažnio pluoštu 5'', išėjime gaunant sukombinuotą lazerinį pluoštą 6'' ir taip toliau, kol yra susumuojami poromis visi pradiniai pluoštai ir sukombinuojami visi suminių dažnių pluoštai į vieną pluoštą. Nuoseklusis suminių dažnių pluoštų kombinavimas gali vykti ir vienoje kvadratinio jautrio medžiagoje pvz. viename netiesiniame kristale 3, sumuojant poromis pradinius lazerinius pluoštus skirtingose tos pačios medžiagos vietose (Fig.7).

Mišrus (lygiagretus ir nuoseklus) suminių dažnių pluoštų kombinavimas kvadratinio jautrio medžiagoje (Fig.8). Mišrus suminių dažnių kombinavimas yra toks kombinavimas, kai sumuojamų poromis pradinių lazerinių pluoštų (4, 4') porų suminių dažnių pluoštai (5, 5') kombinuojami lygiagrečiai ir nuosekliai. Mišrus suminių dažnių kombinavimas galimas tik tada, kai yra sumuojama ir kombinuojama ne mažiau kaip trys pradinių pluoštų poros. Pirmoje kvadratinio jautrio medžiagoje t.y. netiesiniame kristale (3) yra koherentiškai ir lygiagrečiai sumuojamos ir kombinuojamos dvi pradinių lazerinių pluoštų 4 poros. Kadangi abiejų kaupinimo porų suminiai dažniai vienodi, todėl vieno kaupinimo pluošto fazė yra valdoma pluošto fazės valdikliu 9, kad abu suminių dažnių pluoštai būtų vienodos fazės ir jie konstruktyviai suinterferuotų. Toliau, sekančioje kvadratinio jautrio medžiagoje 3' yra sumuojamos kitos dvi pradinių pluoštų 4' poros, kurios tarpusavyje kombinuojamos lygiagrečiai, o su anksčiau sukombinuotu suminio dažnio pluoštu 5 yra kombinuojama

nuosekliai. Antrame netiesiniame kristale 3'vienos kaupinimo poros suminis dažnis sutampa su prieš tai primame kristale 3 sukombinuoto pluošto dažniu, todėl pluošto fazės valdikliu 10 būtina valdyti pluošto fazę. Šiuo atveju yra valdoma sukombinuoto, suminio dažnio pluošto 5 fazė. Be abejo, galima valdyti bet kurio kito, antrame kristale 3' sumuojamų poroje pradinių pluoštų 4' fazę. Sukombinuotas pluoštas 6' susideda iš keturių suminių pluoštų, iš jų, trijų pluoštų dažniai yra vienodi.

Pluoštų sumavimas ir kombinavimas vyksta netiesiniame kristale, būtent kvadratinio jautrio medžiagoje, susumuojant pluoštus poromis į suminio dažnio pluoštus ir šiuos suminio dažnio pluoštus sukombinuojant į vieną suminių dažnių pluoštą. Pluoštų sumavimas ir kombinavimas kvadratinio jautrio medžiagoje gali būti koherentinis arba nekoherentinis (spektrinis). Koherentiniu atveju pluoštai yra sumuojami ir kombinuojami taip, kad susumuočių kaupinimo pluoštų porų suminiai dažniai ir fazės yra vienodos. Nekoherentiniu atveju kaupinimo pluoštai yra sumuojami poromis taip, kad visi suminio dažnio pluoštai, sudarantys kombinuojamą pluoštą, būtų skirtingų dažnių.

Pradinių pluoštų porų suminių dažnių pluoštai gali būti kombinuojami lygiagrečiai ir nuosekliai. Lygiagretusis suminių dažnių kombinavimas yra toks kombinavimas, kai yra sumuojamos pradinių pluoštų poros ir tuo pačiu metu kombinuojami suminių dažnių pluoštai į vieną lazerinį pluoštą. Nuoseklusis suminių dažnių kombinavimas yra toks kombinavimas, kai yra susumuojama viena kaupinimo pluoštų pora į suminio dažnio pluoštą, po to šis suminio dažnio pluoštas yra kombinuojamas su kitos sumuojamos kaupinimo poros suminio dažnio pluoštu ir taip toliau, kol yra susumuojamos visos kaupinimo poros ir sukombinuojami visi suminių dažnių pluoštai į vieną pluoštą.

Pluoštų sumavimas ir kombinavimas kvadratinio jautrio medžiagoje yra galimas, kai sumuojamos ir kombinuojamos ne mažiau kaip dvi pradinių pluoštų poros (keturi pluoštai) arba kai sumuojama viena pradinių pluoštų pora ir ji kombinuojama su kitu lazeriniu pluoštu, kuris persikloja (tolimame ir artimame laukose) su suminio dažnio pluoštu. Viena pradinių pluoštų pora gali būti tik sumuojama (vektorinė arba skaliarinė suminio dažnio arba antros harmonikos generacija), bet ji nėra su niekuo kombinuojama. Turi būti kitas pluoštas su kuriuo yra kombinuojamas suminio dažnio pluoštas.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

LAZERINIŲ PLUOŠTŲ KOMBINAVIMO BŪDAS IR ĮRENGINYS

1. Lazerinių pluoštų kombinavimo būdas, apimantis kelių pradinių lazerinių pluoštų nukreipimą į optinę netiesinę terpę, kurioje vyksta pluoštų kombinavimas, gaunant pakeisto bangos ilgio vieną lazerinį pluoštą, besiskiriantis tuo, kad optinė netiesinė terpė yra kvadratinio jautrio medžiaga, kurioje pradiniai lazeriniai pluoštai, panaudojant netiesinę sąveiką, sumuojami poromis, sudedant jų dažnius, o suminio dažnio pluoštai, tenkinant fazinio sinchronizmo sąlygą, kombinuojami į vieną pluoštą, kur į minėtą kvadratinio jautrio medžiagą nukreipia lyginį skaičių pradinių lazerinių pluoštų, mažiausiai du.
2. Būdas pagal 1 punktą, besiskiriantis tuo, kad kvadratinio jautrio medžiagą parenka iš netiesinių kristalų, tokių kaip KTP, LBO, DKDP, periodiškai orientuotų medžiagų PPLN, PPKTP ir kitų.
3. Būdas pagal bet kurį iš ankstesniųjų punktų, besiskiriantis tuo, kad kiekvieną pradinį lazerinį pluoštą kolimuoja, o po to jį fokusuoja į netiesinį kristalą.
4. Būdas pagal bet kurį iš ankstesniųjų punktų, besiskiriantis tuo, kad lazerinių pluoštų sumavimą ir kombinavimą vykdo lygiagrečiai vienoje kvadratinio jautrio medžiagoje.
5. Būdas pagal bet kurį iš 1-3 punktų, besiskiriantis tuo, kad lazerinių pluoštų minėtą sumavimą ir kombinavimą vykdo nuosekliai panaudojant vieną arba keletą atskirų kvadratinio jautrio medžiagų.
6. Būdas pagal bet kurį iš 1-3 punktų, besiskiriantis tuo, kad minėtus lazerinius pluoštus sumuoja ir kombinuoja mišriu (nuosekliu ir lygiagrečiu) būdu panaudojant vieną arba keletą atskirų kvadratinio jautrio medžiagų.
7. Būdas pagal bet kurį iš 4-6 punktų, besiskiriantis tuo, kad tuo pačiu metu sumuojami ir kombinuojami minėti lazeriniai pluoštai tarpusavyje yra nekolinearūs, tačiau gali būti kolinearūs su pluoštais, sumuojamais nuosekliai kituose etapuose.

8. Būdas pagal bet kurį iš ankstesniųjų punktų, besiskiriantis tuo, kad į netiesinę kvadratinio jautrio medžiagą nukreipia vienodo bangos ilgio nekoherentinius pradinius lazerinius pluoštus.
9. Būdas pagal 8 punktą, besiskiriantis tuo, kad kvadratinio jautrio medžiagoje lazerinių pluoštų porų generuojamas suminis dažnis yra antroji harmonika.
10. Būdas pagal bet kurį iš 1-7 punktų, besiskiriantis tuo, kad į netiesinę kvadratinio jautrio medžiagą nukreipia nekoherentinius pradinius lazerinius pluoštus, kurių bangos ilgiai gali būti skirtingi.
11. Būdas pagal 10 punktą, besiskiriantis tuo, kad poroje esančių sumuojamų lazerinių pluoštų bangos ilgiai yra vienodi, tačiau skiriasi nuo pluoštų bangos ilgių nuosekliai sumuojamų kitose porose.
12. Būdas pagal 10 punktą, besiskiriantis tuo, kad poroje esančių sumuojamų lazerinių pluoštų bangos ilgiai yra skirtingi, bet nesiskiria nuo pluoštų bangos ilgių nuosekliai sumuojamų kitose porose.
13. Lazerinių pluoštų kombinavimo įrenginys, apimantis kelis lazerius, kurių pluoštai yra nukreipti į optinę netiesinę terpę, skirtą vykdyti pluoštų kombinavimą, išėjime gaunant pakeisto bangos ilgio lazerinį pluoštą, besiskiriantis tuo, kad optinė netiesinė terpė yra kvadratinio jautrio medžiaga, kurioje lazeriniai pluoštai, panaudojant netiesinę sąveiką, sumuojami poromis, sudedant jų dažnius, o suminio dažnio pluoštai, tenkinant fazinio sinchronizmo sąlygas, kombinuojami į vieną pluoštą.
14. Įrenginys pagal 13 punktą, besiskiriantis tuo, kad lazeriai yra skaiduliniai lazeriai.
15. Įrenginys pagal 13 arba 14 punktą, besiskiriantis tuo, kad kvadratinio jautrio medžiaga yra parinkta iš netiesinių kristalų, tokių kaip KTP, LBO, DKDP, periodiškai orientuotų medžiagų PPLN, PPKTP ir kitų, o kiekvieno lazerio pluoštas yra nukreiptas į netiesinį kristalą per kolimatorių.

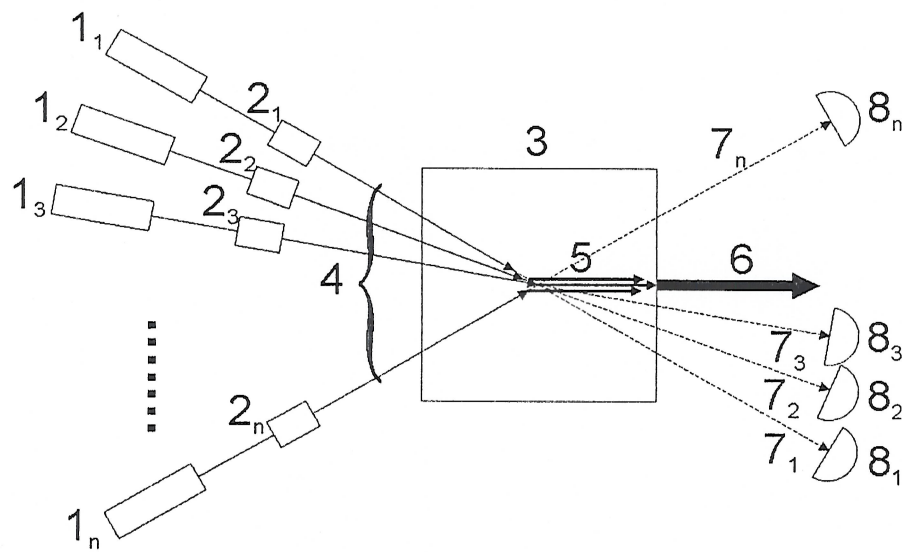


Fig. 1

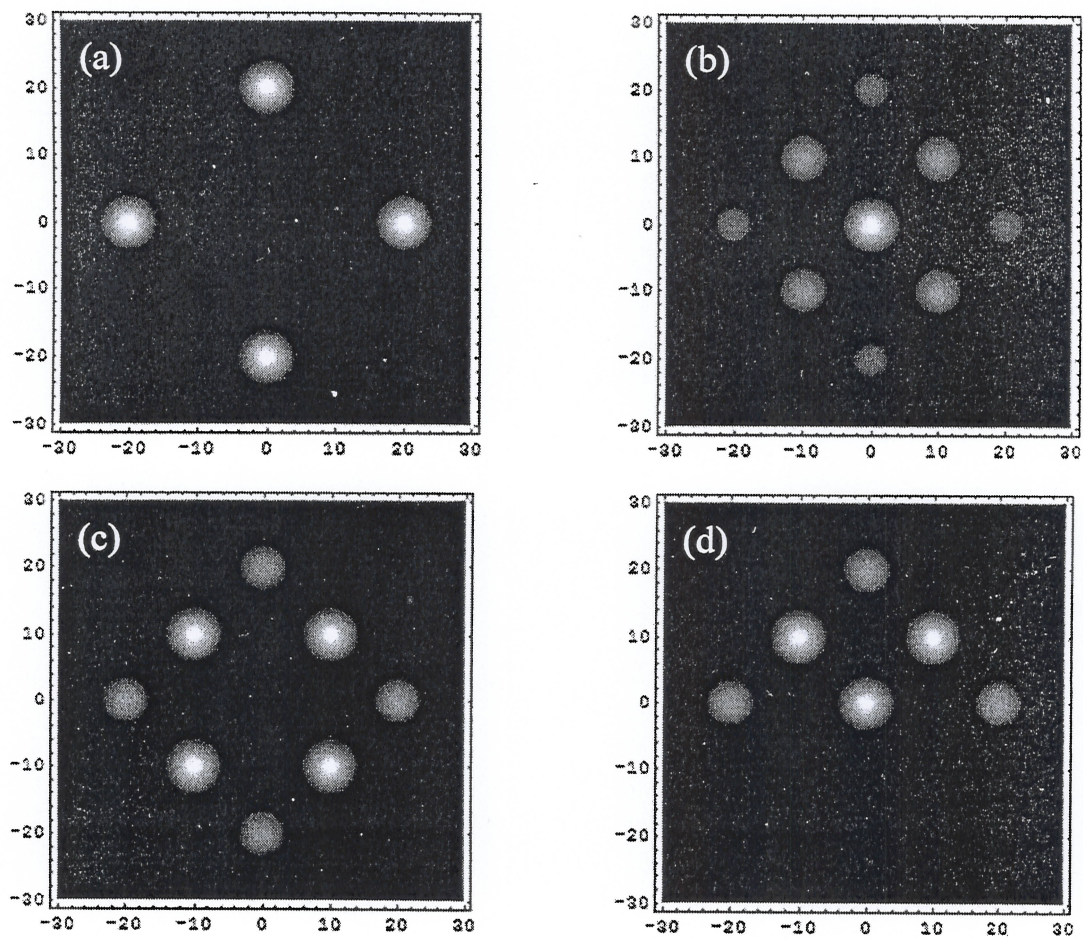


Fig. 2

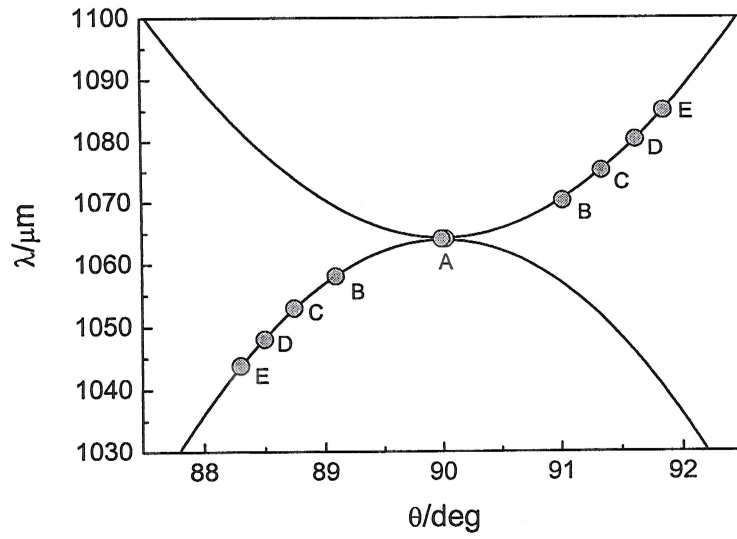


Fig. 3

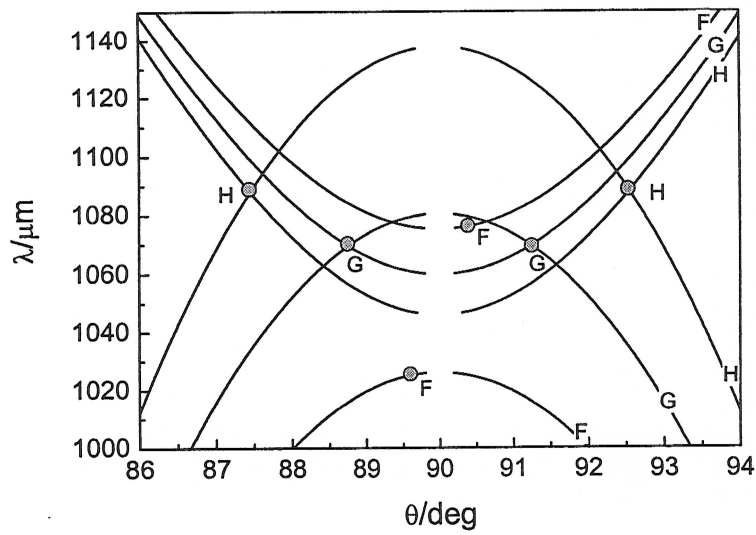


Fig. 4

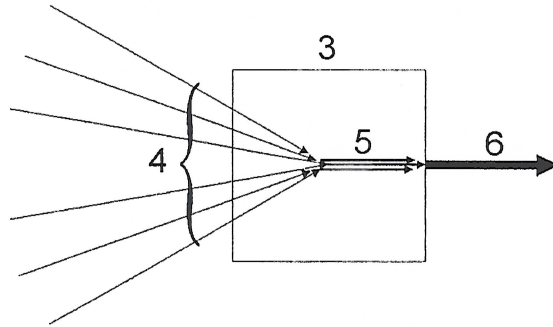


Fig. 5

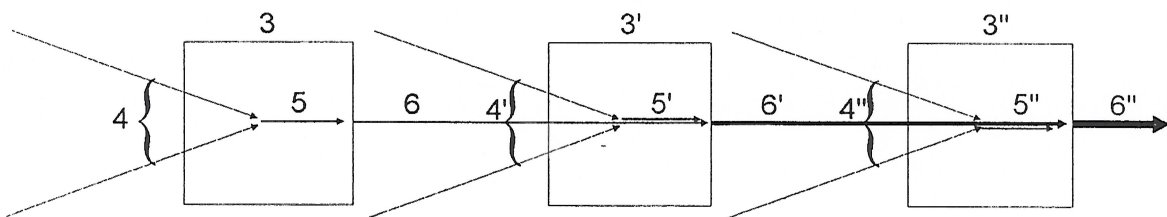


Fig. 6

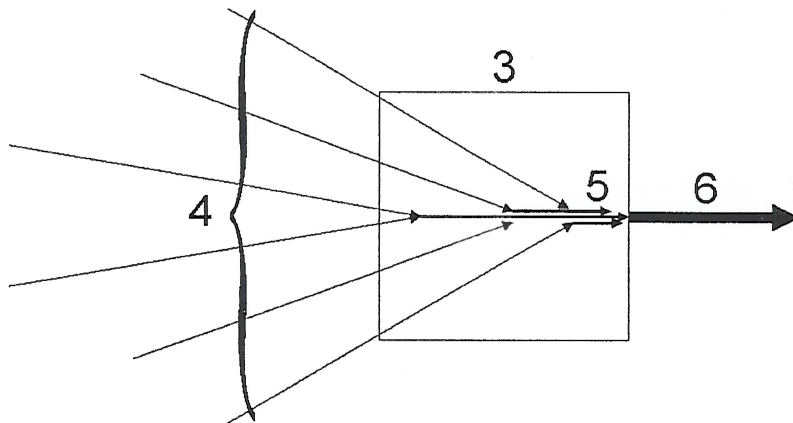


Fig. 7

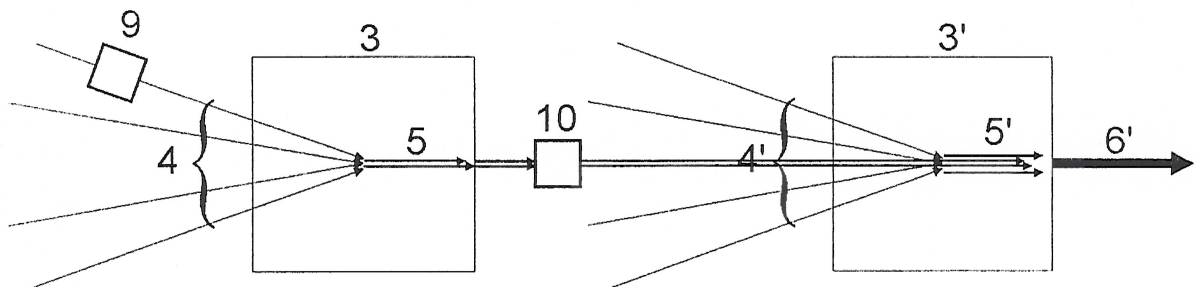


Fig. 8

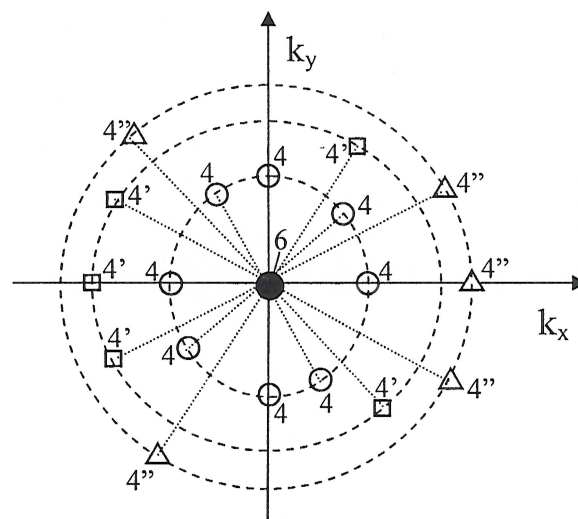


Fig. 9