

- (11) Patento numeris: **6832** (51) Int. Cl. (2021.01): **G02F 1/00**
G02B 17/00
- (21) Paraiškos numeris: **2019 523**
- (22) Paraiškos padavimo data: **2019-09-25**
- (41) Paraiškos paskelbimo data: **2021-04-12**
- (45) Patento paskelbimo data: **2021-08-10**
- (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:
Rimantas BUDRIŪNAS, LT
- (73) Patento savininkas:
VILNIAUS UNIVERSITETAS, Universiteto g. 3, LT-01513 Vilnius, LT
- (74) Patentinis patikėtinis/atstovas:
Jurga PETNIŪNAITĖ, AAA Law, A. Goštauto g. 40B, Verslo centras „Dvyniai“, LT-03163 Vilnius, LT

- (54) Pavadinimas:
Daugiapakopis parametrinis šviesos stiprinimo būdas ir daugiapakopis stiprintuvas

- (57) Referatas:

Daugiapakopis parametrinis šviesos stiprinimo būdas apima kaupinimo bangos ir signalo bangos praleidimą pro signalinės bangos stiprinimo priemonę ir šalutinės bangos atskyrimą nuo kaupinimo bangos ir signalo bangos sklaidimo trajektorijos tarp viena po kitos išdėstytų signalinės bangos stiprinimo priemonių. Po kaupinimo bangos ir signalo bangos praleidimo pro bent vieną signalo stiprinimo priemonę, kaupinimo bangos ir signalo bangos, arba susiformavusios šalutinės bangos parametrai yra modifikuojami bent viena modifikavimo priemonė. Daugiapakopis parametrinis šviesos stiprintuvas apima kaupinimo bangos ir signalo bangos stiprinimo priemonę, bei kaupinimo bangos ir signalo bangos arba šalutinės bangos bent vieną modifikavimo priemonę.

Technikos sritis

Išradimas yra susijęs su parametriniu šviesos stiprinimo būdu ir stiprintuvu, o tiksliau su daugiapakopiu parametriniu šviesos stiprinimu ir daugiapakopiu stiprintuvu su netiesiniais kristalais.

Technikos lygis

Parametriniai šviesos stiprintuvai plačiausiai naudojami fundamentiniuose mokslo tyrimuose, kai reikalingi šviesos impulsai, pasižymintys parametrais, kurių negalima tiesiogiai pasiekti naudojant lazerinius šaltinius. Parametrinių stiprintuvų efektyvumo gerinimas gali būti ypatingai aktualus tais atvejais, kai eksperimente reikalinga kelių lygių parametrinio stiprinimo schema (parametrinis stiprintuvas kaupinamas spinduliuote, sugeneruota parametriniame stiprintuve), taip pat tada, kai siekiama gauti itin didelę parametrinių bangų galią (esant geresniam stiprinimo efektyvumui, reikiamą parametrinių bangų galią galima pasiekti su mažesnės galios kaupinimo lazeriu).

Parametrinis šviesos stiprinimas yra plačiai nagrinėtas mokslinėje literatūroje. Daug dėmesio skirta parametrinių stiprintuvų stiprinimo juostos pločiui bei derinimo sritims, tačiau absoliučioje daugumoje literatūroje aptartų schemų parametrinių stiprintuvų energinis efektyvumas (kaupinimo bangos energijos dalis, perduota signalinei bangai) siekia 10-30%. Yra aprašyti vienetiniai atvejai, kuriais efektyvumas kiek viršija šias vertes, tačiau dažniausiai tai pasiekama naudojant hipergausinius (plokščios viršūnės) lazerių pluoštus, kurie lazerių technikoje gan reti ir sunkiau pritaikomi praktiškai dėl prastesnių sklidimo bei fokusavimosi savybių, lyginant su Gauso pluoštais.

Pagrindinis faktorius, ribojantis energijos keitimo efektyvumą trumpais impulsais kaupinamuose parametriniuose stiprintuvuose, yra atgalinė konversija. Vykstant parametriniam stiprinimui, kartu su signalinės bangos stiprinimu yra generuojama šalutinė banga (kiekvienas sunaudotas kaupinimo bangos fotonas skyla į vieną signalinės bangos fotoną ir vieną šalutinės bangos fotoną). Praktikoje beveik visais atvejais kaupinimo ir signalinės bangos pasižymi erdvine ir laikine intensyvumo moduliacija, tai yra, didesnio ir mažesnio intensyvumo sritimis. Kadangi kaupinimo bangos fotonų vertimo į signalinės ir šalutinės bangų fotonus sparta priklauso nuo lokalaus kaupinimo ir signalinės bangos intensyvumo, skirtingose

kaupinimo bangos erdvinėse/laikinėse srityse procesas vyksta nevienodai sparčiai. Kaupinimo ir signalo bangoms sklindant per kristalą, srityse, kuriose pradinis kaupinimo bangos intensyvumas buvo didžiausias, procesas įvyksta greičiausiai (bangoms nusklidus mažiausią atstumą kristale), o kitose srityse vėluoja (kai didžiausio intensyvumo srityje jau būna iškeisti visi kaupinimo fotonai, mažesnio intensyvumo srityse būna iškeisti dar ne visi). Pilnai nuskurdintose kaupinimo impulsinio pluošto srityse signalinė ir šalutinė bangos pradeda vėl sumuotis į naują kaupinimo bangą, kai tuo tarpu kitose impulsinio pluošto dalyse kaupinimo banga dar būna nenuskurdinta ir nepilnai iškeista į signalinę ir šalutinę bangas. Tokiu būdu standartinėse parametrinio stiprinimo schemose, kaupinamose Gauso formos pluoštais ir Gauso formos impulsais, neįmanoma pasiekti, kad visa kaupinimo bangos energija būtų iškeista į signalinę ir šalutinę bangas: jei procesas sustabdomas (parinkus netiesinio kristalo storį ir bangų intensyvumus) tada, kai iškeičiamos intensyviausios pluošto/impulso sritys, mažesnio intensyvumo srityse kaupinimo energija dar neperduota signalui; jei procesas tęsiamas taip (pvz., parinkus ilgesnį kristalą), kad būtų iškeistos mažesnio intensyvumo sritys, srityse, kurios jau buvo iškeistos, (kur visa kaupinimo bangos energija jau sunaudota), signalinė ir šalutinė bangos pradeda generuoti suminį dažnį – grąžinti energiją į kaupinimo bangą, ir bendra signalinės bangos energija iš esmės nustoja didėti.

Moksliniame darbe *Ying Li, Haizhe Zhong, Jianlong Yang, Shiwei Wang, and Dianyuan Fan, „Versatile backconversion-inhibited broadband optical parametric amplification based on an idler-separated QPM configuration“, Optics Letters Vol. 42, Issue 14, pp. 2806-2809 (2017)*, kuris yra laikomas artimiausiu analogu, yra nagrinėjamas parametrinių stiprintuvų efektyvumo didinimo būdas sukuriant tokias sąlygas, kad atgalinė konversija negalėtų vykti. Būdas apima stiprinimo kristalo su periodiškai orientuota kristalo struktūra panaudojimą. Minėtoji periodiškai orientuota struktūra yra pasukta dideliu kampu į signalinės ir kaupinimo bangų sklaidimo kryptį. Tokiu būdu pasiekama, kad šalutinė banga sklistų kita kryptimi nei kaupinimas ir signalinė banga. Minėti kristalai yra sustatyti nuosekliai su pakankamo dydžio tarpais tarp jų. Tokiu būdu yra pasiekama, kad viename kristale sugeneruota šalutinė banga nepakliūtų į kitą kristalą. Šio būdo pagrindinis trūkumas yra būtinybė naudoti kristalus su periodiškai orientuotais $\chi^{(2)}$ domenais: minėti kristalai turi labai ribotą apertūrą, apie 1-2mm, todėl ši technologija netinka naudoti su didelės energijos lazerių

impulsais.

Kitame darbe *Wenqi Li, Chun Peng, Lu Xu, Lianghong Yu, and Xiaoyan Liang*, „*Optimizing the performance of non-collinear optical parametric chirped pulse amplification via multi-pass structure based on two geometry configurations*“, yra nagrinėjamas daugiaėgis parametrinis stiprintuvas, kurio schema yra artima regeneraciniam stiprintuvams, naudojamiems lazeriuose, be to, yra naudojama nekolieari parametrinė sąveika, dėl ko kiekvieno rezonatoriaus apėjimo metu šalutinė banga yra išmetama iš rezonatoriaus ir nedalyvaudavo tolimesnėje sąveikoje. Pagrindinis šio stiprintuvo trūkumas yra labai sudėtinga schema, o stiprinami impulsai yra nanosekundžių eilės trukmės. Be to, atsiranda nuostoliai ir pluoštų persiformavimas dėl sklidimo rezonatoriuje, efektai dėl netiesinio lūžio rodiklio; be to, schemoje naudojamų Pokelso elementų ir banginių plokštelių spektrinė juosta yra ribota. Verta pažymėti, jog darbe pateikiami tik teorinio modeliavimo rezultatai.

Moksliniuose darbuose *Jingui Ma, Jing Wang, Peng Yuan, Guoqiang Xie, Kainan Xiong, Yifan Tu, Xiaoniu Tu, Erwei Shi, Yanqing Zheng, and Liejia Qian*, „*Quasi-parametric amplification of chirped pulses based on a Sm³⁺-doped yttrium calcium oxyborate crystal*“, *Optica Vol. 2, Issue 11, pp. 1006-1009 (2015)* ir *Jingui Ma, Jing Wang, Bingjie Zhou, Peng Yuan, Guoqiang Xie, Kainan Xiong, Yanqing Zheng, Heyuan Zhu, and Liejia Qian*, „*Broadband, efficient, and robust quasi-parametric chirped-pulse amplification*“, *Optics Express Vol. 25, Issue 21, pp. 25149-25164 (2017)* yra pademonstruota, kad parametrinio stiprinimo kristalą legiruojant medžiaga, kuri sukelia sugertį šalutinei bangai, galima pasiekti ženkliai didesnį efektyvumą nei standartiniame parametriniame stiprintuve. Tačiau tokia stiprintuve galima tikėtis stipraus kristalo kaitimo, kuris didelės vidutinės galios lazerinėse sistemose yra labai nepageidaujamas, nes destabilizuoja sistemų veikimą.

Išradimas neturi aukščiau išvardintų trūkumų susijusių su parametrinio šviesos stiprinimo efektyvumo didinimu ir apima papildomus privalumus.

Išradimo esmė

Išradimo esmę sudaro bent vienos parametrinio stiprinimo priemonės, tokios kaip netiesinio kristalo su bent viena parametrinio stiprinimo sritimi, derinimą su kaupinimo, signalo ir šalutinės bangos parametrų modifikavimo priemone tam, kad

būtų pašalinta stiprintuve generuojama šalutinė banga ir/arba pakeistos tribangės sąveikos sąlygos taip, kad šalutinė banga negalėtų toliau dalyvauti netiesinėje sąveikoje. Kadangi atgalinė konversija vyksta tik tada, kai signalinė ir šalutinė bangos pradeda sumuotis, šalutinės bangos pašalinimas užtikrina, jog atgalinė konversija nebevyks, ir energijos mainai tarp kaupinimo ir signalinės bei šalutinės bangų vyks tik į vieną pusę – signalinės bangos naudai ir kartą į signalinę bangą iškeisti fotonai į kaupinimo bangą nebegrįš. Tokiu būdu, užtikrinant energijos mainų vienakryptiškumą, galima padidinti kaupinimo energijos dalį, perduodamą signalinei bangai.

Trumpas brėžinių aprašymas

Kiti išradimo požymiai ir privalumai yra aprašomi detaliame išradimo aprašyme, su nuoroda į žemiau pateiktus brėžinius:

1 pav. yra pavaizduota parametrinio stiprinimo, pagal išradimą, pirmo įgyvendinimo pavyzdžio principinė schema, kai naudojamos kelios stiprinimo priemonės, tokios kaip netiesiniai kristalai, tarp kurių yra įterptos modifikavimo priemonės, tokios kaip dvejetainiai kristalai, kuriose šalutinė banga pavėlinama kaupinimo ir signalinės bangos atžvilgiu.

2 pav. yra pavaizduota parametrinio stiprinimo, pagal išradimą, antro įgyvendinimo pavyzdžio principinė schema, kuriame stiprinimo priemonės yra netiesiniai kristalai, kurių kiekvienas netiesinis kristalas yra skirtingos orientacijos ir parametru tam, kad kiekviename netiesiniame kristale, po pirmojo netiesinio kristalo, vyktų skirtingos netiesinės sąveikos.

3 pav. yra pavaizduota parametrinio stiprinimo, pagal išradimą, trečio įgyvendinimo pavyzdžio principinė schema, kur stiprinimo priemonės yra netiesiniai kristalai, tarp kurių skirtingą banga pašalinama modifikavimo priemonėmis - dichroiniais veidrodžiais.

4 pav. yra pavaizduota parametrinio stiprinimo, pagal išradimą, ketvirto įgyvendinimo pavyzdžio principinė schema, šalutinė banga yra pašalinama naudojant modifikavimo priemonę iš dichroinių veidrodžių porų, o kaupinimo ir signalinės bangos yra keletą kartų pasiunčiamos į tą pačią stiprinimo priemonę, kuri yra netiesinis kristalas.

5 pav. yra pavaizduota parametrinio stiprinimo, pagal išradimą, penkto

įgyvendinimo pavyzdžio principinė schema, kur vienoje stiprinimo priemonėje, kuri yra netiesinis kristalas, yra suformuotos bent dviejų skirtingų optinių savybių sritys: pirmų savybių sritis arba sritys atlieka stiprinimo srities arba sričių funkciją; antrų savybių sritis arba sritys atlieka modifikavimo priemonės funkciją, kurios neleidžia vienoje parametrinio stiprinimo srityje sugeneruotai šalutinei bangai patekti į kitą parametriniam stiprinimui skirtą sritį.

6 pav. Yra pavaizduota parametrinio stiprinimo, pagal išradimą, šešto įgyvendinimo pavyzdžio principinė schema, kai naudojamos kelios stiprinimo priemonės, tokios kaip netiesiniai kristalai, tarp kurių įterptos modifikavimo priemonės, tokios kaip dvejetainiai kristalai, kuriose vėlinimas tarp kaupinimo, signalinės ir šalutinės bangų organizuojamas taip, kad pirmoje stiprinimo terpėje sugeneruota šalutinė banga likusiose stiprinimo terpėse būtų stiprinama kaip signalinė banga, o signalinės bangos būtų pavėlinamos kitų bangų atžvilgiu.

Išsamus išradimo įgyvendinimo būdų aprašymas

Turėtų būti suprantama, kad daugybė konkrečių detalių yra išdėstytos, siekiant pateikti pilną ir suprantamą išradimo pavyzdinio įgyvendinimo aprašymą. Tačiau srities specialistui bus aišku, kad išradimo įgyvendinimo pavyzdžių detalumas neapriboja išradimo įgyvendinimo, kuris gali būti įgyvendintas ir be tokių konkrečių nurodymų. Gerai žinomi būdai, procedūros ir sudedamosios dalys nebuvo detaliai aprašyti, kad išradimo įgyvendinimo pavyzdžiai nebūtų klaidinantys. Be to, šis aprašymas neturi būti laikomas apribojančiu pateiktus įgyvendinimo pavyzdžius, o tik kaip jų įgyvendinimas.

Nors išradimo įgyvendinimo pavyzdžiai, ar jų aspektai, taip kaip parodyti ir aprašyti, apima daugybę komponentų, kurie yra pavaizduoti esantys tam tikroje bendroje erdvėje ar vietoje, kai kurie komponentai gali būti ir nutolę. Taip pat turėtų būti suprantama, kad pateikti pavyzdžiai neapsiriboja tik aprašytais komponentais ir apima ir kitus, jų funkcionavimui ir sąveikai su kitais komponentais, reikalingus elementus, kurių buvimas yra savaime suprantamas, todėl nedetalizuojamas.

Parametrinis šviesos stiprinimas pagal išradimą apima įeinančios kaupinimo bangos ir signalo bangos praleidimą pro vieno arba daugiau netiesinių kristalų vieną arba daugiau stiprinimo sričių ir iš tokios stiprinimo srities išėjusios kaupinimo bangos, signalo bangos ir šalutinės bangos parametrų modifikavimą modifikavimo

priemone.

Visais išradimo įgyvendinimo atvejais, kiekvienoje netiesinio kristalo stiprinimo srityje vyksta optinis parametrinis stiprinimas. Šio proceso kurio metu kaupinimo bangos energija yra perduodama į signalo bangą, kartu generuojant šalutinę bangą.

Visais išradimo įgyvendinimo atvejais kiekviena modifikavimo priemonė atskiria šalutinę bangą nuo kaupinimo ir signalo bangų, pavyzdžiui, pakeičiant šalutinės bangos sklidimo kryptį. Kiekviena modifikavimo priemonė taip pat modifikuoja šalutinės bangos, kaupinimo bangos ir/arba signalo bangos parametrus taip, kad sekančioje stiprinimo srityje, į kurią patenka kaupinimo ir signalo bangos, po sąveikos su modifikavimo priemone, vyktų sąveika tik tarp kaupinimo bangos ir signalo bangos, o ankstesnėje ar ankstesnėse stiprinimo srityse atsiradusios šalutinės bangos tolimesnėse sąveikose nebedalyvautų.

Visais išradimo įgyvendinimo atvejais netiesinio kristalo rūšies parinkimas iš esmės niekuo nesiskiria nuo kristalo parinkimo procedūros, naudojamos standartiniuose parametriniuose stiprintuvuose: kristalas turi būti skaidrus kaupinimo bangos, signalo bangos ir šalutinės bangos ilgiams, pasižymėti pakankamu $\chi^{(2)}$ (antros eilės) optiniu netiesiškumu, bei užtikrinti fazinio sinchronizmo sąlygas efektyviai kaupinimo bangos ir signalo bangos sąveikai. Netiesiniai kristalai gali būti, pavyzdžiui, tačiau neapsiribojant: BaB_2O_4 , LiB_3O_5 , KTiOAsO_4 , KTiOPO_4 , LiNbO_3 , GaSe kristalai.

Vienu išradimo įgyvendinimo atveju, ir kaip parodyta 1 paveiksle, pirma stiprinimo priemonė ($\text{ST}_{\text{NK1.1.}}$) yra netiesinis kristalas, o už jo išdėstyta modifikavimo priemonė ($\text{MT}_{\text{DK1.1.}}$) yra dvejetainis kristalas. Tokioje schemoje gali būti išdėstyta daugiau negu vienas netiesinis kristalas ($\text{ST}_{\text{NK1.1.}}$, $\text{ST}_{\text{NK1.2.}}$, $\text{ST}_{\text{NK1.3.}}$), už kurio, arba tarp kurių, bent vienas dvejetainis kristalas ($\text{MT}_{\text{DK1.1.}}$, $\text{MT}_{\text{DK1.2.}}$). Parametrinio stiprintuvo signalinė (SB) ir kaupinimo (KB) bangos yra suvedamos į netiesinį kristalą, kuriame signalinė banga yra stiprinama iki tam tikra kaupinimo energijos dalis yra iškeičiama į signalinę bangą (5-10%), tačiau nepasiekiant atgalinės konversijos.

Didžiojoje daugumoje praktikoje naudojamų parametrinio stiprinimo schemų, kaupinimo bangos poliarizacija yra statmena signalinės ir/arba šalutinės bangų poliarizacijoms. Jei kaupinimo bangos poliarizacija sutampa su šalutinės bangos

poliarizacija, tačiau skiriasi nuo signalinės bangos poliarizacijos, galima parinkti tokius dvejopalaužio kristalo parametrus (medžiagą, storį ir išpjovimo kampą), kad, jį pastačius už netiesinio kristalo, signalinė banga atsidurtų po nenuskurdinta kaupinimo impulso dalimi, o šalutinės bangos impulsas laike būtų paslinktas taip, kad nepersiklotų nei su signaliniu, nei su kaupinimo impulsu, kai pavaizduota 1 paveiksle. Dvejopalaužių kristalų orientacijos ir/arba išpjovimo kampai turi būti parinkti tokie, kad *nebūtų* išpildomos fazinio sinchronizmo sąlygos parametriniam stiprinimui ar kitoms netiesinėms sąveikoms tarp stiprinamų bangų, dėl chromatinės dispersijos, šalutinės bangos impulsas laike atsiskirtų nuo signalinio impulso, o dėl dvejopo lūžio kaupinimo impulsas neatsiskirtų nuo signalinio impulso. Šitaip išrūšiuojant impulsus ir išdėsčius stiprinimo ($ST_{NK1.1.}$, $ST_{NK1.2.}$, $ST_{NK1.3.}$) ir modifikavimo priemones ($MT_{DK1.1.}$, $MT_{DK1.2.}$) kaip pavaizduota 1 paveiksle, antrame netiesiniame kristale ($ST_{DK1.2.}$) toliau vyksta parametrinis stiprinimas. Pirmame netiesiniame kristale ($ST_{DK1.1.}$) sugeneruota šalutinė (AK) banga toliau vyksme nebedalyvauja, nes yra atskira nuo kitų impulsų laike. Nors 1 paveiksle yra pavaizduotas sprendimas su trimis stiprinimo terpėmis ($ST_{NK1.1.}$, $ST_{NK1.2.}$, $ST_{NK1.3.}$) ir dviem modifikavimo terpėmis ($MT_{DK1.1.}$, $MT_{DK1.2.}$), aprašyti žingsniai gali būti kartojami daugiau ar mažiau kartų - iki į SB iškeičiama norima KB energijos dalis, arba pasiekama stiprinimo sotis.

Dvejopalaužis kristalas ($MT_{DK1.1.}$, $MT_{DK1.2.}$) gali būti sudarytas, neapsiribojant, iš matomojoje-artimoje infraraudonojoje srityje naudotinų medžiagų, tokių kaip α -BaB₂O₄, kalcitas, YVO₄).

Dvejopalaužis kristalas ($MT_{DK1.1.}$, $MT_{DK1.1.}$) atlieka dvejopą funkciją: nustumia šalutinės bangos (AK) impulsą nuo signalinio (SB) ir kaupinimo (KB) impulsų ir pastumia signalinį impulsą ant dar neiškonvertuotos kaupinimo impulso dalies. Dvejopalaužio kristalo chromatinės dispersijos bei dvejopo lūžio nulemtus grupinius vėlinimus kaupinimo, signaliniam ir šalutinės bangos impulsams pažymėkime atitinkamai t_K , t_S ir t_{ξ} , o kaupinimo impulso trukmę pažymėkime τ . Tada matematiškai 2) ir 3) sąlygas galima užrašyti taip:

$$|t_S - t_{\xi}| = K\tau$$

[1]

$$t_S = t_K$$

[2]

kur K – konstanta, kurios pasirinkimą lemia balansas tarp dviejų faktorių: poreikio kuo geriau atskirti šalutinės bangos impulsą nuo kitų impulsų ir poreikio turėti kuo plonesnį dvejetainį kristalą, kad kuo mažiau pasireiktų nepageidaujami šalutiniai netiesiniai efektai (labiausiai Kero efektas, lemiantis impulsų fazės moduliavimąsi ir netiesinį pluoštų fokusavimąsi). Jei kaupinimo impulso trukmė τ apibrėžta impulse pusės intensyvumo aukštyje, o impulso forma artima Gauso impulsui, tam, kad impulsai gerai atsiskirtų vienas nuo kito, konstantos K vertė turėtų būti maždaug 3-4.

Atsižvelgiant į tai, jog šviesos impulso vėlinimas t skaidrioje terpėje priklauso nuo terpės storio z ir grupinio lūžio rodiklio n_g , kuris savo ruožtu yra šviesos impulso bangos ilgio λ bei kristalo išpjovimo kampo θ funkcija, be to, priklauso nuo poliarizacijos (o arba e), lygtį [2], pagal kurią reikia parinkti kristalo išpjovimo kampą θ , galima performuluoti taip:

$$n_g(\lambda_S, P_S \cdot \theta) = n_g(\lambda_K, P_K \cdot \theta)$$

[3]

čia P_i – atitinkamos bangos su indeksu i (S – signalinė, K – kaupinimo, $\check{S}$ – šalutinė) poliarizaciją nusakantis daugiklis, lygus 0, jei atitinkama banga poliarizuota o plokštumoje (paprastoji banga), arba lygus 1, jei atitinkama banga poliarizuota e plokštumoje. Bendruoju atveju, kristalo lūžio rodiklio priklausomybė nuo bangos ilgio bei išpjovimo kampo priklausomybė aprašoma netiesinėmis formulėmis, tad kampą θ rasti patogiausia skaitiniais matematikos metodais.

Kai žinomas reikalingas kristalo išpjovimo kampas θ , kristalo storį z , reikalingą, jog šalutinė banga būtų pakankamai atskirta laike, galima išreikšti iš (1) lygties tokiu būdu:

$$z = \frac{K\tau}{|n_g(\lambda_S, P_S \cdot \theta) - n_g(\lambda_{\check{S}}, P_{\check{S}} \cdot \theta)|}$$

[4]

Kaip pavyzdį galima paminėti, kad, siekiant realizuoti išradimą su anksčiau minėta bangos ilgių kombinacija 515nm $\rightarrow$ 710nm + 1875nm, šiuo išradimo įgyvendinimo metodu, kaip dvejetainį kristalą būtų galima naudoti β -BaB₂O₄ kristalą, išpjautą kampu $\theta = 28.85$. Jei kaupinimo impulso trukmė ~ 250 fs, kristalo storis, reikalingas atskirti šalutinę bangą nuo kaupinimo impulso per 3 kaupinimo impulso trukmes ($K=3$), būtų maždaug 4.7mm (jei stiprinimo kristaluose naudojama II

tipo sąveika, ir šalutinės bangos poliarizacija sutampa su kaupinimo). Keleto laipsnių intervale pasukus tokį dvejopalauižį kristalą, būtų galima paderinti ir vėlinimą tarp kaupinimo bei signalo impulsų, kad kiekviename netiesiniame kristale signalinis impulsas sąveikautų su vis nauja kaupinimo impulso dalimi, ir taip perimtų kuo daugiau energijos.

Kadangi atspindžiai nuo tokios modifikavimo priemonės, kaip dvejopalauižio kristalo ($MT_{DK1.1.}$, $MT_{DK1.1.}$, $MT_{DK2.1.}$), paviršiaus į optinę sistemą įneša nuostolius, dvejopalauižiai kristalai ($MT_{DK1.1.}$, $MT_{DK1.1.}$, $MT_{DK2.1.}$) yra padengti antireflekcinėmis dangomis. Pavyzdžiui, su plačiai komerciškai prieinamomis antireflekcinėmis dangomis (1% nuostoliai ant vieno paviršiaus), sistemoje iš 7 elementų – 4 netiesinių kristalų ir 3 dvejopalauižių kristalų) dėl atspindžių būtų prarasta ~14% visos spinduliuotės, o sistemoje iš 11 elementų – net 20%. Todėl netiesinių kristalų storius tokioje sistemoje racionalu parinkti taip, kad stiprinimo sosis būtų pasiekta per 3-4 netiesinius kristalus.

Visi kristalai gali sudaryti vientisą liniją-stiprinimo pakopą.

Dar kitu išradimo įgyvendinimo atveju, ir kaip pavaizduota 2 paveiksle, parametriniam stiprinimui yra naudojami du netiesiniai kristalai ($ST_{MT2.1.}$, $ST_{MT2.2.}$), pozicionuojami vienas už kito. Šalutinė banga (AK_{opol} , AK_{epol}), generuojama viename kristale, būtų o (arba e) poliarizacijos, o kitame – e (arba atitinkamai o) poliarizacijos. Tokiu būdu šalutinė banga, sugeneruota pirmajame kristale ($ST_{NK2.1.}$), negali dalyvauti sąveikoje antrajame kristale ($MT_{NK2.2.}$). Tokie netiesiniai kristalai atlieka stiprinimo ir modifikavimo funkciją.

Tokie netiesiniai kristalai ($ST_{MT2.1.}$, $ST_{MT2.2.}$) yra parinkti taip, kad juose vyktų skirtingų (0, I arba II) tipų tribangė netiesinė sąveika, esant tinkamoms kaupinimo ir signalinės bangų poliarizacijoms (abiejuose kristaluose ($ST_{MT2.1.}$, $ST_{MT2.2.}$) signalinės ir kaupinimo bangų poliarizacijos turi būti tos pačios, o skirtuminės bangos poliarizacijos turi būti skirtingos). Pavyzdžiui, kaupinimui naudojant ~512-532nm spinduliuotę (plačiai paplitusių iterbio ar neodimio jonais legiruočių lazerių antroji harmonika), galima efektyviai stiprinti signalinius impulsus 650-2300nm diapazone naudojant technologiškai brandžius β -BaB₂O₄ kristalus. Tarkime, esant kaupinimo bangos ilgiui 515nm, o signalinės bangos ilgiui 710nm, metodą galima realizuoti tokių parametrų kristaluose:

1 kristalas ($ST_{MT2.1.}$): I tipo sąveika $515\text{nm} \rightarrow 710\text{nm} + 1875\text{nm}$ (e-oo); kristalo išpjovimo kampai $\theta=21.9^\circ$ $\varphi=90^\circ$

2 kristalas ($ST_{MT2.1.}$): I tipo sąveika $515\text{nm} \rightarrow 710\text{nm} + 1875\text{nm}$ (e-oe); kristalo išpjovimo kampai $\theta=25.8^\circ$ $\varphi=0^\circ$

Kadangi taikant šią išradimo realizaciją nereikia atskirti šalutinės bangos impulso laike, šią realizaciją galima taikyti ne tik su femtosekundiniais, bet ir su pikosekundiniais bei nanosekundiniais lazerių impulsais. Naudojant lazerį, generuojantį $\sim 250\text{fs}$ trukmės impulsus ir aukščiau aprašytą kristalų kombinaciją (I tipo kristalo ($ST_{MT2.1.}$) storis buvo 2mm , II tipo kristalo ($ST_{MT2.1.}$) storis – 2.5mm) bei parinkus aukščiau nurodytus sąveikaujančių bangų ilgius, laboratorijoje buvo pasiektas $>40\%$ energinis efektyvumas, o sustiprinto pluošto kokybės parametras M^2 neviršijo 1.8.

Visi kristalai gali sudaryti vientisą liniją-stiprinimo pakopą.

Dar kitu išradimo įgyvendinimo atveju, ir kaip pavaizduota 3 paveiksle, netiesiniuose kristaluose ($ST_{NK3.1.}$, $ST_{NK3.2.}$, $ST_{NK3.3.}$) sugeneruota šalutinė banga ($AK_{3.1.}$, $AK_{3.2.}$) yra atskiriama nuo kaupinimo bangos (KB) ir signalo bangos (SB) pavieniais dichroiniais veidrodžiais ($MT_{DV3.1.}$, $MT_{DV3.2.}$).

Dar kitu išradimo įgyvendinimo atveju, ir kaip pavaizduota 4 paveiksle, stiprintuve kaip stiprinimo priemonė yra naudojamas vienas netiesinis kristalas ($ST_{NK4.1.}$), pro kurį signalo banga (SB) ir kaupinimo banga (KB) yra praleidžiama daugiau negu vieną kartą. Netiesiniame kristale ($ST_{NK4.1.}$), po kiekvieno signalo bangos (SB) ir kaupinimo bangos (KB) praleidimo, sugeneruota šalutinė banga ($AK_{4.1.}$, $AK_{4.2.}$) yra atskiriama nuo kaupinimo bangos (KB) ir signalo bangos (SB) dichroiniais veidrodžiais arba dichroinių veidrodžių poromis ($MT_{DV3.1.}$, $MT_{DV3.2.}$), kurios modifikuoja signalo bangos (SB) ir kaupinimo bangos (KB) sklaidimo kelią taip, kad minėtos bangos būtų praleistos pro minėtą netiesinį kristalą daugiau negu vieną kartą. Šį variantą galima kombinuoti su 2 paveiksle pavaizduotu būdu ir/arba 1 paveiksle pavaizduotu būdu, pavyzdžiui, daugiaeigėje schemoje, kaip 4 paveiksle, vietoje vieno netiesinio kristalo naudojant kristalų porą, kaip 2 paveiksle, kurios viename kristale vyksta pirmo tipo parametrinė sąveika, o kitame – antro tipo. Šiuo išradimo įgyvendinimo atveju, užuot po kiekvieno šalutinės bangos atskyrimo naudojant vis kitą netiesinį kristalą, atskyrus šalutinę bangą, kaupinimo ir signalo

bangas galima pasiųsti vis į tą patį netiesinį kristalą. Kita vertus, jei dėl technologinių aplinkybių taip būtų patogiau, 4 paveiksle pavaizduotoje schemoje atspindėjus KB ir SB nuo $MT_{DV4.1}$ būtų galima suvesti ne į tą pačią stiprinimo priemonę $ST_{NK4.1}$, o kiekvieną kartą atspindėjus naudoti vis kitą netiesinį kristalą.

Kaip 1 ir 2 paveiksluose pavaizduotų išradimo įgyvendinimo atvejais, 3 ir 4 paveiksluose pavaizduotais išradimo įgyvendinimo atvejais nėra apsiribojama konkrečiais netiesiniais kristalais: naudojamuose netiesiniuose kristaluose, pasirinktiems bangos ilgiams privalo efektyviai vykti tribangė sąveika, t.y. tokie patys kristalai, kokie būtų naudojami įprastose parametrinio stiprinimo schemose. Siekiant geriausio efektyvumo, gali būti racionalu naudojamą sąveikos tipą pasirinkti taip, kad būtų minimizuoti dichroinių veidrodžių įnešami nuostoliai signalinėms ir kaupinimo bangoms. Pavyzdžiui, jei naudojami dichroniai veidrodžiai, atspindintys šalutinę bangą (taip, kaip pavaizduota 3 paveiksle), tikėtina, kad geriausia bus pasirinkti tokią sąveiką, kurioje kaupinimo ir signalinės bangų poliarizacijos sutampa, ir naudoti dichroinius veidrodžius, veikiančius kampu, artimu Briusterio kampui, orientuotus taip, kad kaupinimo ir signalinių bangų poliarizacijos būtų p plokštumoje. Jei naudojami dichroniai veidrodžiai, atspindintys signalinę ir kaupinimo bangas, bet neatspindintys šalutinės bangos, tada dichroinį veidrodį reiks orientuoti taip, kad signalinės ir kaupinimo bangų poliarizacijos būtų s plokštumoje. Šis metodo realizavimo būdas taip pat nereikalauja atskirti impulsų laike, dėl to tinkamas naudoti su iš esmės bet kokios trukmės lazerių impulsais, išskyrus labai trumpus (orientaciškai $<100\text{fs}$) impulsus, jei naudojama schema, kurioje signaliniai ir kaupinimo impulsai yra dichroinio veidrodžio praleidžiami. Tokiu atveju dichroinio veidrodžio dispersija gali signalinį impulsą laike atskirti nuo kaupinimo, ir sąveika toliau nebevyks. Šios problemos galima išvengti, naudojant dichroinius veidrodžius, kurie atspindi signalinę ir kaupinimo bangas, o praleidžia šalutinę bangą. Išradimo įgyvendinimo pavyzdys naudojant tokius dichroinius veidrodžius pavaizduotas 4 paveiksle.

Kitu išradimo įgyvendinimo atveju, ir kaip pavaizduota 5 paveiksle, pirma stiprinimo priemonė gali būti optinė sritis ($ST_{OZ5.1}$), esanti netiesiniame kristale (ST_{NK5}), kuriame yra daugiau negu viena skirtingų savybių optinė sritis ($ST_{OZ5.1}$, $ST_{OZ5.2}$, $ST_{OZ5.3}$, $MT_{5.1}$, $MT_{5.2}$), o pirma modifikavimo priemonė ($MT_{5.1}$), esanti už pirmos stiprinimo priemonės ($ST_{OZ5.1}$), yra tame pačiame netiesiniame kristale

(ST_{NK5}) esanti optinė sritis, kurios optinės savybės skiriasi nuo pirmos stiprinimo priemonės optinės srities ($ST_{OZ5.1.}$). Tokiame kristale (ST_{NK5}) gali būti daugiau negu viena stiprinimo priemonė ($ST_{OZ5.1.}$, $ST_{OZ5.2}$, $ST_{OZ5.3.}$) ir daugiau negu viena modifikavimo priemonė ($MT_{5.1.}$, $MT_{5.2.}$), išdėstytos paeiliui viena už kitos taip, kaip pavaizduota 5 paveiksle.

Kaip ir kitose išradimo realizacijose, modifikavimo priemonės ($MT_{5.1.}$, $MT_{5.2.}$) paskirtis yra atskirti vienoje stiprinimo terpėje sugeneruotą šalutinę bangą (pavyzdžiui, bet neapribojant, sudarant modifikavimo terpėse šalutinei bangai difraguoti ir/arba išsisklaidyti į keletą bangų AK4.1, AK4.2, AK4.3, AK4.4) nuo kaupinimo bangos (KB) ir signalo bangos (SB) taip, kad šalutinė banga (AK4.1, AK4.2, AK4.3, AK4.4) nebegalėtų dalyvauti sąveikoje, kai kaupinimo banga (KB) ir signalo banga (SB) pateks į tolimesnę stiprinimo terpę. Neapribojant, modifikavimo priemonės ($MT_{5.1.}$, $MT_{5.2.}$), išpildytos kaip skirtingas optines savybes, lyginant su stiprinimo sričių optinėmis savybėmis, netiesiniame kristale turinčios sritys, tarp stiprinimo sričių, yra suformuotos su periodinėmis ar aperiodinėmis lūžio rodiklio moduliacijomis, pavyzdžiui: Brego gardelėmis ar fotoninių kristalų dariniais, kurie šalutinę bangą galėtų išsklaidyti (fotoninių kristalų principas) arba atspindėti (Brego gardelių principas). Vienas iš kristalų, kuriems yra sukurta pažangių lūžio rodiklio modifikacijų įrašymo metodų, kuriuos būtų galima taikyti formuojant išradimo realizacijoms tinkamų optinių savybių zonas, yra $LiNbO_3$.

Dar vienu išradimo įgyvendinimo atveju, kaip pavaizduota 6 paveiksle, pirmojoje (ar vėlesnėje) stiprinimo priemonėje ($ST_{NK6.1}$) sugeneruota šalutinė banga (AK), tolimesnėse stiprinimo priemonėse ($ST_{NK6.2}$, $ST_{NK6.3}$) gali būti naudojama kaip signalinė banga, o modifikavimo terpių ($MT_{DK6.1}$, $MT_{DK6.2}$) savybės parenkamos taip, kad iš sąveikos tolimesnėse stiprinimo terpėse pašalintų bangą, kuri stiprintuvo įėjime buvo signalinė. Svarbu tai, kad šiai funkcijai atlikti gali būti naudojamos bet kurios iš anksčiau aprašytų modifikavimo priemonių rūšių. Pavyzdžiui, taip būtų galima padaryti naudojant tokią pačią schemą, kaip 3 paveiksle, tik parinkus modifikavimo terpes - dichroinius veidrodžius – taip, kad praleistų kaupinimo bangą (KB) ir šalutinę bangą (AK), o atspindėtų į stiprintuvo įėjimą pasiųstą signalinę bangą (SB). Toks išradimo realizavimo atvejis gali būti praktiškai naudingas tuo atveju, kai norima efektyviai generuoti spinduliuotę ties tokiu bangos ilgiu, ties kuriuo nėra patogių priemonių generuoti signalinę bangą (SB). Kadangi visų tribangėje sąveikoje

dalyvaujančių bangų ilgiai - kaupinimo bangos λ_{KB} , signalinės bangos λ_{SB} ir skirtuminės bangos λ_{AK} - yra vienareikšmiškai susieti fotono energijos tvermės dėsniu:

$$\frac{1}{\lambda_{KB}} = \frac{1}{\lambda_{SB}} + \frac{1}{\lambda_{AK}}$$

daugeliu atveju galima surasti tokią kaupinimo bangos (KB) bangos ilgio ir signalinės bangos (SB) bangos ilgio kombinaciją, kad būtų generuojama pageidaujamo bangos ilgio šalutinės banga (AK). Dažnai ši išradimo realizacija bus aktuali norint generuoti šviesą infraraudonajame diapazone, kur lazerinių šaltinių yra mažai.

Neapribojant, bet tik kaip vienas iš daugelio galimų pavyzdžių pateikiama tokia situacija: pageidaujamas efektyviai generuoti spinduliuotės bangos ilgis – $3\mu\text{m}$. Kaupinimui naudojamas Yb:KGW kaupinimo lazeris, kurio spinduliuotės bangos ilgis $\lambda_{KB}=1,03\mu\text{m}$. Tada reikalingą signalinės bangos (SB) ilgį galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$\lambda_{SB} = \frac{\lambda_{KB}\lambda_{AK}}{\lambda_{AK} - \lambda_{KB}}$$

Duotu atveju, parinkus $\lambda_{SB}=1,57\mu\text{m}$, būtų pasiekta, kad $\lambda_{AK}=3\mu\text{m}$. Spinduliuotės šaltinių, generuojančių ties $\lambda=1,57\mu\text{m}$, pasirinkimas yra daug didesnis negu ties $\lambda=3\mu\text{m}$ – tai galėtų būti ir Er jonais legiruoti šviesolaidiniai lazeriai, ir puslaidininkiniai lazeriai, ir parametriniai generatoriai. Taigi, pirmojoje stiprinimo priemonėje (ST_{NK6.1}) sugeneravus reikiamo bangos ilgio spinduliuotę, galima toliau taikyti visus išradime aprašytus metodus siekiant padidinti norimos spinduliuotės generavimo efektyvumą.

Visais išradimo atvejais, neapsiribojama konkrečiais netiesinių kristalų ir pagalbinių komponentų variantais, optinius elementus būtina pritaikyti prie konkrečioje realizacijoje naudojamų lazerinių spinduliuotės šaltinių (kaupinimo ir signalinės bangų) parametrų.

Visais išradimo atvejais, parametrinio stiprinimo procesas yra atliekamas per keletą etapų, tarp kurių vienu ar kitu būdu užtikrinama, kad ankstesniame etape sugeneruota šalutinė banga tolimesniame etape nebegalėtų dalyvauti.

Visais išradimo atvejais, kartą iškeistos pluošto-impulso sritys lieka iškeistos, o po pirmos stiprinimo priemonės, tolimesnėse stiprinimo priemonėse yra toliau keičiamos naujos kaupinimo impulse-pluošto dalys, negrąžinant signalo bangos

energijos į kaupinimo bangą.

Visais išradimo įgyvendinimo pavyzdžių atvejais, neišvardinti daugiapakopio parametrinio šviesos stiprintuvo optiniai ir elektronikos komponentai yra standartiniai tokių įrenginių komponentai, todėl aprašyme nėra pateikiami, taip išvengiant išradimo objekto nereikalingo sudėtingumo.

Taip pat svarbu paminėti, kad, parametrinio šviesos stiprintuvo konfigūracija, parinkta siekiant papildomų privalumų ar optimalaus prietaiso veikimo, gali būti sukombinuota iš skirtingose išradimo realizacijose nurodytų šalutinės bangos ar signalinės bangos ir kaupinimo bangos modifikavimo būdų. Neapribojant, kaip pavyzdį galima pateikti variantą, kuriame pirma modifikavimo priemonė būtų dichroinis veidrodis, atspindintis šalutinę bangą, o tolimesnė modifikavimo priemonė būtų dvejetainis kristalas. Realizuojant išradimą tokiu būdu būtų gaunami papildomi privalumai, negaunami iš atskirų išradimo realizacijų: 1) nuo dichroinio veidrodžio atspindėtą šalutinę bangą, kuri vis dar sudaryta tik iš vieno, neblogo laikinės ir erdvinės kokybės impulsinio pluošto, būtų galima naudoti taikymuose; 2) dvejetainio kristalu galima tiksliai paderinti vėlinimą tarp signalinės bangos ir kaupinimo bangos, kad būtų užtikrinamas maksimalus parametrinio stiprintuvo efektyvumas. Išradimo aprašyme sąmoningai nebandoma parodyti visų galimų išradimo realizacijų, kuriose tarp stiprinimo priemonių būtų įterpiamos skirtingos modifikavimo priemonės, nes tokių kombinacijų gali būti labai daug, tačiau reikia suprasti, kad parametrinio šviesos stiprintuvo konfigūracijos, sukurtos dalimis derinant išsamiai aprašytas išradimo realizacijas, taip pat yra išradimo objektai.

Nors išradimo aprašyme buvo išvardinta daugybė charakteristikų ir privalumų, kartu su išradimo struktūrinėmis detalėmis ir požymiais, aprašymas yra pateikiamas kaip pavyzdinis išradimo išpildymas. Gali būti atlikti pakeitimai detalėse, ypatingai medžiagų formoje, dydyje ir išdėstyme nenuolstant nuo išradimo principų, vadovaujantis plačiausiai suprantamomis apibrėžties punktuose naudojamų sąvokų reikšmėmis.

Išradimo apibrėžtis

1. Daugiapakopis parametrinis šviesos stiprinimo būdas, apimantis kaupinimo bangos (KB) ir signalo bangos (SB) praleidimą pro signalinės bangos stiprinimo priemonę ir šalutinės bangos (AK) atskyrimą nuo kaupinimo bangos (KB) ir signalo bangos (SB) sklidimo trajektorijos tarp vienas po kito išdėstytų bangos stiprinimo priemonių besiskiriantis tuo, kad po kaupinimo bangos (KB) ir signalo bangos (SB) praleidimo pro bent vieną signalo stiprinimo priemonę ($ST_{NK1.1.}$, $ST_{NK1.2.}$, $ST_{MT2.1.}$, $ST_{NK3.1.}$, $ST_{NK3.2.}$, $ST_{NK4.1.}$, $ST_{OZ5.1.}$, $ST_{OZ5.2.}$, $ST_{NK6.1.}$, $ST_{NK6.2.}$), kaupinimo bangos (KB) ir signalo bangos (SB), arba susiformavusios šalutinės bangos (AK) parametrai yra modifikuojama bent viena modifikavimo priemone ($MT_{DK1.1.}$, $MT_{DK1.2.}$, $ST_{MT2.2.}$, $MT_{DV3.1.}$, $MT_{DV3.2.}$, $MT_{DV4.1.}$, $MT_{DV4.2.}$, $MT_{5.1.}$, $MT_{5.2.}$, $MT_{DK6.1.}$, $MT_{DK6.2.}$).

2. Daugiapakopis parametrinis šviesos stiprinimo būdas pagal 1 punktą, kur bent viena modifikavimo priemone ($MT_{DK1.1.}$, $MT_{DK1.2.}$, $ST_{MT2.2.}$) šalutinė banga (AK) yra pavėlinama kaupinimo (KB) ir signalinės bangos (SB) atžvilgiu.

3. Daugiapakopis parametrinis šviesos stiprinimo būdas pagal 1 punktą, kur bent vienoje sekančioje stiprinimo priemonėje ($ST_{MT2.2.}$) vyksta skirtingos netiesinės sąveikos, negu ankstesnėje stiprinimo priemonėje ($ST_{MT2.1.}$).

4. Daugiapakopis parametrinis šviesos stiprinimo būdas pagal 1 punktą, kur kiekviena modifikavimo priemonė ($MT_{DV3.1.}$, $MT_{DV3.2.}$, $MT_{5.1.}$, $MT_{5.2.}$) pakeičia šalutinės bangos (AK) kryptį taip, kad ji nepatektų į sekančią stiprinimo priemonę ($ST_{NK3.2.}$, $ST_{NK3.3.}$, $ST_{OZ5.2.}$, $ST_{OZ5.3.}$).

5. Daugiapakopis parametrinis šviesos stiprinimo būdas pagal 1 punktą, kur kiekviena modifikavimo priemonė ($MT_{DV4.1.}$, $MT_{DV4.2.}$) pakeičia kaupinimo bangos (KB) ir signalo bangos (SB) kryptį taip, kad tik jos patektų į sekančią stiprinimo priemonę ($ST_{NK4.1.}$).

6. Daugiapakopis parametrinis stiprinimo būdas pagal 1 punktą, besiskiriantis tuo, kad pirmojoje ar tolimesnėje stiprinimo terpėje ($ST_{NK1.1.}$, $ST_{NK1.2.}$, $ST_{MT2.1.}$, $ST_{NK3.1.}$, $ST_{NK3.2.}$, $ST_{NK4.1.}$, $ST_{OZ5.1.}$, $ST_{OZ5.2.}$, $ST_{NK6.1.}$, $ST_{NK6.2.}$) atsiradusi šalutinė banga (AK) tolimesnėse stiprinimo terpėse ($ST_{NK1.2.}$, $ST_{MT2.1.}$, $ST_{NK3.2.}$, $ST_{OZ5.2.}$, $ST_{NK6.2.}$) yra stiprinama kaip signalinė banga, o modifikavimo priemonėmis ($MT_{DK1.1.}$, $MT_{DK1.2.}$, $ST_{MT2.2.}$, $MT_{DV3.1.}$, $MT_{DV3.2.}$, $MT_{DV4.1.}$, $MT_{DV4.2.}$, $MT_{5.1.}$, $MT_{5.2.}$, $MT_{DK6.1.}$, $MT_{DK6.2.}$) šalinama, vėlinama ar kitaip modifikuojama banga, pirmojoje stiprinimo

terpėje buvusi signalinė banga (SB).

7. Daugiapakopis parametrinis šviesos stiprintuvas, apimantis bent vieną signalinės bangos (SB) stiprinimo priemonę, besiskiriantis tuo, kad papildomai apima kaupinimo bangos (KB) ir signalo bangos (SB) arba šalutinės bangos (AK) bent vieną modifikavimo priemonę ($MT_{DK1.1.}$, $MT_{DK1.2.}$, $ST_{MT2.2.}$, $MT_{DV3.1.}$, $MT_{DV3.2.}$, $MT_{DV4.1.}$, $MT_{5.1.}$, $MT_{5.2.}$, $MT_{DK6.1.}$, $MT_{DK6.2.}$).

8. Daugiapakopis parametrinis šviesos stiprintuvas pagal 7 punktą, kur bent viena šalutinės bangos modifikavimo priemonė ($MT_{DK1.1.}$, $MT_{DK1.2.}$) yra dvejetainis kristalas.

9. Daugiapakopis parametrinis šviesos stiprintuvas pagal 7 punktą, kur modifikavimo priemonė ($ST_{MT2.2.}$) yra sekanti stiprinimo priemonė ($ST_{MT2.2.}$) kuri yra netiesinis kristalas kuris, kuriame vyksta skirtingos netiesinės sąveikos, negu ankstesnėje stiprinimo priemonėje ($ST_{MT2.1.}$).

10. Daugiapakopis parametrinis šviesos stiprintuvas būdas pagal 7 punktą, kur bent viena modifikavimo priemonė ($MT_{DV3.1.}$, $MT_{DV3.2.}$) yra pavienis dichroinis veidrodys.

11. Daugiapakopis parametrinis šviesos stiprintuvas būdas pagal 7 punktą, kur bent viena modifikavimo priemonė ($MT_{DV4.1.}$, $MT_{DV4.2.}$) yra dichroinių veidrodžių pora.

12. Daugiapakopis parametrinis šviesos stiprintuvas pagal 7 punktą, kur pirma stiprinimo priemonė yra optinė sritis ($ST_{OZ5.1.}$), esanti netiesiniame kristale (ST_{NK5}), kuriame yra daugiau negu viena skirtingų savybių optinė sritis ($ST_{OZ5.1.}$, $ST_{OZ5.2.}$, $ST_{OZ5.3.}$, $MT_{5.1.}$, $MT_{5.2.}$), o pirma modifikavimo priemonė ($MT_{5.1.}$), esanti už pirmos stiprinimo priemonės ($ST_{OZ5.1.}$), yra tame pačiame netiesiniame kristale (ST_{NK5}) esanti optinė sritis, kurios optinės savybės skiriasi nuo pirmos stiprinimo priemonės optinės srities ($ST_{OZ5.1.}$).

13. Daugiapakopis parametrinis stiprintuvas pagal 7 punktą, besiskiriantis tuo, kad tarp stiprinimo priemonių ($ST_{NK1.1.}$, $ST_{NK1.2.}$, $ST_{MT2.1.}$, $ST_{NK3.1.}$, $ST_{NK3.2.}$, $ST_{NK4.1.}$, $ST_{OZ5.1.}$, $ST_{OZ5.2.}$, $ST_{NK6.1.}$, $ST_{NK6.2.}$) ir (arba) modifikavimo priemonių ($MT_{DK1.1.}$, $MT_{DK1.2.}$, $ST_{MT2.2.}$, $MT_{DV3.1.}$, $MT_{DV3.2.}$, $MT_{DV4.1.}$, $MT_{DV4.2.}$, $MT_{5.1.}$, $MT_{5.2.}$, $MT_{DK6.1.}$, $MT_{DK6.2.}$) yra įterpti papildomi optiniai elementai, neatliekantys stiprinimo ar modifikavimo priemonės funkcijos, tačiau atliekantys vieną iš šių funkcijų: 1) kurios

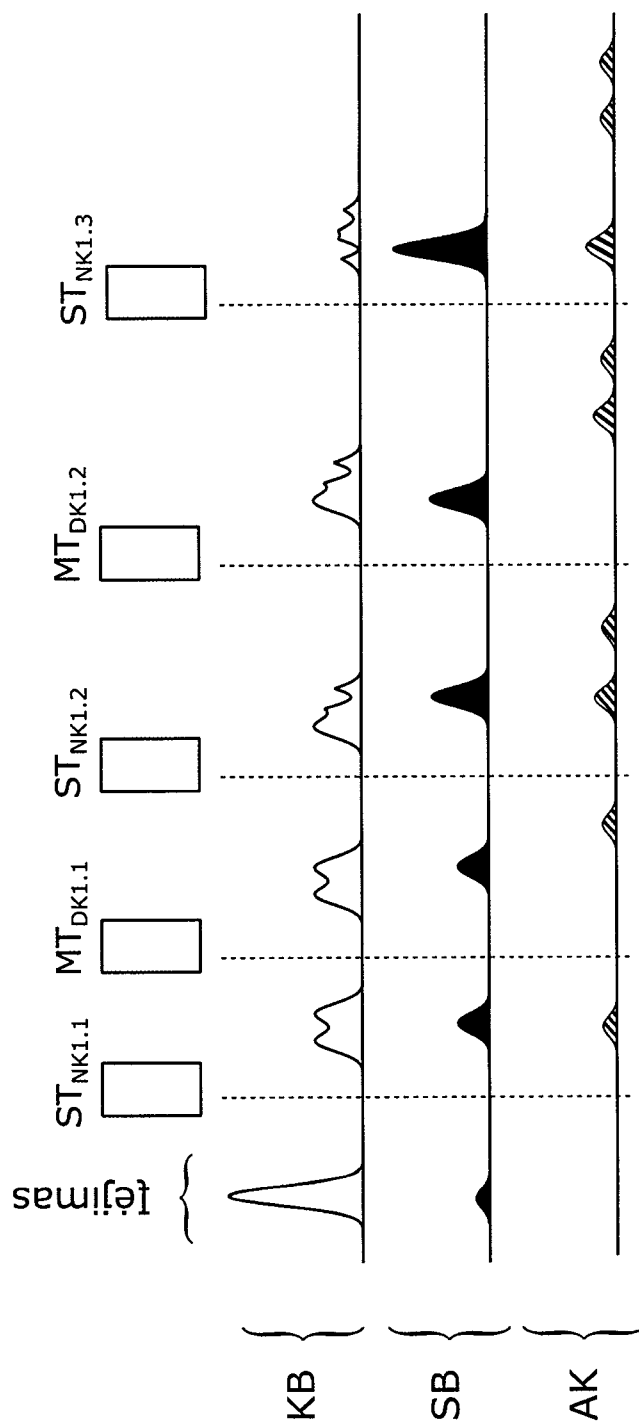
nors ar visų (KB), (SB), (AK) šviesos pluoštų krypties pakeitimo (veidrodžiai) 2) šviesos pluoštų fokusavimo, defokusavimo, kolimavimo ar atvaizdavimo (lęšiai arba sferiniai veidrodžiai); 3) šviesos pluoštų atskyrimo pagal bangos ilgį (prizmės, difrakcinės gardelės); 4) šviesos pluoštų poliarizacinio atskyrimo ar poliarizacinių savybių keitimo (fazinės plokštelės, poliarizatoriai) 5) šviesos impulsų vėlinimo ar spektrinės fazės valdymo (dispersiniai langeliai, čirpuoti veidrodžiai ir pan.)

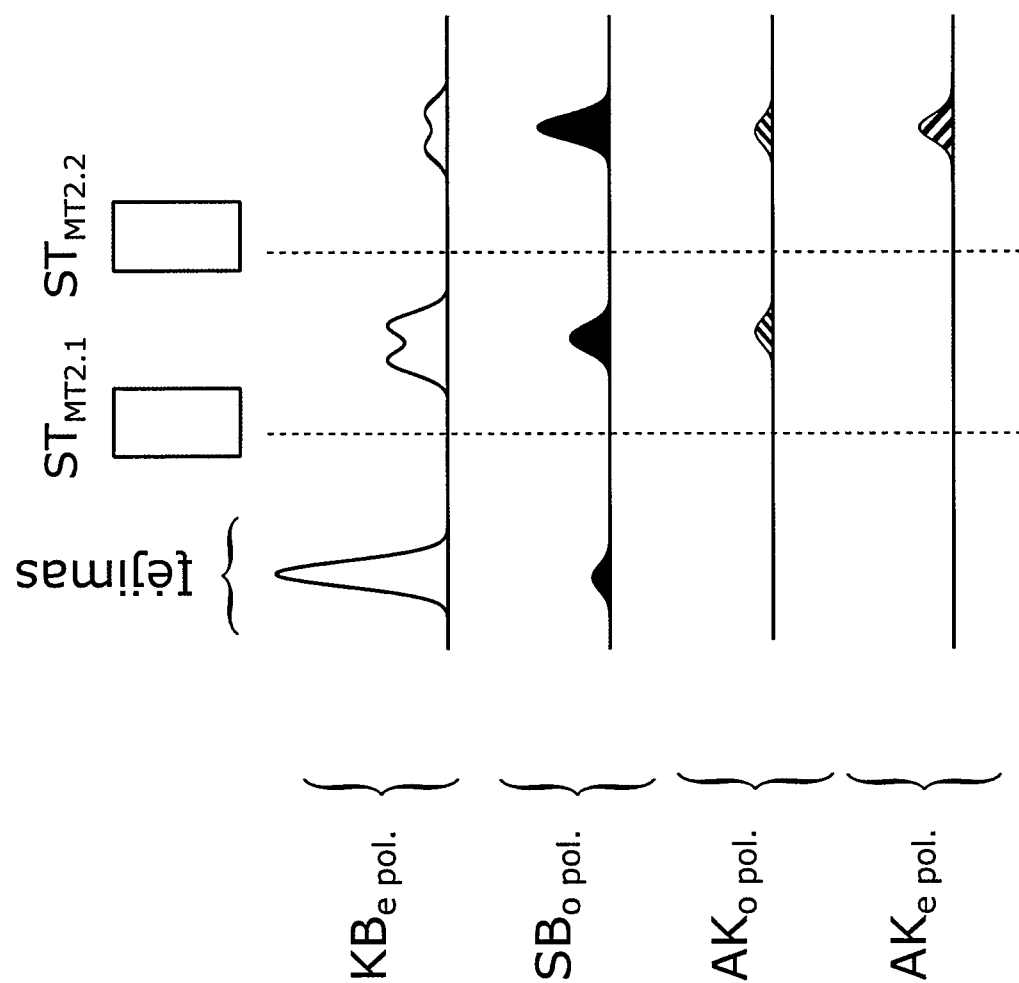
14. Daugiapakopis parametrinis šviesos stiprintuvas pagal 7 punktą, besiskiriantis tuo, kad bent viena modifikavimo priemonė ($MT_{DK1.1.}$, $MT_{DK1.2.}$, $ST_{MT2.2.}$, $MT_{DV3.1.}$, $MT_{DV3.2.}$, $MT_{DV4.1.}$, $MT_{DV4.2.}$, $MT_{5.1.}$, $MT_{5.2.}$, $MT_{DK6.1.}$, $MT_{DK6.2.}$) yra poliarizatorius ar poliarizacinis pluošto daliklis.

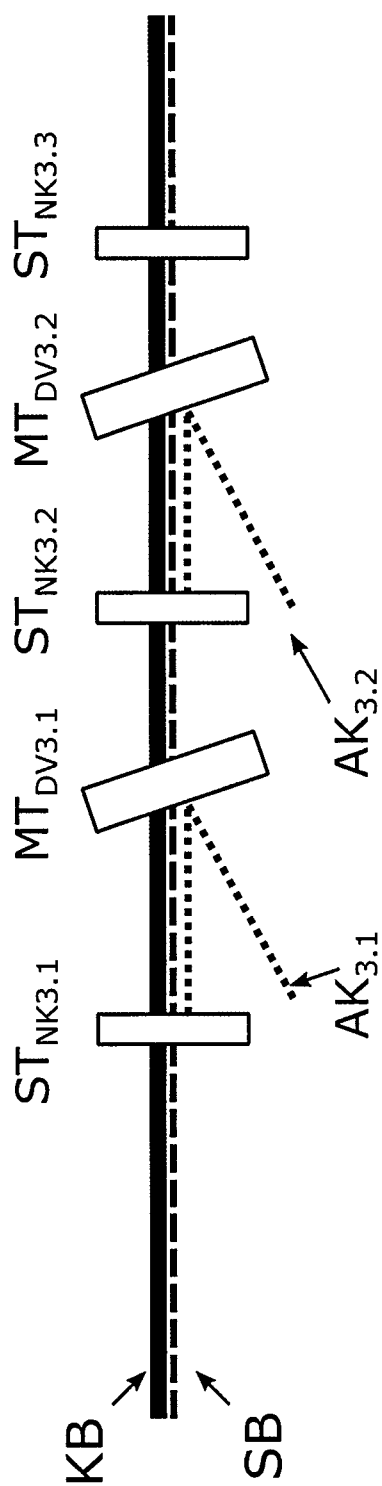
15. Daugiapakopis parametrinis šviesos stiprintuvas pagal 7 punktą, besiskiriantis tuo, kad bent viena modifikavimo priemonė ($MT_{DK1.1.}$, $MT_{DK1.2.}$, $ST_{MT2.2.}$, $MT_{DV3.1.}$, $MT_{DV3.2.}$, $MT_{DV4.1.}$, $MT_{DV4.2.}$, $MT_{5.1.}$, $MT_{5.2.}$, $MT_{DK6.1.}$, $MT_{DK6.2.}$) yra banginės (fazinės) plokštelės ir poliarizatoriaus kombinacija.

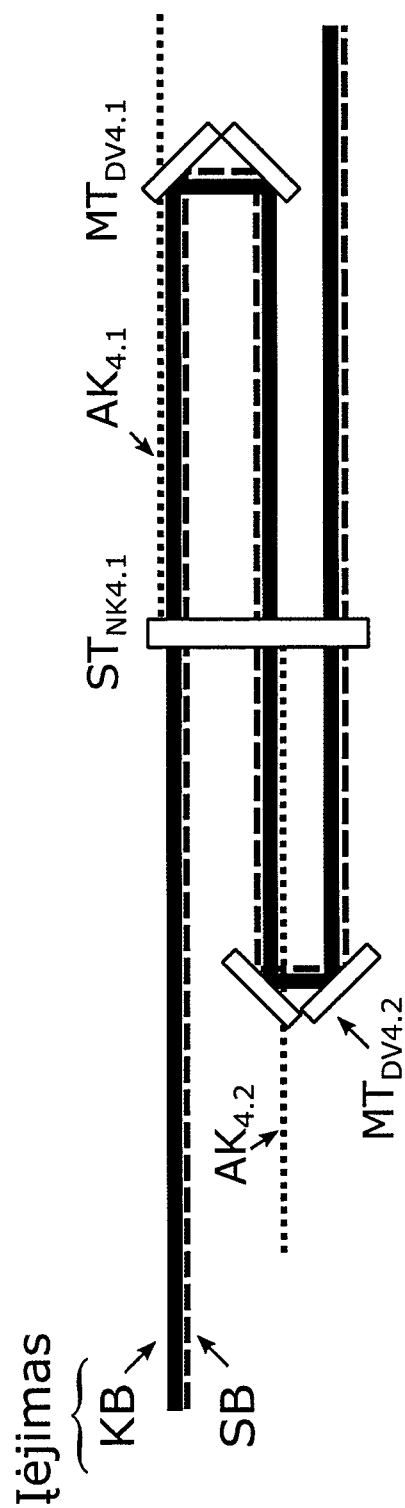
16. Daugiapakopis parametrinis šviesos stiprintuvas pagal 7 punktą, besiskiriantis tuo, kad bent viena modifikavimo priemonė ($MT_{DK1.1.}$, $MT_{DK1.2.}$, $ST_{MT2.2.}$, $MT_{DV3.1.}$, $MT_{DV3.2.}$, $MT_{DV4.1.}$, $MT_{DV4.2.}$, $MT_{5.1.}$, $MT_{5.2.}$, $MT_{DK6.1.}$, $MT_{DK6.2.}$) yra sudaryta iš daugiau negu vieno optinio elemento kombinacijos..

17. Daugiapakopis parametrinis šviesos stiprintuvas pagal 10 punktą, besiskiriantis tuo, kad modifikavimo terpė ($MT_{DV3.1.}$, $MT_{DV3.2.}$), pakeičianti šalutinės bangos (AK) kryptį yra dichroinis veidrodis ar difrakcinė gardelė, suformuota(s) ant stiprinimo priemonės ($ST_{NK3.2.}$, $ST_{NK3.3.}$) paviršiaus ar jos tūryje.

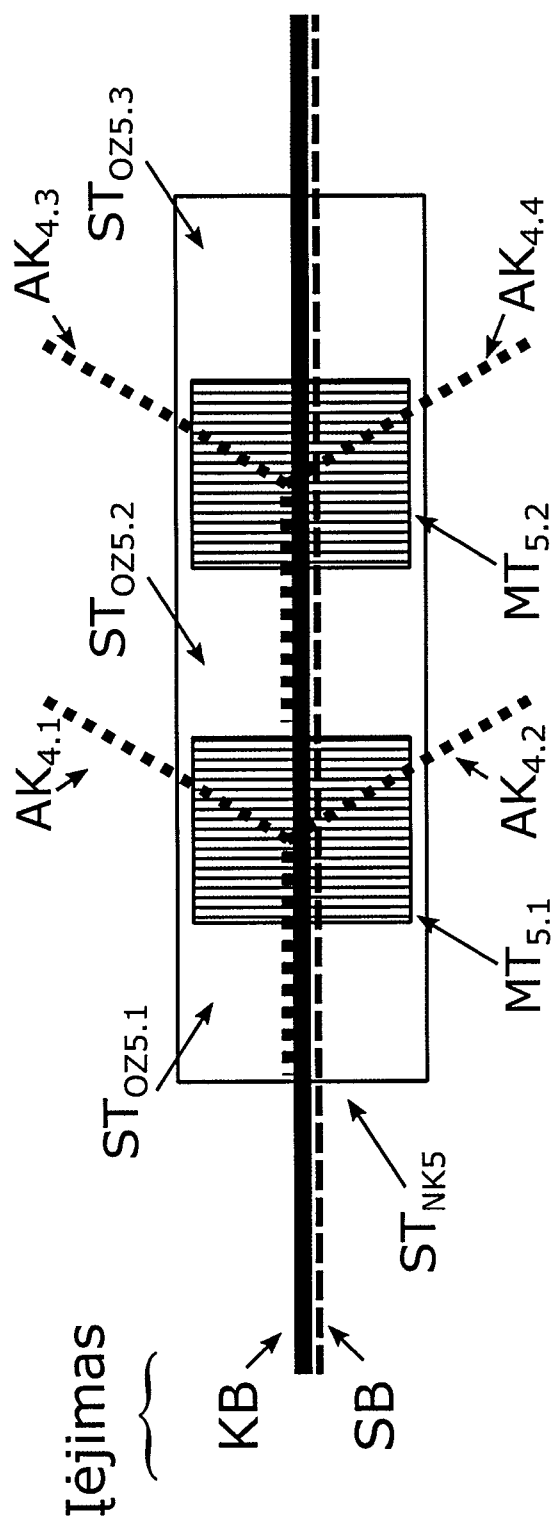








4 pav.



5 pav.

