

(19)



(10) **LT 6122 B**

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

- (11) Patent numeris: **6122** (51) Int. Cl. (2014.01): **H01S 3/00**
G02F 1/00
- (21) Paraiškos numeris: **2013 076**
- (22) Paraiškos padavimo data: **2013 07 17**
- (41) Paraiškos paskelbimo data: **2015 01 26**
- (45) Patent paskelbimo data: **2015 03 25**
- (62) Paraiškos, iš kurios dokumentas išskirtas, numeris: —
- (86) Tarptautinės paraiškos numeris: —
- (86) Tarptautinės paraiškos padavimo data: —
- (85) Nacionalinio PCT lygio procedūros pradžios data: —
- (30) Prioritetas: —
- (72) Išradėjas:
Nerijus RUSTEIKA, LT
Andrejus MICHAILOVAS, LT
Rokas DANILEVIČIUS, LT
Vytautas VOSYLIUS, 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:
Dviejų bangos ilgių optiškai sinchronizuotų ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būdas ir lazerinis šaltinis
- (57) Referatas:

Išradimas priklauso lazerių sričiai, tiksliau kelių išėjimo kanalų lazeriniams šaltiniams, ir yra skirtas generuoti du optiškai sinchronizuotus impulsus, tarpusavyje besiskiriančius centriniu bangos ilgiu ir spektro pločiu. Būdas apima pradinės spinduliuotės generavimą, jos pastiprinimą, spektro išplėtimą bei išėjimo impulsų suformavimą. Išradimu siekiama sukurti kompaktišką, patikimą ir paprastą konstrukciją kelių išėjimo kanalų lazerinį šaltinį. Tikslui pasiekti pirmasis ir antrasis išėjimo impulsai yra suformuojami iš išplėsto spektro spinduliuotės išskiriant pirmąjį ir antrąjį spektro segmentus su centriniais bangos ilgiais atitinkamai λ_1 ir λ_2 bei spektro pločiais atitinkamai $\Delta\lambda_1$ ir $\Delta\lambda_2$. Pradinės spinduliuotės spektro plotis $\Delta\lambda_0$ neviršija 1,5nm ir yra fiziškai nemoduliuota, išplėsto spektro spinduliuotės spektro plotis $\Delta\lambda$, apibrėžtas 1/10 maksimalaus spektrinio

intensyvumo lygyje, yra intervale nuo 40nm iki 45nm, išskirto pirmojo spektro segmento centrinis bangos ilgis λ_1 yra parinktas iš intervalo nuo 1025nm iki 1040nm, o spektro plotis $\Delta\lambda_1$ yra ribose nuo kelių iki 15nm, išskirto antrojo spektro segmento centrinis bangos ilgis λ_2 yra parinktas iš intervalo nuo 1040nm iki 1070nm, o spektro plotis $\Delta\lambda_2$ yra mažesnis už 1nm, išskirtų pirmojo ir antrojo spektro segmentų momentinio dažnio moduliacija yra tiesinė, o minėtas pradinės spinduliuotės bangos ilgis λ_0 yra parinktas tarpe tarp bangos ilgių λ_1 ir λ_2 .

Išradimas priklauso lazerių sričiai, tiksliau kelių išėjimo kanalų lazeriniams šaltiniams, ir yra skirtas generuoti du optiškai sinchronizuotus impulsus, tarpusavyje besiskiriančius centriniu bangos ilgiu ir spektro pločiu. Išradimas gali būti panaudotas parametrinio šviesos stiprinimo sistemose, kuriomis galima gauti didelės smailinės galios impulsus, reikalingus naujausiems moksliniams tyrimams ir turinčius įvairių taikymų medicinoje bei pramoninėje.

Dviejų bangos ilgių sinchronizuoti šviesos impulsai yra reikalingi parametrinio šviesos stiprinimo sistemose. Parametrinis šviesos stiprinimas yra būdas gauti derinamo bangos ilgio lazerinę spinduliuotę. Be to, parametrinio šviesos stiprinimo prietaisai turi keletą savybių, dėl kurių yra tinkami ultratrumpųjų impulsų stiprinimui. Ypač trumpų, trumpesnių nei 1 ps, impulsų efektyvus stiprinimas reikalauja faziškai moduluotų impulsų parametrinio šviesos stiprinimo (FMIPŠS) technologijos. Smailinė galia, siekianti šimtus teravatų, gaunama tik FMIPŠS sistemomis.

Parametrinį šviesos stiprinimo prietaisą pagrindinai sudaro netiesinis kristalas, kuriame tenkinant energijos ir impulso tvermės dėsnius, gali įvykti energijos perdavimas iš kaupinimo bangos į kitų bangos ilgių signalinę ir šalutinę bangas. Parametrinis šviesos prietaisas, kuriame į parametrinio stiprinimo kristalą kartu su kaupinimo bangos spinduliuote krinta ir silpna užkrato spinduliuotė, vadinamas parametriniu šviesos stiprintuvu. Šiuo atveju užkrato bangos ilgis turi sutapti su vieno iš generuojamų pluoštų, geriau signalinio, bangos ilgiu. Kad parametrinis stiprinimas būtų efektyvus ir nenukentėtų stiprinamo pluošto kokybė, reikia išpildyti papildomą sąlygą: kaupinimo bangos ir užkrato pluoštai turi persikloti laike ir erdvėje. Didesnis stiprinimas pasiekiamas su impulsiniu, pavyzdžiui, šimto pikosekundžių eilės, kaupimu. Siekiant gauti itin didelės smailinės galios impulsus, tiek užkrato, tiek kaupinimo impulsai turi būti pikosekundiniai. Dviejų ultratrumpųjų impulsų sutapdinimas erdvėje ir laike reikalauja didelio sistemos tikslumo ir geros kaupinimo bei užkrato impulsų sinchronizacijos. Dviejų bangos ilgių ultratrumpųjų šviesos impulsų sinchronizavimas yra viena svarbiausių techninių užduočių parametriniame ultratrumpųjų šviesos impulsų stiprinime. Pavyzdžiui, 10 ps impulsams reikalaujamas sutapimo laike tikslumas turi būti geresnis nei 1ps, t.y. $1/10$ impulso trukmės. O tai yra ekvivalentu reikalavimui, kad lazerio rezonatoriaus ilgis būtų valdomas mikronų tikslumu.

Yra žinomas aktyvus būdas dviejų bangos ilgių ultratrumpųjų šviesos impulsų

sinchronizavimui panaudojant aukštadažnę elektroniką ir grįžtamuosius ryšius. JAV patentuose nr. US6181463 (Galvanauskas et al.), US6728273 (Perry), US6870664 (Jovanovic et al.), US6791743 (Jovanovic et al.) yra aprašytos parametrinio šviesos stiprinimo sistemos, apimančios du atskirus užkrato ir kaupinimo spinduliuotės lazerinius šaltinius, kurių darbą valdo vienas elektrinių impulsų generatorius. Aktyvus sinchronizavimo būdas yra sudėtingas ir brangus; praktinį pritaikymą gali turėti tik mažo pasikartojimo dažnio sistemose.

Tai pat yra žinomi pasyvūs būdai dviejų bangos ilgių ultratrumpųjų šviesos impulsų sinchronizavimui (dar vadinami optiniu sinchronizavimu). Juose yra vienas pradinis lazerinis šaltinis, kurio išėjimo impulsai perėję kelias formavimo pakopas tampa parametrinio šviesos stiprintuvo užkrato ir kaupinimo impulsais, besiskiriančiais centriniu bangos ilgiu ir spektro pločiu. Literatūroje (C.Y.Teisset et al., Opt. Exp. 13, 6650-6657 (2005); N.Ishii et al., Sel.Tops. in QE12, 173-180 (2006); J.Rothhardt et al., Opt. Exp. 17, 24130-24136 (2009); F.Tavella et al., Opt. Exp. 18, 4689-4694 (2010); D.Yashitomi et al., Opt. Exp. 18, 26027-26036 (2010); A.Harth et al., Opt. Exp. 20, 3076-3081 (2012)) yra aprašytos faziškai moduluotų impulsų parametrinio šviesos stiprinimo sistemos (FMIPŠS), panaudojančios lazerinį šaltinį, išspinduliuojantį dviejų bangos ilgių optiškai sinchronizuotus ultratrumpuosius impulsus, kuris apima titano safyro (Ti:S) sinchronizuotų modų osciliatorių. Užkrato impulsas ir kaupinimo impulsas yra išskiriami tiesiai iš plataus Ti:S spinduliuotės spektro arba bent vienas iš impulsų yra suformuojamas atliekant bangos ilgio pakeitimą ar spektro išplėtimą. Bangos ilgis pakeičiamas pasinaudojant bet kuriuo netiesinės optikos reiškiniu kristale ar fotoninių kristalų skaiduloje: skirtuminio, suminio dažnio ar harmonikų generacija, parametriniu stiprinimu, spektro poslinkiu dėl Ramano sklaidos ar solitoninės saviveikos. Kontinuumo arba superkontinuumo generacija yra atliekama siekiant išplėsti osciliatoriaus spinduliuotės spektrą ir taip pasiekti norimą bangos ilgį. Tarptautinėje patentinėje paraiškoje WO2006122709 (Ishii et al.) aprašyta FMIPŠS sistema, panaudojanti lazerinį šaltinį užkrato ir kaupinimo impulsams gauti, apimanti sinchronizuotų modų Ti:S osciliatorių, o kaupinimui skirtą impulso kelyje yra neodimio (Nd) arba iberbio (Yb) kietakūnis stiprintuvas su prieš juo patalpinta fotoninių kristalų skaidula, pastumiančia osciliatoriaus išėjimo impulso bangos ilgį iki neodimio (Nd) arba iberbio (Yb) jonais legiruotų aktyvių medžiagų stiprinimo juostos.

Ti:S lazeris yra dviejų lazerių sistema, nes kaupinimui reikalinga kito

kietakūnio lazerio antra harmonika arba argono dujų lazerio spinduliuotė. Be to, dėl aktyvioje Ti:S terpėje pasireiškiančių šiluminių reiškinių reikalingas efektyvus aušinimas. FMIPŠS sistemos, panaudojančios pradinį dviejų bangos ilgių lazerinį šaltinį, padarytą Ti:S osciliatoriaus pagrindu, yra sudėtingos, brangios ir reikalauja stabilizuotų šiluminių sąlygų.

Alternatyva laisvos erdvės elementus naudojantiems Ti:S lazeriams – skaiduliniai sinchronizuotų modų lazeriai. Skaidulos turi didelį paviršiaus ploto ir tūrio santykį, jas galima efektyviai aušinti ir pasiekti dideles, kilovatų eilės, vidutines galias. Tai savo ruožtu leidžia dirbti didelio pasikartojimo dažnio režime. Kiti skaidulinių lazerinių šaltinių privalumai yra didelis atsparumas išoriniams veiksniams (temperatūros pokyčiams ir vibracijoms), patogus spinduliuotės transportavimas, aukšta pluošto kokybė ir patogus sistemos surinkimas.

Šiuo metu plačiausiai naudojami iterbio (Yb) ir erbio (Eb) jonų pagrindu veikiantys skaiduliniai lazeriniai šaltiniai. Jie pasižymi plačia stiprinimo juosta, kas leidžia gauti derinamo bangos ilgio ultratrumpuosius impulsus. Dėl žemo generacijos slenksčio ir didelio stiprinimo koeficiento didelės galios sistemoms labiau tinka Yb legiruotos aktyviosios medžiagos. Kita svarbi Yb-lazerių savybė – Yb jonų liuminescencijos juostos kraštas ilgų bangų srityje siekia 1100nm, o stimuliuotosios emisijos skerspjūvio maksimumas (1030nm) yra netoli neodimiu (Nd) legiruočių medžiagų stiprinimo linijos (1064nm). Tai gali būti naudinga siekiant panaudoti Nd-stiprintuvus tolimesniame spinduliuotės stiprinime.

A.Fernández et al., Opt. Lett. 34, 2799-2801 (2009) aprašytas skaidulinis lazerinis šaltinis, išspinduliuojantis optiškai sinchronizuotus ultratrumpuosius impulsus, kuris apima femtosekundinį Yb-skaidulinį osciliatorių, dirbantį ties 1040nm bangos ilgiu. Dalis minėto osciliatoriaus spinduliuotės yra skirta užkrato atšakai, kurioje yra papildomos stiprinimo pakopos bei tolimesnis ultratrumpojo impulso formavimas. Kita dalis osciliatoriaus spinduliuotės gali būti nukreipta tiesiai į Nd-stiprintuvą, o vėliau panaudota kaip kaupinimo impulsas parametriniame šviesos stiprinime. Nenaudojant bangos ilgio pakeitimo, minėto osciliatoriaus impulsas turi labai mažai energijos ties Nd stiprinimo linija, todėl parametrinio šviesos stiprinimo sistema, panaudojanti Fernández et al. lazerinį šaltinį, yra neefektyvi.

Straipsnyje Y.Zhou et al., SPIE Proc. 7582 (2010) ir JAV patentuose nr. US8023538 (Marcinkevicius et al.), US8040929 (Imeshev et al.) aprašytos FMIPŠS

sistemos, panaudojančios dviejų bangos ilgių optiškai sinchronizuotų ultratrumpųjų impulsų šaltinį, apimantį bet kurį iš Er, Er/Yb, Tm, Tm/Yb, Nd ar Yb skaidulinių osciliatorių. Užkrato ir kaupinimo impulsų formavimo etapai apima bent vieno iš impulsų bangos ilgio pakeitimą (pvz. antros harmonikos generaciją) arba spektro išplėtimą (pvz. kontinuumo generaciją arba skirtuminio dažnio generaciją) ir pastiprinimą. Dažniausiai yra atliekama kontinuumo generacija fotoninių kristalų skaidulose, kur vienu metu pasireiškia daug netiesinių reiškinių – fazinė savimoduliacija, Ramano sklaida, keturbangis maišymas. Pagrindinis šių sprendimų trūkumas – minėti netiesiniai reiškiniai reikalauja gana didelio pradinio intensyvumo. Antra, lazerinio šaltinio, apimančio kontinuumo generaciją, efektyvumas yra mažas, nes iš plataus kontinuumo spektro paimama tik nedidelė spinduliuotės dalis. Be to, fotoninių kristalų skaidulos pasižymi aukšta kaina, yra sunkiau integruojamos į vienamodžių skaidulų sistemą.

Siekiant FMIPŠS sistemoje panaudoti dviejų bangos ilgių impulsus, sugeneruotus vienu lazeriniu šaltiniu, labai dažnai tenka atlikti kaupinimui skirtą impulso stiprinimą. Nd:YAG arba kiti Nd jonais legiruoti kietakūniai stiprintuvai pasižymi aukštu stiprinimo koeficientu ir dideliu kvantiniu našumu; laisvos erdvės optika geriausiai išvystyta Nd spektrinei sričiai. Kitas dalykas – moduluotosios fazės impulsų stiprinimo technologija, kuri turi privalumų siekiant efektyviai išnaudoti inversiją sukauptą aktyviojoje medžiagoje, yra sunkiau pritaikoma siaurajuosčių impulsų stiprinime, nes reikalauja sudėtingų ir/arba daug vietos užimančių impulsų plėstuvų ir spaustuvų, tokių, kaip yra aprašyta, pavyzdžiui, M.Y.Shverdin et al., Opt. Lett. 35, 2478-2480 (2010) arba JAV patente US8068522 (Barty et al.). Norint panaudoti Nd-stiprintuvą FMIPŠS sistemoje kaip kaupinimo impulso stiprintuvą, svarbu surasti optimalų būdą, kaip iš osciliatoriaus spinduliuotės gauti reikiamą spektrinę juostą, perdengiančią Nd stimuliuotosios emisijos liniją. Taip pat svarbu surasti sprendimą siaurajuosčio impulso išplėtimui, kad būtų galima panaudoti moduluotosios fazės impulsų stiprintuvą, sukurtą Nd legiruotos medžiagos pagrindu.

Artimiausias pagal techninę esmę yra Marcinkevicius et al. (US8023538) techninis sprendimas, kuriame aprašytas dviejų bangos ilgių optiškai sinchronizuotų ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būdas, apimantis pradinės spinduliuotės generavimą, jos pastiprinimą, spektro pakeitimą bei išėjimo impulsų suformavimą, kur minėtos pradinės spinduliuotės centrinis bangos ilgis λ_0 gali būti parinktas iš Yb jonais legiruotų aktyvių medžiagų liuminescencijos juostos, pastiprintos spinduliuotės

centrinis bangos ilgis sutampa su minėtu pradinės spinduliuotės centriniu bangos ilgiu λ_0 , spektro pakeitimas gali apimti spektro pločio padidinimą iki kontinuumo arba superkontinuumo spektro pločio, o pirmasis ir antrasis išėjimo impulsai yra suformuojami iš pakeisto spektro spinduliuotės išskiriant du spektro segmentus, bent vienas iš suformuotų išėjimo impulsų yra pastiprinamas

Šiam būdui realizuoti Marcinkevicius et al. patente US8023538 aprašytas pradinis dviejų bangos ilgių sinchronizuotų ultratrumpųjų impulsų šaltinis, apimantis femtosekundinį skaidulinį osciliatorių, kuris gali būti ir Yb-osciliatorius. Kaupinimo atšakoje yra panaudojamas kietakūnis stiprintuvas. Siūlomame sprendime dėmesys sutelkiamas į užkrato ir kaupinimo impulsų stiprinimo ir formavimo pakopas, siekiant maksimalių FMIPŠS sistemos išėjimo galios/energijos verčių bei aukštos pluošto kokybės.

Žinomame būde ir įrenginyje nėra išspręstas pradinės spinduliuotės formavimas, kuris užtikrintų aukštą pradinio šaltinio efektyvumą ir patikimumą. Femtosekundinis Yb-osciliatorius yra neefektyvus, nes inversija yra panaudojama plačiam spektrui generuoti, iš kurio vėliau panaudojama tik nedidelė spinduliuotės dalis. Femtosekundinių skaidulinių Yb-osciliatorių spinduliuotė dažnai yra faziškai moduluota, o tai reiškia, kad norint gauti ultratrumpuosius impulsus, osciliatorius privalo turėti savyje spaustuvą.

Didžiausias femtosekundinių Yb-osciliatorių trūkumas yra tas, kad jie yra jautresni sistemos parametrams ir išoriniam poveikiui nei pikosekundiniai Yb-osciliatoriai. Taip pat Marcinkevicius et al. išradime nėra numatytas moduluotosios fazės impulsų stiprintuvas, suformuotas siaurajuostės neodimiu legiruotos aktyviosios medžiagos pagrindu.

Išradimu siekiama sukurti kompaktišką, patikimą lazerinį šaltinį, išspinduliuojantį dviejų bangos ilgių optiškai sinchronizuotus ultratrumpuosius impulsus. Išradimu taip pat siekiama sukurti pigų ir paprastą pradinį šaltinį pasyviai parametrinio šviesos stiprinimo sistemos kanalų sinchronizavimui. Toliau išradimu siekiama sukurti lazerinį šaltinį, kurio išėjimo impulsų spektrinės savybės būtų suderintos su iterbio ir neodimio jonais legiruotų aktyvių medžiagų pagrindu sukurtais stiprintuvais, o fazinės moduliacijos savybės leistų efektyviai atlikti tolimesnį

plačiajuosčio ir siaurajuosčio impulsų formavimą bei stiprinimą.

Uždavinio sprendimo esmė pagal pasiūlytą išradimą yra dviejų bangos ilgių optiškai sinchronizuotų ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būdas, apimantis pradinės spinduliuotės generavimą, jos pastiprinimą, spektro išplėtimą bei išėjimo impulsų suformavimą, kur minėtos pradinės spinduliuotės centrinis bangos ilgis λ_0 yra parinktas iš Yb jonais legiruočių aktyvių medžiagų liuminescencijos juostos, pastiprintos spinduliuotės centrinis bangos ilgis sutampa su minėtu pradinės spinduliuotės centriniu bangos ilgiu λ_0 , išplėsto spektro spinduliuotės spektro plotis $\Delta\lambda$ perdenigia Yb ir Nd jonais legiruočių aktyvių medžiagų stimuliuotosios emisijos maksimumus, o pirmasis ir antrasis išėjimo impulsai yra suformuojami iš išplėsto spektro spinduliuotės išskiriant pirmąjį ir antrąjį spektro segmentus su centriniais bangos ilgiais atitinkamai λ_1 ir λ_2 bei spektro pločiais atitinkamai $\Delta\lambda_1$ ir $\Delta\lambda_2$, ir bent vienas iš suformuotų išėjimo impulsų yra pastiprinamas. Minėtos pradinės spinduliuotės spektro plotis $\Delta\lambda_0$ neviršija 1.5nm ir yra faziškai nemoduluota. išplėsto spektro spinduliuotės spektro plotis $\Delta\lambda$, apibrėžtas 1/10 maksimalaus spektrinio intensyvumo lygyje, yra intervale nuo 40nm iki 45nm, o išskirto pirmojo spektro segmento centrinis bangos ilgis λ_1 yra parinktas iš intervalo nuo 1025nm iki 1040nm, o spektro plotis $\Delta\lambda_1$ yra ribose nuo kelių iki 15nm., išskirto antrojo spektro segmento centrinis bangos ilgis λ_2 yra parinktas iš intervalo nuo 1040nm iki 1070nm, o spektro plotis $\Delta\lambda_2$ yra mažesnis už 1nm. išskirtų pirmojo ir antrojo spektro segmentų momentinio dažnio moduliacija yra tiesinė, o minėtas pradinės spinduliuotės bangos ilgis λ_0 yra parinktas tarpe tarp bangos ilgių λ_1 ir λ_2 .

Pradinės spinduliuotės bangos ilgis λ_0 yra viduryje tarp bangos ilgių λ_1 ir λ_2 .

Pradinės spinduliuotės spektro plotis $\Delta\lambda_0$ yra mažesnis nei 1nm.

Išskirto pirmojo spektro segmento centrinis bangos ilgis λ_1 yra lygus 1030nm, o spektro plotis $\Delta\lambda_1$ yra parinktas iš intervalo nuo 2nm iki 10nm.

Išskirto antrojo spektro segmento centrinis bangos ilgis λ_2 yra lygus 1064nm.

Pranašumą turinčiame šio išradimo konstrukciniame išpildyme pasiūlytas lazerinis šaltinis, išspinduliuojantis dviejų bangos ilgių optiškai sinchronizuotus ultratrumpuosius šviesos impulsus, apimantis užduodantįjį generatorių ir bent vieną

moduliuotosios fazės impulsų stiprintuvą, kur užduodantysis generatorius yra sudarytas iš optiškai susietų skaidulinių optinių komponentų, kurie apima iterbio (Yb) jonais legiruotą skaidulinį sinchronizuotų modų osciliatorių (8), generuojantį pradinę lazerinę spinduliuotę su centriniu bangos ilgiu λ_0 ir spektro pločiu $\Delta\lambda_0$, bent vieną Yb jonais legiruotą skaidulinį stiprintuvą (9), skirtą pastiprinti minėtą pradinę spinduliuotę, optinį elementą, pasižymintį netiesinėmis savybėmis, skirtą spinduliuotės spektrui išplėsti, spektrinio filtravimo įrenginį, skirtą atskirti dviejų bangos ilgių λ_1 ir λ_2 spektro segmentus, apibūdinamus spektro pločiais atitinkamai $\Delta\lambda_1$ ir $\Delta\lambda_2$, kurių spinduliuotė išeina atitinkamai iš pirmojo ir antrojo užduodančiojo generatoriaus išėjimų; o bent vienas moduliuotosios fazės impulsų stiprintuvas apima impulsų plėstuvą, kvantinį stiprintuvą ir impulsų spaustuvą. Minėtas Yb jonais legiruotas skaidulinis sinchronizuotų modų osciliatorius (8) yra parinktas, kad sugeneruotų spektriškai ribotą kelių pikosekundžių impulsą, o skaidulinių optinių komponentų parametrai yra iš anksto parinkti taip, kad išplėstas spektras turėtų tiesinės momentinio dažnio moduliacijos segmentus (D, E) ties bangos ilgiais λ_1 ir λ_2 , kur

λ_1 yra parinktas iš intervalo nuo 1025nm iki 1040nm,

λ_2 yra parinktas iš intervalo nuo 1040nm iki 1070nm

ir kur pirmojo spektro segmento (D) plotis $\Delta\lambda_1$ yra ribose nuo kelių iki 15nm, o antrojo spektro segmento (E) plotis $\Delta\lambda_2$ yra mažesnis už 1nm; bent vienas iš minėtų moduliuotosios fazės impulsų stiprintuvų yra moduliuotosios fazės impulsų stiprintuvas (5), skirtas sustiprinti antrojo spektro segmento (E) spinduliuotei (7), išeinančiai iš antrojo užduodančiojo generatoriaus išėjimo.

Užduodantysis generatorius yra suformuotas vienamodžių optinių skaidulų pagrindu.

Minėtas optinis elementas, pasižymintis netiesinėmis savybėmis, skirtas spinduliuotės spektrui išplėsti, yra vienamodė optinė skaidula, kurios ilgis yra parinktas ribose nuo 2 iki 20 metrų.

Minėtas moduliuotosios fazės impulsų stiprintuvas, skirtas antrojo spektro segmento spinduliuotei sustiprinti, yra sukurtas Nd jonais legiruotos kietakūnės aktyviosios medžiagos pagrindu.

Minėtas bent vienas moduliuotosios fazės impulsų stiprintuvas yra sukurtas Yb jonais legiruotų aktyvių medžiagų pagrindu ir šio tipo moduliuotosios fazės

impulsų stiprintuvai yra skirti atitinkamai pirmojo ir/arba antrojo spektro segmentų spinduliuotėms stiprinti.

Moduliuotosios fazės impulsų stiprintuvo impulsų plėstuvas ir/arba spaustuvai yra čirpuota tūrinė Brego gardelė.

Kias pranašumą turintis šio išradimo konstrukcinis pasiūlymas yra faziškai moduluotų impulsų parametrinis šviesos stiprintuvas, kuriame yra panaudotas pasiūlytas lazerinis šaltinis .

Lazerinis šaltinis, apimantis stabilų pradinės spinduliuotės užduodantį generatorių ir sukurtas vien tik skaidulinių optinių komponentų, geriau vienamodžių optinių skaidulų, pagrindu, yra paprastas, pigus ir patikimas. Lazerinis šaltinis, išspinduliuojantis impulsus, kurių bangos ilgiai perdengia iterbiu ir neodimiu legiruotų aktyvių medžiagų spektrinius diapazonus, o fazinės moduliacijos savybės leidžia efektyviai atlikti tolimesnį plačiajuosčio ir siaurajuosčio impulsų formavimą bei stiprinimą, užtikrina aukštą parametrinio šviesos stiprinimo sistemos energinį efektyvumą ir stabilumą.

Greta jau minėtų savybių, užduodančiojo generatoriaus impulsai iš dviejų išėjimų yra sinchronizuoti tarpusavyje ir suderinti su Yb ir Nd aktyvių terpių spektrinėmis stiprinimo savybėmis. Labai svarbi jų charakteristika yra momentinio dažnio pasiskirstymas po impulso gaubtinę, t.y. čirpo profilis. Užduodančiojo generatoriaus netiesinės ir dispersinės savybės užtikrina, kad dviejų išėjimų impulsai yra ne tik faziškai moduluoti, bet ir momentinio dažnio moduliacija yra tiesinė. Šios savybės duoda du privalumus. Pirmas, faziškai moduluotą siaurajuosčių impulsą yra lengviau išplėsti stiprintuvo impulsų plėstuve ir tuo būdu pasiekti didesnę stiprinimą. Antra, plačiajuostis užkrato atšakos impulsas tolimesnėse formavimo ir stiprinimo pakopose bei parametrinio šviesos stiprinimo netiesiniame kristale metu išlaiko tiesinę momentinio dažnio moduliaciją. Dėl šios priežasties parametriškai sustiprintą impulsą, galima suspausti iki spektriškai ribotos trukmės, kaip impulsų spaustuvių panaudojant net ir paprastą prizmių arba difrakcinių gardelių porą. Spektriškai ribota parametriškai sustiprinto impulso trukmė užtikrina maksimalią smailinę galią.

Toliau išradimas detaliau paaiškinamas brėžiniais, kuriuose:

Fig.1 – diagrama, iliustruojanti šio išradimo principą;

Fig.2 – šio išradimo lazerinio šaltinio blokinė schema;

Fig.3 – blokinė schema, vaizduojanti faziškai moduluotų impulsų parametrinio šviesos stiprinimo sistemą su inkorporuotu lazeriniu šaltiniu pagal Fig.2.;

Fig.4 – impulso gaubtinės kitimas impulsui sklindant terpe, pasižyminčia netiesinėmis ir dispersinėmis savybėmis;

Fig.5A-Fig.5D – spinduliuotės spektro kitimas impulsui sklindant terpe, pasižyminčia netiesinėmis ir dispersinėmis savybėmis;

Fig.6A-Fig.6D – čirpo profilio kitimas impulsui sklindant terpe, pasižyminčia netiesinėmis ir dispersinėmis savybėmis ;

Fig.7 – intensyvumo pasiskirstymas ir čirpo profilis, gaunami šio išradimo lazerinėje sistemoje;

Fig.8 – spektrinio filtravimo įrenginio pavyzdys.

Fig.1 iliustruojamas šio išradimo principas. Pradiniame etape 1 generuojama siauro spektro spinduliuotė su centriniu bangos ilgiu λ_0 ir spektro pločiu $\Delta\lambda_0$, kuri vėliau (etapas 2) yra papildoma naujomis spektrinėmis komponentėmis iki spektro pločio $\Delta\lambda$. Galiausiai (etapas 3) iš išplitusio spektro spinduliuotės yra atskiriamos dvi spektrinės juostos, besiskiriančios centriniu bangos ilgiu λ_1 , λ_2 ir spektro pločiu $\Delta\lambda_1$ ir $\Delta\lambda_2$, atitinkamai. Pirmasis etapas 1 apima pikosekundinio impulso generavimą ir stiprinimą skaiduliniame lazeryje, antrasis etapas 2 apima sugeneruoto impulso spektro išplėtimą, paremtą netiesiniais ir dispersiniais reiškiniais. Trečiasis etapas 3 apima spinduliuotės spektrinį filtravimą, pastiprinimą ir, jeigu reikia, išplėtimą laike. Detaliau kokie optiniai elementai leidžia realizuoti šio išradimo tikslus yra paaiškinama tolimesniuose brėžiniuose ir jų aprašymuose.

Fig.2 pavaizduota šio išradimo lazerinė sistema, sudaryta iš užduodančiojo generatoriaus 4 ir kaupinimo impulso stiprintuvo 5. Minėtas užduodantysis generatorius 4 yra skaidulinė optinė sistema, išspinduliuojanti du sinchronizuotus ultratrumpuosius impulsus 6, 7, kurie vėliau gali būti stiprinami iterbio (Yb) ir neodimio (Nd) stiprintuvais. Pirmojo išėjimo kanalo spinduliuotės 6 centrinis bangos ilgis

atitinka Yb legiruotų aktyvių medžiagų stiprinimo juostos maksimumą, o spinduliuotės spektras yra kiek galima platesnis (toliau pirmojo išėjimo kanalo spinduliuotė 6 bus vadinama užkrato atšakos arba plačiajuosčiu impulsu). Antrojo išėjimo kanalo spinduliuotės 7 centrinis bangos ilgis atitinka Nd legiruotų aktyvių medžiagų stiprinimo liniją, o spektro plotis gali būti mažas (toliau antrojo išėjimo kanalo spinduliuotė 7 bus vadinama kaupinimo atšakos arba siaurajuosčiu impulsu). Minėtas kaupinimo impulso stiprintuvas 5 yra neodimiu legiruotos aktyvios medžiagos regeneratyvinis stiprintuvas ir/arba moduluotosios fazės impulsų stiprintuvas.

Užduodantysis generatorius 4, išspinduliuojantis du optiškai sinchronizuotus impulsus 6 ir 7, apibūdinamus centriniais bangos ilgiais atitinkamai λ_1 bei λ_2 ir spektro pločiais atitinkamai $\Delta\lambda_1$ bei $\Delta\lambda_2$, apima Yb skaidulinį sinchronizuotų modų osciliatorių 8, bent vieną Yb skaidulinį stiprintuvą 9, netiesinėmis ir dispersinėmis savybėmis pasižymintį optinį elementą 10 ir spektrinio filtravimo įrenginį 11.

Yb skaidulinis sinchronizuotų modų osciliatorius 8 suderinamas išspinduliuoti spektriškai ribotus nuo 1 iki 5 ps trukmės impulsus (kas atitinka apie 1.5nm arba siauresnį spektro plotį $\Delta\lambda_0$) ties bangos ilgiu λ_0 . Konkreti bangos ilgio reikšmė λ_0 iš plačios iterbio generacijos juostos parenkama priklausomai nuo to, kokiai neodimiu legiruotai aktyviajai terpei yra skiriama užduodančiojo generatoriaus 4 antrojo išėjimo kanalo spinduliuotė 7. Osciliatoriaus spinduliuotės bangos ilgio derinimas atliekamas laisvos erdvės filtro ir/arba skaidulinės Brego gardelės pagalba. Tiesiogiai iš osciliatoriaus gaunama nuo kelių iki kelių dešimčių mW vidutinės galios spinduliuotė.

Toliau impulsas yra pastiprinamas stiprinimo elemente 9, sudarytame iš vieno arba kelių vienamodžių iterbio skaidulinių stiprintuvų. Taip gaunama vidutinė galia iki kelių šimtų milivatų, kuri yra reikalinga, kad efektyviai vyktų impulso fazinė savimoduliacija. Nepaisant to, kad jau stiprinimo elemente 9 pradeda reikštis netiesiškumai, spektras minėto stiprinimo elemento 9 išėjime neperdengia iterbio ir neodimio stiprinimo maksimumų. Todėl į generatorių 4 yra inkorporuojamas netiesinis-dispersinis optinis elementas 10, kuriuo spinduliuotės spektras išplečiamas iki maždaug 40nm, tačiau nedidesnio kaip 45nm, spektro pločio $\Delta\lambda$.

Kitas svarbus aspektas – dėl netiesinių ir dispersinių sistemos savybių spinduliuotė optinio elemento 10 išėjime 12 yra faziškai moduluota (dar vad. čirpuota), o momentinio dažnio moduliacijos profilis (dar vad. čirpo profilis) priklauso nuo netiesiškumo bei dispersijos parametrų, ir žinoma, sistemos ilgio. Siekiant

įgyvendinti šio išradimo tikslus – iš vieno lazerinio šaltinio gauti optiškai sinchronizuotus išėjimo impulsus, kurie galės toliau būti stiprinami iterbiu ir neodimiu legiruotose aktyviosiose medžiagose, ir tuo pačiu kad sistema būtų patikima ir pigi, – kaip netiesinis-dispersinis optinis elementas 10 geriausiai tinka vienamodė optinė skaidula, kurioje vienu metu pasireiškia optinis Kero efektas ir dispersija. Įprastų telekomunikacijoje naudojamų vienamodžių optinių skaidulų Kero netiesiškumo ir dispersijos parametrai leidžia nesunkiai pasiekti minėtą maždaug 40nm spektro plotį, kuris perdengia Yb ir Nd stiprinimo juostų maksimumus, tuo pačiu gaunant tiesinį momentinio dažnio profilį po visa impulso gaubtine. Minėtos vienamodės optinės skaidulos, skirtos spinduliuotės spektrui išplėsti, ilgis yra parenkamas iš intervalo nuo 2m iki 20m.

Dviejų bangos ilgių sinchronizuoti impulsai gaunami spektrinio filtravimo įrenginio 11 pagalba: iš išplitusio spektro pločio $\Delta\lambda$ spinduliuotės, gaunamo optinio elemento 10 išėjime 12, išfiltruojami du spektro segmentai, apibūdinami skirtingais centriniais bangos ilgiais (λ_1 , λ_2) bei spektro pločiais ($\Delta\lambda_1$ ir $\Delta\lambda_2$, atitinkamai), kurie tampa generatoriaus 4 išėjimo impulsais 6, 7. Į pirmąjį užduodančiojo generatoriaus 4 išėjimo kanalą atskiriamas spektro segmentas, kurio centrinis bangos ilgis $\lambda_1 = 1030\text{nm}$, t.y. atitinka Yb-stiprintuvų stiprinimo maksimumą, o spektro plotis $\Delta\lambda_1$ yra intervale nuo kelių iki dešimties nm. Dėl fazinės moduliacijos laike ši spinduliuotė užima kelias pikosekundes, o energija siekia kelis šimtus pikodžaulių. Tai yra pirmasis išėjimo impulsas 6. Antrasis generatoriaus 4 išėjimo kanalas yra pritaikomas Nd-stiprintuvams (Nd:YAG, Nd:YLF, Nd:YVO₄, Nd:KGW ir kt.). Pagal pirmąją šio išradimo realizaciją, į antrąjį užduodančiojo generatoriaus 4 išėjimo kanalą atskiriamas $\Delta\lambda_2 < 1\text{nm}$ spektro pločio segmentas ties bangos ilgiu $\lambda_2 = 1064\text{nm}$, t.y. skirtas Nd:YAG stiprintuvui. Dėl fazinės moduliacijos laike ši spinduliuotė užima kelias pikosekundes, o energija yra šimto pikodžaulių eilės. Tai yra antrasis išėjimo impulsas 7. Kad išplitusio spektro spinduliuotė optinio elemento 10 išėjime 12 perdengtų 1030nm ir 1064nm bangos ilgius, pradinio osciliatoriaus 8 bangos ilgis turi būti maždaug per vidurį tarp 1030nm ir 1064nm, t.y. $\lambda_0 = 1047\text{nm}$.

Dėl ypač aukšto pikosekundinių Yb-skaidulinių osciliatorių energinio stabilumo, optinio elemento 10 išėjime 12 gaunamas atsikartojantis čirpo profilis. Taigi spektriškai atskiriant pluoštus 6 ir 7, jų laikinis vėlinimas yra pastovus (apie tai plačiau bus parašyta prie Fig.7 aprašymo).

Kita svarbi šio išradimo lazerinės sistemos dalis – kaupinimo impulso stiprintuvas 5. Tai yra Nd jonais legiruotos aktyviosios medžiagos, arba bet kurios kitos aktyviosios medžiagos, kurios stiprinimo diapazonas perdengia Nd jonais legiruotų medžiagų stimuliuotosios emisijos linijas, pagrindu sukurtas moduluotosios fazės impulsų stiprintuvas. Jį sudaro impulsų plėstuvas 13, bent vienas stiprintuvas 14 (tai gali būti regeneratyvinis stiprintuvas arba stiprintuvų grandinė – regeneratyvinis stiprintuvas su paskui juo einančiu vienu arba dviem vienalėkiais arba daugialėkiais stiprintuvais) bei impulsų spaustuvas 15. Pagal pirmąją šio išradimo realizaciją, stiprintuvo 14 aktyvioji medžiaga yra Nd:YAG.

Moduluotosios fazės impulsų stiprinimo technologija yra būtina siekiant efektyviai išnaudoti inversiją sukaupą Nd aktyviojoje terpėje. Dėl šios priežasties iš užduodančiojo generatoriaus 4 per kreipiančiąją optiką 16, 17 ateinantis kelių pikosekundžių, pvz. 8ps, impulsas 7 impulsų plėstuve 13 yra išplečiamas iki kelių šimtų pikosekundžių, pvz., (200-300) ps, trukmės. Faziškai moduluotas siaurajuostis impulsas yra lengviau plečiamas ir lengviau spaudžiamas nei spektriškai ribotas siaurajuostis impulsas. Kaip impulsų plėstuvas 13 gali būti panaudota ilga, (200-400)m ilgio, vienamodė optinė skaidula arba čirpuota skaidulinė ar tūrinė Brego gardelė. Pastiprinus stiprintuve 14, impulsas yra suspaudžiamas iki kelių dešimčių pikosekundžių. Kaip impulsų spaustuvas 15 gali būti panaudota viena arba kelios čirpuotos tūrinės Brego gardelės. Siaurajuostis pastiprintas impulsas 18 kaupinimo impulsų stiprintuvo 5 išėjime, kuris taip pat yra sinchronizuotas su impulsu 6, yra nuo kelių iki šimto mJ energijos.

Pagal kitas šio išradimo realizacijas stiprintuvas 14 gali būti sukurtas Yb jonais legiruotos aktyviosios medžiagos pagrindu, arba kombinuojant Yb- ir Nd-aktyviasias medžiagas, pavyzdžiui, stiprintuvas 14 yra grandinė iš regeneratyvinio Yb-stiprintuvo ir vieno arba kelių vienalėkių Nd-stiprintuvų.

Fig.3 pavaizduota faziškai moduluotų impulsų parametrinio šviesos stiprinimo (FMIPŠS) sistema su inkorporuotu šio išradimo lazeriniu šaltiniu pagal Fig.2. Lazerinės sistemos, sudarytos iš užduodančiojo generatoriaus 4 ir kaupinimo impulso stiprintuvo 5, sinchronizuoti išėjimo impulsai 6 ir 18 yra nukreipiami (pasinaudojant bent vienu optiniu elementu 19) į netiesinį kristalą 20 ir sutapdinami laike bei erdvėje. Siaurajuostis pastiprintas impulsas 18, kitame netiesiniame kristale 21 atlikus bangos ilgio pakeitimą, pvz., antros harmonikos generaciją (kad būtų

tenkinamas bangos ilgių sąryšis tarp kaupinimo ir parametriškai stiprinamos bangos), gali būti panaudotas kaip kaupinimo banga parametriniame šviesos stiprinime. Plačiajuosčio užkrato atšakos impulso 6 trukmė impulsų plėstuve 22 yra padidinama iki kelių dešimčių pikosekundžių. Toks išplėstas impulsas iškart gali būti panaudotas kaip užkratas faziškai moduluotų impulsų parametriniame šviesos stiprinime. Antra vertus, jis yra suderintas su Yb legiruotų aktyvių medžiagų stiprinimo juosta, todėl, prieš patenkant į parametrinio šviesos stiprinimo kristalą 20, gali būti pastiprintas Yb-stiprintuvu 23, neprarandant spektro pločio. Impulsų plėstuvai 22 ir vienas arba keli Yb stiprintuvai 23, parinkti iš skaidulinių arba kietakūnių (pvz. Yb:KGW arba Yb:YAG) Yb jonais legiruotų aktyvių medžiagų, kartu veikia kaip faziškai moduluotų impulsų stiprintuvai, kuriame vyksta efektyvus ultratrumpo impulso stiprinimas. Užkrato impulso kelyje taip pat gali būti patalpinti papildomi optiniai elementai 24, atliekantys tolimesnį jo formavimą. Analogiškai, kaupinimo impulso kelyje gali būti papildomi optiniai elementai 25: stiprinimo pakopos ar netiesiniai kristalai. Netiesiniame kristale 20 parametriškai sustiprinta spinduliuotė yra suspaudžiama impulsų spaustuvu 26 iki kelių dešimčių/šimtų femtosekundžių trukmės impulso 27.

Fig.3 pateikta tik iliustraciniais tikslais, tačiau neapima visų galimų šio išradimo lazerinės sistemos, sudarytos iš užduodančiojo generatoriaus 4 ir kaupinimo impulso spaustuvo 5, inkorporavimo į FMIPŠS sistemą galimybių. Užduodančiojo generatoriaus 4 išėjimo impulsai 6, 7 yra sinchronizuoti tarpusavyje ir suderinti su Yb ir Nd aktyvių terpių spektrinėmis stiprinimo savybėmis, labai svarbi jų charakteristika yra momentinio dažnio pasiskirstymas po impulso gaubtinę, t.y. čirpo profilis. Užduodančiojo generatoriaus 4 netiesinės ir dispersinės savybės užtikrina, kad impulsai 6 ir 7 yra ne tik faziškai moduluoti, bet ir tai, kad momentinio dažnio moduliacija yra tiesinė. Šios savybės duoda du privalumus. Pirma, faziškai moduluotą siaurajuostį impulsą 7 yra lengviau išplėsti stiprintuvo 5 impulsų plėstuve 13, ir tuo būdu pasiekiamas didesnis stiprinimas. Antra, plačiajuostis užkrato atšakos impulsas 6 tolimesnėse formavimo ir stiprinimo pakopose 22-24 bei parametrinio šviesos stiprinimo netiesiniame kristale 20 metu išlaiko tiesinę momentinio dažnio moduliaciją. Dėl šios priežasties parametriškai sustiprintą impulsą, galima suspausti iki spektriškai ribotos trukmės, kaip impulsų spaustuvą 26 panaudojant net ir paprastą prizmių arba difrakcinių gardelių porą. Spektriškai ribota parametriškai sustiprinto impulso 27 trukmė užtikrina maksimalią smailinę galią.

Toliau yra paaiškinama, kaip išradimo užduodantysis generatorius 4

išspinduliuoja du sinchronizuotus impulsus 6 ir 7, besiskiriančius centriniais bangos ilgiais ir pločiais, bei apibūdinamus tiesine momentinio dažnio moduliacija. Netiesinės ir dispersinės generatoriaus 4 savybės užtikrina, kad į pirmąjį išėjimo kanalą galima atskirti plačiajuostę spinduliuotę ties 1030nm, kurios momentinio dažnio moduliacija yra tiesinė. Tuo pačiu į antrąjį išėjimo kanalą galima atskirti siaurą spektrinę liniją, atitinkančią Nd legiruočių medžiagų stiprinimo liniją, kuri taip pat yra apibūdinama tiesine momentinio dažnio moduliacija. Be to, pirmojo ir antrojo išėjimo kanalų impulsai 6 ir 7 neturi laikinės tirties vienas kito atžvilgiu.

Impulsui sklindant netiesine-dispersine terpe jo spektrui ir trukmei įtakos turi fazinė savimoduliacija (dėl optinio Kero netiesiškumo) ir grupinių greičių dispersija. Tai ypač aktualu ultratrumpųjų impulsų atveju: dėl mažos impulso trukmės momentiniai intensyvumai pasiekia vertes, kurioms esant fazinė savimoduliacija pasidaro pastebima, kas pasireiškia impulso spektro išplitimu ir spektrinių dedamųjų išsifazavimu. Tuo tarpu dėl padidėjusio impulso spektro pločio dispersija irgi yra reikšminga. Šie reiškiniai vyksta vienu metu. Kadangi ties maždaug 1 mikrometru kvarcinėje skaiduloje dispersija yra normali, ji negali sukompensuoti spektrinių dedamųjų išsifazavimo, atsirandančio dėl Kero netiesiškumo. Tačiau dispersija stipriai įtakoja čirpo profilio formą. Skaidulinėje optikoje netiesiškumai ir dispersija pasireiškia stipriau nei laisvos erdvės ar tūrinėje optikoje.

Šio išradimo užduodančiojo generatoriaus 4 (žiūr. Fig.2) stiprintuvas 9 ir optinis elementas 10 kartu veikia kaip netiesinė-dispersinė terpė. Stiprintuve 9 pasiekiami intensyvumai, prie kurių pasireiškia impulso saviveika: spektras plinta ir keičiasi dedamųjų fazės. Dėl naujų spektrinių dedamųjų dispersija tampa pastebima.

Svarbu pastebėti, kad pagal prioritetinę realizaciją, optinis elementas 10, pasižymintis netiesinėmis ir dispersinėmis savybėmis, yra paprasta vienamodė optinė skaidula, tačiau galima panaudoti ir kitokį optinį elementą, pvz. išplonintą vienamodę optinę skaidulą, kurios netiesinės ir dispersinės savybės leis pasiekti reikiamą spektro išplitimą ir čirpo profilį.

Fig.4-Fig.6D iliustruoja kaip kinta impulso trukmė, spektras ir čirpo profilis impulsui sklindant netiesine-dispersine terpe. Čia L_0 žymi netiesinės-dispersinės terpės pradžią, o L_1 - L_4 yra šioje terpėje nukeliautas impulso kelias, kur $L_1 < L_2 < L_3 < L_4$. Impulsas, kurio pradinis intensyvumo pasiskirstymas I_{L_0} yra Gauso pavidalo, už tam tikro atstumo tampa nebe gausinis (I_{L_1} , I_{L_2} , I_{L_3} , I_{L_4} , Fig.4). Be to, jo

intensyvumas mažėja, o trukmė didėja.

Iš spektrinio intensyvumo kreivių (Fig.5A-5D) matyti, kad atstumui didėjant, spektrinių dedamųjų daugėja. Tam tikrame atstume L4 (Fig.5D) spektras nustoja plitęs, nes dėl sumažėjusio impulso intensyvumo nebevyksta fazinė savimoduliacija. Atstumas L4 priklauso nuo netiesinės-dispersinės terpės parametrų bei pradinio impulso intensyvumo I_{L0} . Šio išradimo optinių elementų parametrai leidžia pasiekti spektro išplitimą iki maždaug 40nm pločio. Kai pradinis bangos ilgis $\lambda_0 = 1047\text{nm}$, išplitusio spektro spinduliuotės normuotasis spektrinis intensyvumas S viršija 0.01 lygį diapazone nuo 1023nm iki 1073nm ribose, o diapazone nuo 1026nm iki 1070nm $S \geq 0.1$. Taigi išplėsto spektro spinduliuotės spektro plotis $\Delta\lambda$, apibrėžtas 1/10 maksimalaus spektrinio intensyvumo lygyje, yra lygus 44nm.

Čirpo profilis taip pat kinta (žiūr. Fig.6A-Fig.6D; laikas yra sunormuotas į impulso trukmę pusės intensyvumo aukštyje). Impulsui nukeliavus nedidelį atstumą (Fig.6A) netiesinėje-dispersinėje terpėje, čirpo profilis yra artimas vien tik fazinės savimoduliacijos paveikto impulso čirpo profiliui. Impulso nukeliautam keliui ilgėjant (Fig.6B-Fig.6D), dispersijos įtaka darosi vis didesnė. Dviejų vienu metu veikiančių reiškinių – fazinės savimoduliacijos ir dispersijos – pasekoje čirpo profilis transformuojasi: išryškėja ilga centrinė tiesinio kitimo sritis A. Kuo ilgesnis impulso nukeliautas kelias, tuo ši sritis yra platesnė. Pasiekus atstumą L3 (Fig.6C) tiesinio čirpo sritis A apima beveik visą spektro plotį. Netiesinės sritys yra tik impulso kraštuose, t.y. kai normuotasis laikas yra mažesnis už -2 (Fig.7 sritis B) ir didesnis už +2 (Fig.7 sritis C), kur intensyvumas yra nykstamai mažas. Toliau (Fig.6D) čirpo profilis jau beveik nebekinta, nes spektras daugiau neplinta. Keičiasi tik spektrinių dedamųjų tarpusavio vėlinimas.

Šio išradimo esmę sudaro visų sistemos parametrų parinkimas: osciliatoriaus 8 bei stiprintuvo 9 skaidulų geometriniai parametrai ir legiravimo lygiai, optinio elemento 10 ilgis (jei elementas 10 yra vienamodė optinė skaidula, geriausia, kad jos skersiniai geometriniai parametrai sutaptų su osciliatoriaus ir stiprintuvo skaidulų parametrais). Fig.5A-Fig.6D paveikslų kreivės vaizduoja spektro ir čirpo profilius užduodančiojo generatoriaus 4 elemento 10 išėjime 12, esant skirtingam visos sistemos ilgiui. Parinkus optimalius pradinio osciliatoriaus 8 ir stiprintuvo 9 parametrus (geometriją ir legiravimo lygius), lengviausiai varijuojamas parametras yra optinio elemento 10 ilgis. Išradimo tikslams pasiekti Fig.6A ir Fig.6B pavaizduoti

čirpo profiliai nėra tinkami. Padidinus optinio elemento 10 ilgį, kol čirpo profilis tampa panašus į kreivę 29, pavaizduotą Fig.6C, arba į kreivę 30, pavaizduotą Fig.6D, kuriose spektro išplitimas yra pakankamas, o centrinę dalį galima aproksimuoti viena arba dviem tiesėmis.

Fig.7 paveiksle iliustruojama, kad turint čirpo profilį 29, nesunku išfiltruoti du spektrinės juostos segmentus D ir E, besiskiriančius centriniais bangos ilgiais ir pločiais, kurių čirpas yra tiesinis. Tokia spinduliuotė yra nesunkiai spaudžiama iki spektriškai ribotos trukmės, pasinaudojant paprastais optiniais elementais, pvz. prizmių ar gardelių pora. Po visa impulso gaubtinė (žiūr. į sunormuoto intensyvumo kreivę 31) čirpas yra tiesinis, ir tik impulso kraštuose yra netiesinio čirpo sritys B, C. Todėl nesunku parinkti tiesiškai čirpuotą spektro segmentą D su centriniu bangos ilgiu $\lambda_1 = 1030\text{nm}$ (Yb-stiprintuvui) ir spektro pločiu $\Delta\lambda_1$ nuo kelių iki 10nm. Taip pat yra nesunku parinkti $\Delta\lambda_2 \leq 1\text{nm}$ spektro pločio segmentą E su centriniu bangos ilgiu $\lambda_2 = 1064\text{nm}$ (Nd:YAG stiprintuvui). Spinduliuotė, atitinkanti segmentą D, yra išleidžiama per pirmąjį, o segmentą E – per antrąjį šio išradimo užduodančiojo generatoriaus 4 išėjimo kanalą. Energija, tenkanti kiekvienam iš išėjimo impulsų 6, 7, yra proporcinga spektrinių dedamųjų intensyvumų integralui, t.y. plotui po kreivės 31 segmentais I_D , I_E .

Iš kreivės 31 taip pat matyti spektrinių dedamųjų poslinkis laike: spektro dedamosios, esančios srityje D, atsilieka nuo spektro dedamųjų, esančių srityje E. Taigi šio išradimo generatoriaus 4 pirmasis išėjimo impulsas 6 pasirodo vėliau nei antrojo išėjimo impulsas 7. Kadangi šio išradimo užduodantysis generatorius 4 yra sudarytas iš skaidulinių elementų, kurie nėra jautrūs aplinkos poveikiui, be to, pradinis Yb-osciliatorius pasižymi ypač aukštu impulso energijos ir trukmės stabilumu, užtikrinamas čirpo profilio atsikartojimas ir pastovus užlaikymas tarp ultratrumpųjų impulsų 6 ir 7. Laikinė tirtis neviršija dešimčių femtosekundžių.

Pagal kitas šio išradimo realizacijas antrasis užduodančiojo generatoriaus 4 išėjimo kanalas yra lengvai suderinamas su bet kokia aktyviaja medžiaga, turinčia stimuliuotosios emisijos liniją (1040-1070)nm srityje. Kaip matyti iš Fig.7, antrasis spektro segmentas E gali būti parinktas plačiame bangos ilgių diapazone. Kai pradinis bangos ilgis $\lambda_0 = 1047\text{nm}$, išplitęs spektras turi dedamųjų iki 1073nm, todėl net ir nekeičiant sistemos parametrų, ją galima suderinti su bet kuriuo iš Nd:YAG, Nd:YVO₄ ($\lambda_2 = 1064\text{nm}$), Nd:YLF ($\lambda_2 = 1047\text{nm}$ arba 1053nm), Nd:GdVO₄ ($\lambda_2 =$

1063nm), Nd:KGW ($\lambda_2 = 1067\text{nm}$) ir t.t. Priklausomai nuo λ_2 reikšmės, pasikeičia impulso 7 energija ir užlaikymas impulso 6 atžvilgiu.

Kitoje realizacijoje galima parinkti kitokį pradinį bangos ilgį λ_0 , pvz. per vidurį tarp 1030nm ir 1047nm, 1053nm, 1063nm ar 1067nm. Tuomet reiks pakoreguoti ir kitus sistemos parametrus. Pavyzdžiui, norint gauti sinchronizuotus impulsus Yb:KGW ir Nd:YLF stiprintuvams, pakaks spektro išplitimo $\Delta\lambda = 30\text{nm}$, kad būtų perkloti 1030nm ir 1053nm bangos ilgiai. Todėl užteks mažesnio netiesinės-dispersinės terpės ilgio.

Pagal dar vieną šio išradimo realizaciją užduodančiojo generatoriaus 4 pirmojo išėjimo kanalo spinduliuotės 6 centrinis bangos ilgis λ_1 nesutampa su Yb aktyvių jonų stiprinimo maksimumu 1030nm, bet vis tiek patenka į Yb-stiprintuvų spektrinę juostą. Paslinkus λ_1 į ilgesnių bangų sritį, atsiranda galimybė parinkti didesnio nei 10nm spektro pločio segmentą D, atitinkantį 100fs eilės spektriškai ribotą impulsą.

Fig.8 paveiksle pateikiamas pavyzdys, kaip gali būti realizuotas spektrinio filtravimo įrenginys 11, pasinaudojant skaiduline optika. Pagrindiniai įrenginio elementai – skaidulinis lazerinių pluoštų daliklis 32 ir skaidulinė Brego gardelė 33, kuri atspindyje veikia kaip siaurajuostis filtras. Spinduliuotės, skirtos antram išėjimo kanalui, kelyje gali būti priešstiprintuvis 34, pvz., skaidulinis Yb-stiprintuvas. Panaudojant filtrus 35, 36, išskiriamos reikiamos spektrinės juostos ir/arba eliminuojama spontaniinė emisija.

Pagrindiniai šio išradimo lazerinės sistemos privalumai: efektyvumas, paprastumas ir patikimumas. Visų pirma dėl to, kad pikosekundinio osciliatoriaus atveju inversija panaudojama siauresniam spektrui generuoti. Antra, spektras už osciliatoriaus plečiamas nedaug – tik tiek, kiek būtinai reikia Yb ir Nd stiprinimo maksimumams perkloti. Pikosekundinis Yb-osciliatorius yra patikimas ir ilgaamžis, o jo faziškai nemoduliuota spinduliuotė, pasižyminti aukštu energiniu ir laikiniu stabilumu, kas leidžia pasiekti šio išradimo užduodančiojo generatoriaus išėjimo impulsų aukštą sinchronizacijos lygį. Pilnai skaidulinis užduodantysis generatorius gali dirbti dideliu pasikartojimo dažniu, pasižymi gera išėjimo pluoštų kokybe ir yra nejautrus aplinkos trikdžiams.

Spektro išplėtimas iki nedidesnio kaip 45nm pločio nereikalauja sudėtingo ir

brangaus spektro plėtiklio tokio kaip fotoninių kristalų skaidula. Paprastą vienamodę optinę skaidulą yra lengva integruoti į skaidulinę lazerinę sistemą: ją lengva privirinti; geometriniai parametrai gali būti identiški kitų sistemos skaidulų parametrų, todėl patiriami minimalūs nuostoliai sandūrose; vienamodė skaidula yra lanksti, tad sistema nereikalauja daug vietos; be to, yra daug komercinių tiekėjų, kas užtikrina nedidelę kainą.

Tiesinė momentinio dažnio moduliacija per visą išplitusio spektro plotį leidžia varijuoti išėjimo kanalų spinduliuotės centrinį bangos ilgį, neprarandant tiesinės momentinio dažnio moduliacijos savybės, kuri duoda privalumų tolimesniame siaurajuosčio ir plačiajuosčio impulsų formavime bei stiprinime, o taip pat užtikrina, kad spinduliuotė yra nesunkiai spaudžiama iki spektriškai ribotos trukmės.

Šio išradimo moduluotosios fazės impulsų stiprintuvas, į kurį yra paduodamas siaurajuostis impulsas, jau turintis išplėtimą laike, yra kompaktiškesnis ir/arba efektyvesnis, lyginant su kitais žinomais sprendimais.

FMIPŠS sistemoje panaudojant šio išradimo lazerinį šaltinį, galima pasiekti ypač didelį parametrinės sąveikos ir visos sistemos efektyvumą, energinį bei laikinį stabilumą. Galimybė parametriškai sustiprintą impulsą suspausti iki spektriškai ribotos trukmės užtikrina didžiausią įmanomą FMIPŠS sistemos išėjimo impulso smailinę galią.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Būdas generuoti dviejų bangos ilgių optiškai sinchronizuotus ultratrumpuosius šviesos impulsus, apimantis pradinės spinduliuotės generavimą, jos pastiprinimą, spektro išplėtimą bei išėjimo impulsų suformavimą, kur

minėtos pradinės spinduliuotės centrinis bangos ilgis λ_0 yra parinktas iš Yb jonais legiruotų aktyvių medžiagų liuminescencijos juostos,

pastiprintos spinduliuotės centrinis bangos ilgis sutampa su minėtu pradinės spinduliuotės centriniu bangos ilgiu λ_0 ,

išplėsto spektro spinduliuotės spektro plotis $\Delta\lambda$ perdengia Yb ir Nd jonais legiruotų aktyvių medžiagų stimuliujamos emisijos maksimumus,

o pirmasis ir antrasis išėjimo impulsai yra suformuojami iš išplėsto spektro spinduliuotės išskiriant pirmąjį ir antrąjį spektro segmentus su centriniais bangos ilgiais atitinkamai λ_1 ir λ_2 bei spektro pločiais atitinkamai $\Delta\lambda_1$ ir $\Delta\lambda_2$,

bent vienas iš suformuotų išėjimo impulsų yra pastiprinamas, besiskiriantis tuo, kad

minėtos pradinės spinduliuotės spektro plotis $\Delta\lambda_0$ neviršija 1.5nm ir yra faziškai nemoduliuota,

išplėsto spektro spinduliuotės spektro plotis $\Delta\lambda$, apibrėžtas 1/10 maksimalaus spektrinio intensyvumo lygyje, yra intervale nuo 40nm iki 45nm,

išskirto pirmojo spektro segmento centrinis bangos ilgis λ_1 yra parinktas iš intervalo nuo 1025nm iki 1040nm, o spektro plotis $\Delta\lambda_1$ yra ribose nuo kelių iki 15nm,

išskirto antrojo spektro segmento centrinis bangos ilgis λ_2 yra parinktas iš intervalo nuo 1040nm iki 1070nm, o spektro plotis $\Delta\lambda_2$ yra mažesnis už 1nm,

išskirtų pirmojo ir antrojo spektro segmentų momentinio dažnio moduliacija yra tiesinė,

o minėtas pradinės spinduliuotės bangos ilgis λ_0 yra parinktas tarpe tarp bangos ilgių λ_1 ir λ_2 .

2. Būdas pagal 1 punktą, besiskiriantis tuo, kad pradinės spinduliuotės bangos ilgis λ_0 yra viduryje tarp bangos ilgių λ_1 ir λ_2 .

3. Būdas pagal bet kurį iš 1-2 punktų, besiskiriantis tuo, kad pradinės spinduliuotės spektro plotis $\Delta\lambda_0$ yra mažesnis nei 1nm.

4. Būdas pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, besiskiriantis tuo, kad išskirto pirmojo spektro segmento centrinis bangos ilgis λ_1 yra lygus 1030nm, o spektro plotis $\Delta\lambda_1$ yra parinktas iš intervalo nuo 2nm iki 10nm.

5. Būdas pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, besiskiriantis tuo, kad išskirto antrojo spektro segmento centrinis bangos ilgis λ_2 yra lygus 1064nm.

6. Lazerinis šaltinis, išspinduliuojantis dviejų bangos ilgių optiškai sinchronizuotus ultratrumpuosius šviesos impulsus, apimantis užduodantįjį generatorių (4) ir bent vieną moduluotosios fazės impulsų stiprintuvą, kur

užduodantysis generatorius (4) yra sudarytas iš optiškai susietų skaidulinių optinių komponentų, kurie apima

iterbio (Yb) jonais legiruotą skaidulinį sinchronizuotų modų osciliatorių (8), generuojantį pradinę lazerinę spinduliuotę su centriniu bangos ilgiu λ_0 ir spektro pločiu $\Delta\lambda_0$,

bent vieną Yb jonais legiruotą skaidulinį stiprintuvą (9), skirtą pastiprinti minėtą pradinę spinduliuotę,

optinį elementą (10), pasižymintį netiesinėmis savybėmis, skirtą spinduliuotės spektrui išplėsti,

spektrinio filtravimo įrenginį (11), skirtą atskirti dviejų bangos ilgių λ_1 ir λ_2 spektro segmentus, apibūdinamus spektro pločiais atitinkamai $\Delta\lambda_1$ ir $\Delta\lambda_2$, kurių spinduliuotė (6, 7) išeina atitinkamai iš pirmojo ir antrojo užduodančiojo generatoriaus (4) išėjimų; o

bent vienas moduluotosios fazės impulsų stiprintuvas (5) apima impulsų plėstuvą (13), kvantinį stiprintuvą (14) ir impulsų spaustuvą (15), besiskiriantis tuo, kad

minėtas Yb jonais legiruotas skaidulinis sinchronizuotų modų osciliatorius (8) yra parinktas, kad sugeneruotų spektriškai ribotą kelių pikosekundžių impulsą,

o skaidulinių optinių komponentų (8, 9, 10) parametrai yra iš anksto parinkti taip, kad

išplėstas spektras turėtų tiesinės momentinio dažnio moduliacijos segmentus (D, E) ties bangos ilgiais λ_1 ir λ_2 , kur

λ_1 yra parinktas iš intervalo nuo 1025nm iki 1040nm,

λ_2 yra parinktas iš intervalo nuo 1040nm iki 1070nm

ir kur pirmojo spektro segmento (D) plotis $\Delta\lambda_1$ yra ribose nuo kelių iki 15nm,

o antrojo spektro segmento (E) plotis $\Delta\lambda_2$ yra mažesnis už 1nm;

bent vienas iš minėtų moduluotosios fazės impulsų stiprintuvų yra moduluotosios fazės impulsų stiprintuvas (5), skirtas sustiprinti antrojo spektro segmento (E) spinduliuotei (7), išeinančiai iš antrojo užduodančiojo generatoriaus išėjimo.

7. Lazerinis šaltinis pagal 6 punktą, besiskiriantis tuo, kad užduodantysis generatorius (4) yra suformuotas vienamodžių optinių skaidulų pagrindu.

8. Lazerinis šaltinis pagal bet kurį iš 6-7 punktų, besiskiriantis tuo, kad optinis elementas (10), pasižymintis netiesinėmis savybėmis, skirtas spinduliuotės spektrui išplėsti, yra vienamodė optinė skaidula, kurios ilgis yra parinktas ribose nuo 2 iki 20 metrų.

9. Lazerinis šaltinis pagal bet kurį iš 6-8 punktų, besiskiriantis tuo, kad minėtas moduluotosios fazės impulsų stiprintuvas (5), skirtas antrojo spektro segmento spinduliuotei (7) sustiprinti, yra sukurtas Nd jonais legiruotos kietakūnės aktyviosios medžiagos pagrindu.

10. Lazerinis šaltinis pagal bet kurį iš 6-8 punktų, besiskiriantis tuo, kad minėtas bent vienas moduluotosios fazės impulsų stiprintuvas yra sukurtas Yb jonais

legiruotų aktyvių medžiagų pagrindu ir šio tipo moduluotosios fazės impulsų stiprintuvai yra skirti atitinkamai pirmojo ir/arba antrojo spektro segmentų spinduliuotėms (6, 7) stiprinti.

11. Lazerinis šaltinis pagal bet kurį iš 6-10 punktų, besiskiriantis tuo, kad moduluotosios fazės impulsų stiprintuvo impulsų plėstuvas ir/arba spaustuvas yra čirpuota tūrinė Brego gardelė.

12. Faziškai moduluotų impulsų parametrinis šviesos stiprintuvas, kuriame yra panaudotas lazerinis šaltinis pagal bet kurį iš 6-11 punktų.

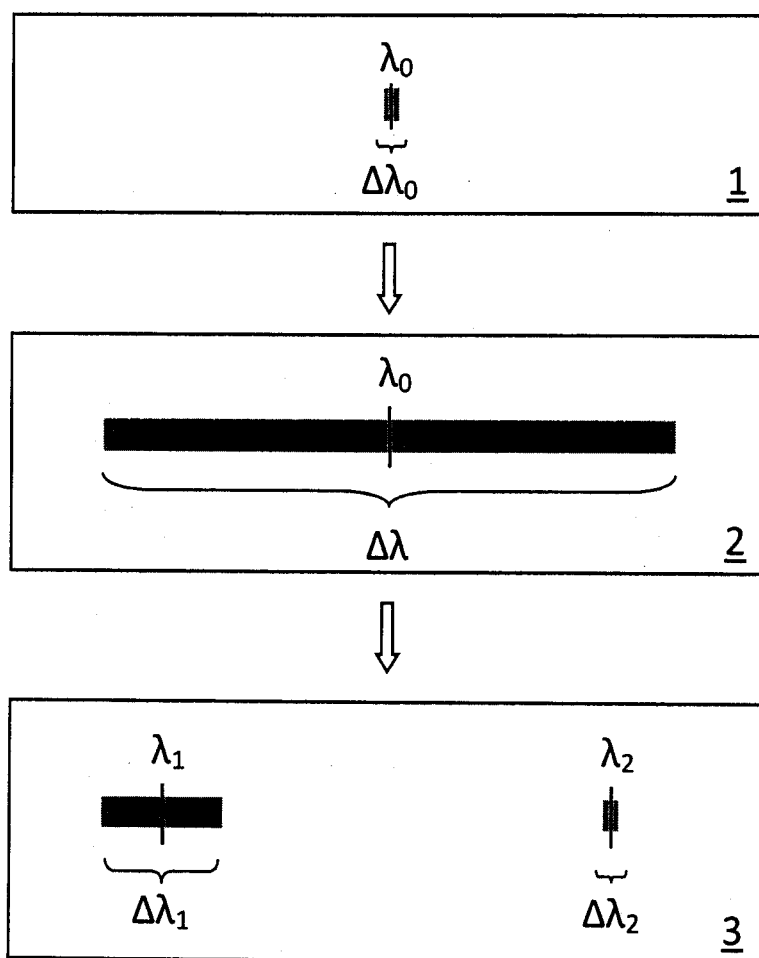


Fig.1

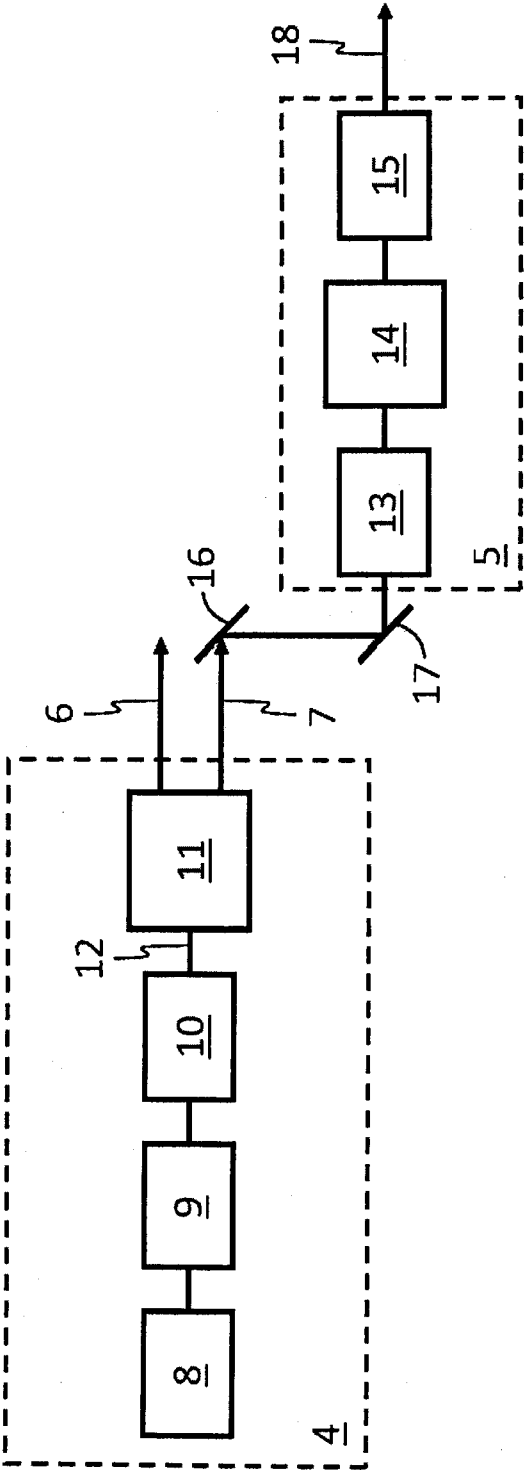


Fig.2

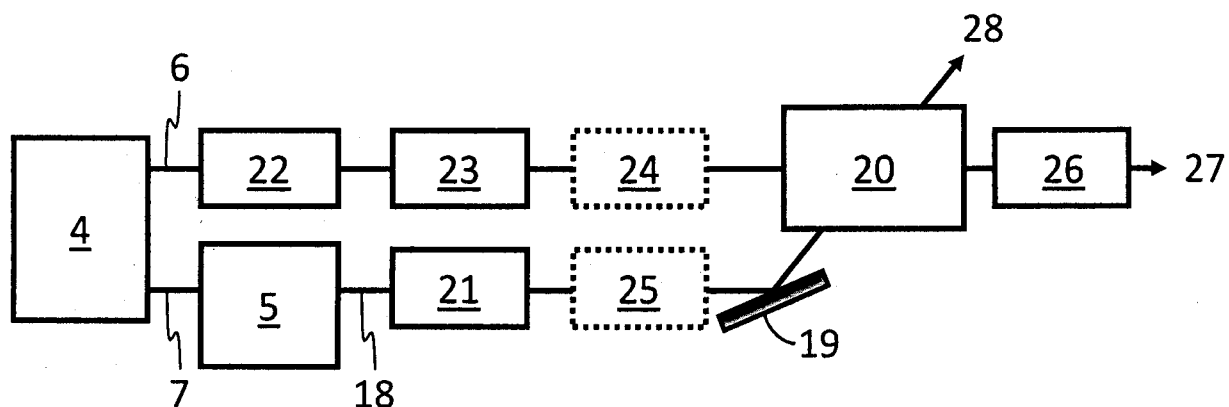


Fig.3

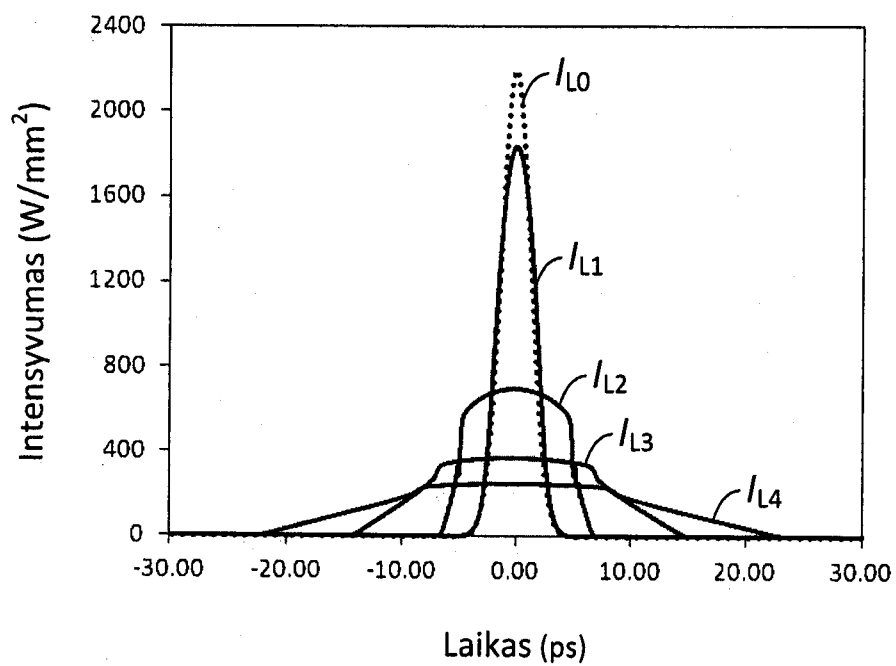


Fig.4

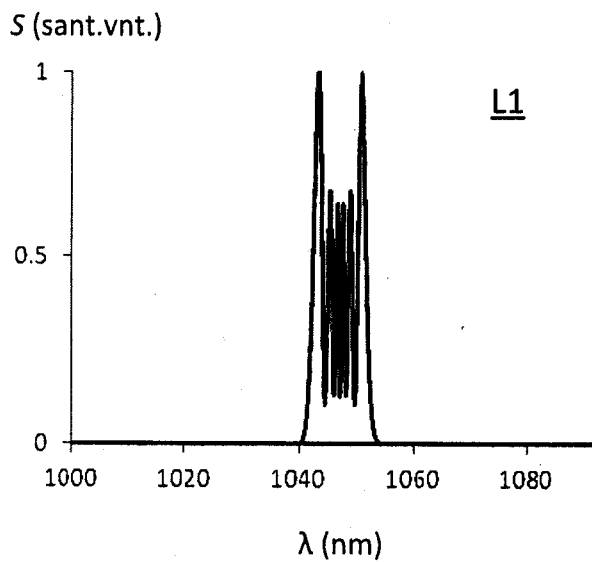


Fig.5A

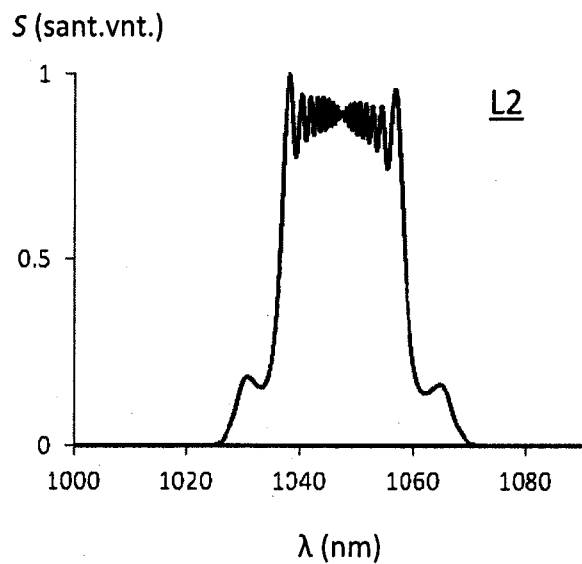


Fig.5B

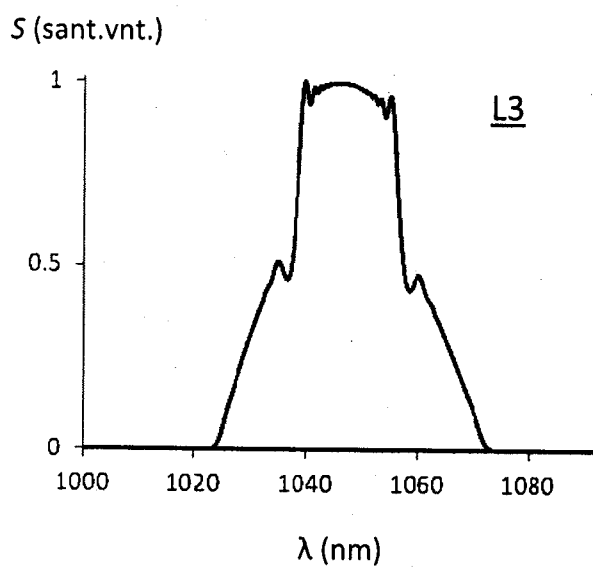


Fig.5C

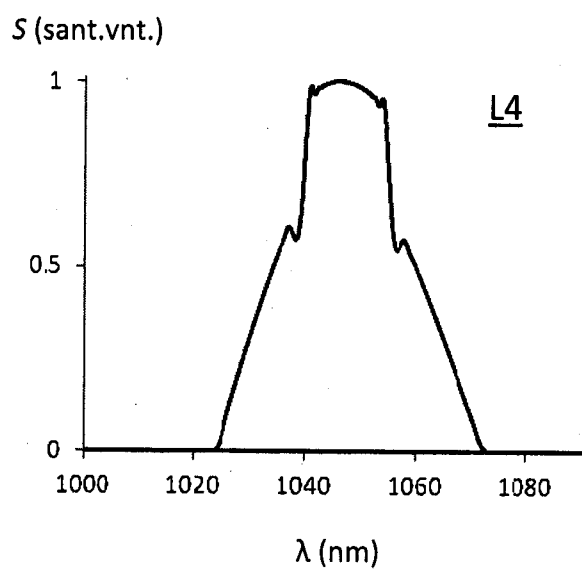


Fig.5D

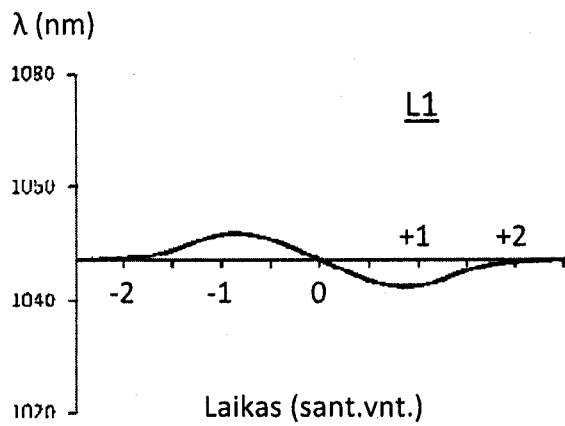


Fig.6A

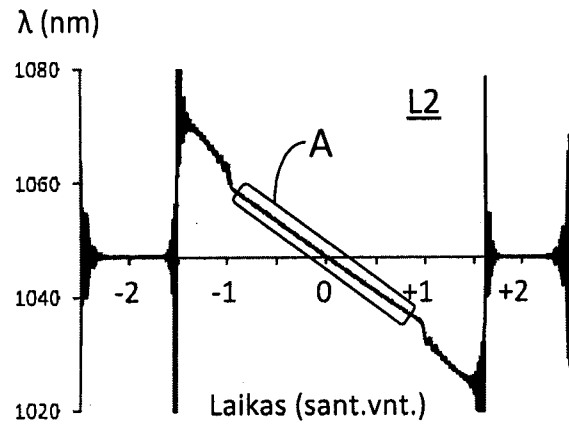


Fig.6B

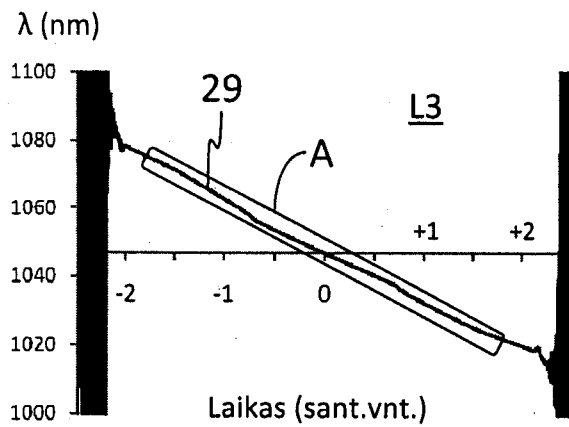


Fig.6C

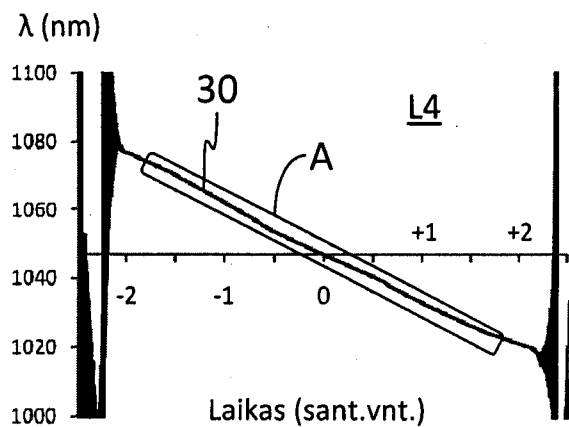


Fig.6D

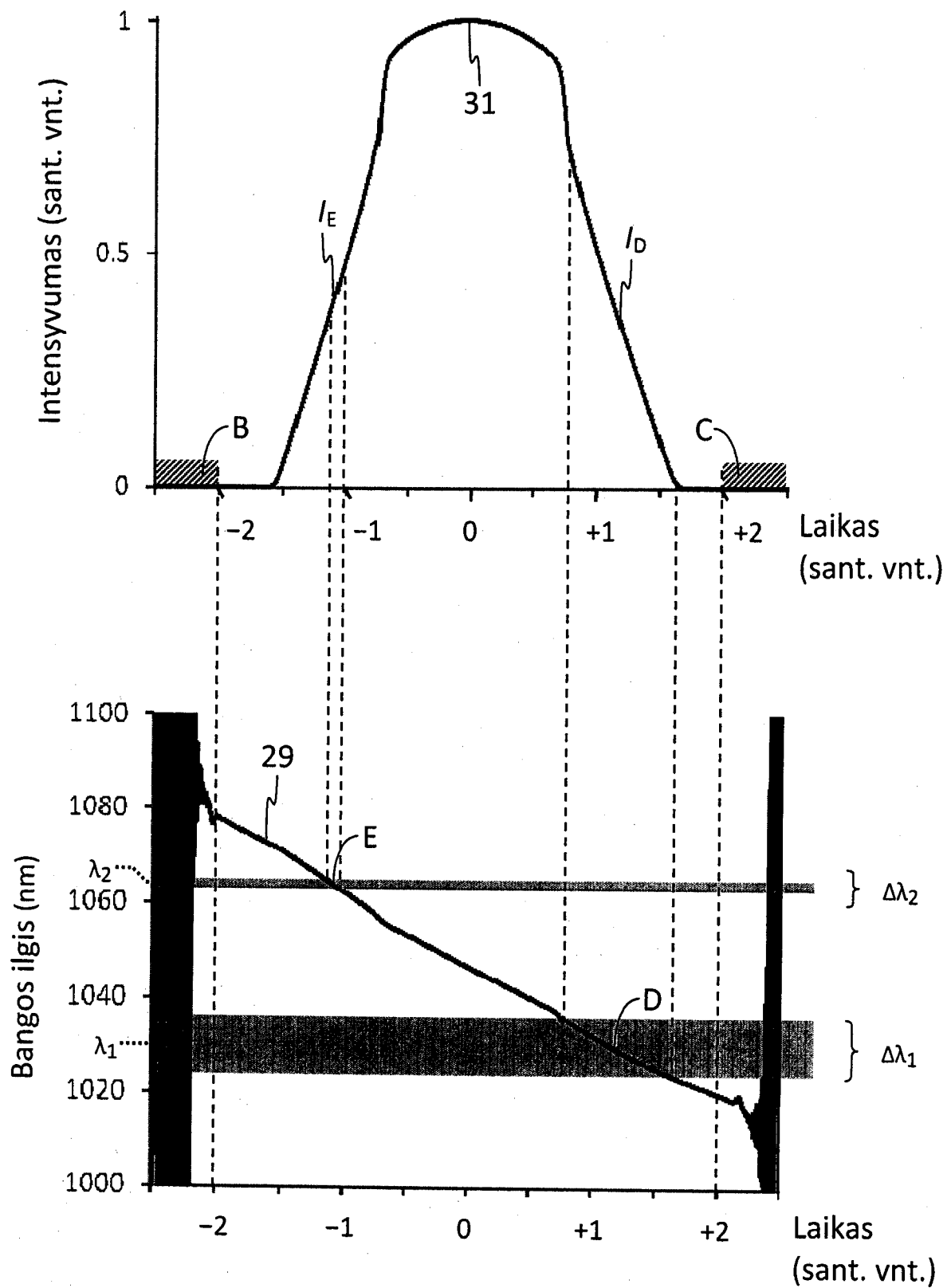


Fig.7

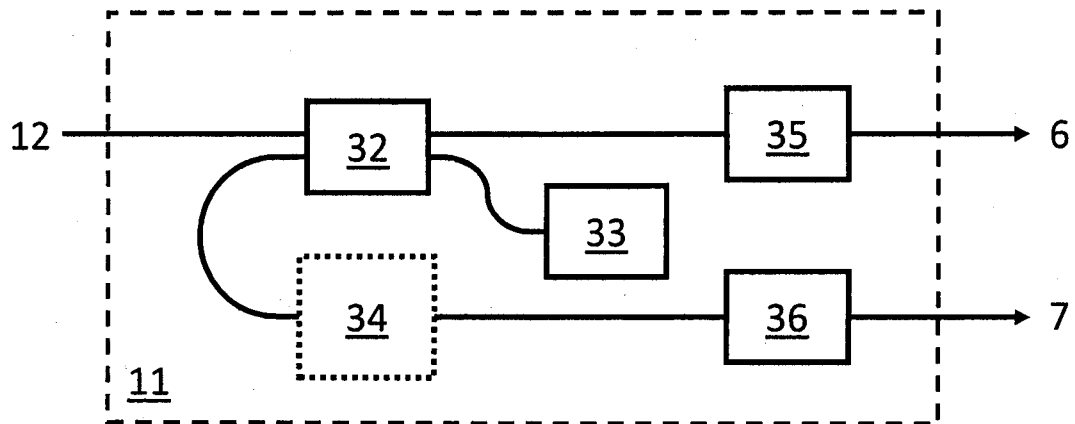


Fig.8