

(19)



(10) **LT 6231 B**

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

(11) Patent numeris: **6231**

(51) Int. Cl. (2015.01): **H01S 3/00**

(21) Paraiškos numeris: **2014 503**

(22) Paraiškos padavimo data: **2014-03-25**

(41) Paraiškos paskelbimo data: **2015-09-25**

(45) Patent paskelbimo data: **2015-11-25**

(62) Paraiškos, iš kurios dokumentas išskirtas, numeris: —

(86) Tarptautinės paraiškos numeris: —

(86) Tarptautinės paraiškos padavimo data: —

(85) Nacionalinio PCT lygio procedūros pradžios data: —

(30) Prioritetas: —

(72) Išradėjas:

Nerijus RUSTEIKA, LT
Rokas DANILEVIČIUS, LT
Audrius ZAUKEVIČIUS, LT
Andrejus MICHAILOVAS, LT

(73) Patent savininkas:

UAB „EKSPLA“, Savanorių pr. 237, 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:

Femtosekundinių šviesos impulsų gavimo būdas ir lazerinis šaltinis

(57) Referatas:

Išradimas priklauso lazerių sričiai, ir yra skirtas generuoti femtosekundžių trukmės impulsus, kurių trukmė neviršija 100fs, o energija siekia šimtą milidžaulių. Femtosekundinių šviesos impulsų generavimo būdas apima bent dvi nekolinearūs parametrinio šviesos stiprinimo pakopas. Optiškai sinchronizuoti užkrato ir kaupinimo spinduliuotės impulsai yra kilę iš to paties pirminio ultratrumpųjų impulsų lazerinio šaltinio spinduliuotės, kurios impulsų trukmė yra nuo 1 ps iki 3 ps. Pirmos pakopos užkrato spinduliuotės formavimas apima impulsų ištempimą ir spektro išplėtimą nuo 10 nm iki 20 nm pločio, o kaupinimo spinduliuotės formavimas apima stiprinimą siaurajuosčiame kvantiniame stiprintuve, kurio stiprinimo juostos plotis yra ne didesnis nei 1nm, bei antros harmonikos generaciją. Antros pakopos užkrato spinduliuotę formuoja iš pirmoje pakopoje sustiprintos signalinės bangos spinduliuotės, jos impulsus suspaudžiant laike, po to spektrą išplečiant baltos šviesos generatoriuje ir, jeigu reikia, atliekant papildomą suspaudimą laike. Kaupinimo spinduliuotę formuoja iš pirmoje pakopoje

sustiprintos bei laike suspaustos signalinės bangos spinduliuotės dalies, generuojant antrą harmoniką ir, jeigu reikia, atliekant ištempimą laike. Prioritetinėje šio išradimo realizacijoje yra trečia nekolinearaus parametrinio šviesos stiprinimo pakopa, kur užkrato spinduliuotę formuoja iš antroje pakopoje sustiprintos signalinės bangos spinduliuotės, jos impulsus ištempiant laike, o kaupinimo spinduliuotę formuoja taip pat kaip ir pirmos pakopos kaupinimo spinduliuotę. Paskutinėje pakopoje sustiprintus signalinės bangos spinduliuotės impulsus suspaudžia, suformuojant išėjimo impulsus, kurių trukmė yra intervale nuo 5 fs iki 100 fs.

Išradimas priklauso lazerių sričiai, tiksliau ultratrumpųjų šviesos impulsų lazeriniams šaltiniams, ir yra skirtas generuoti femtosekundžių trukmės impulsus. Išradimas yra susijęs su ultratrumpųjų šviesos impulsų, kurių trukmė neviršija 100fs, o energija siekia šimtą milidžaulių, generavimo būdais ir lazeriniais šaltiniais.

Išradimas gali būti panaudotas kompaktiškoms ir nebrangioms faziškai moduluotų impulsų parametrinio šviesos stiprinimo sistemoms realizuoti, kurių išėjimo spinduliuotė turi nemažai pritaikymų naujausiuose moksliniuose tyrimuose, medicinoje bei pramonėje.

Medicininuose taikymuose, tokiuose kaip mikrooperacijos, femtosekundiniai (fs) impulsai turi privalumų prieš ilgesnius impulsus, nes jie neturi destraktyvaus poveikio aplinkiniams audiniams. Medžiagų apdirbime fs trukmių impulsais galima gauti geresnį mikrodarinių tikslumą beveik nepaveikiant gretimų zonų bei pasiekti didesnį apdirbimo greitį, kas yra labai svarbu pramonėje. Impulsai, kurių trukmė neviršija 100fs, o smailinė galia yra didesnė nei kelios dešimtys GW atveria naujas galimybes moksle.

Yra žinomi femtosekundinių impulsų šaltiniai, apimantys plačiajuostės aktyviosios medžiagos titano-safyro (Ti:S) osciliatorių ir bent vieną Ti:S daugialėkį galios stiprintuvą (kaip pvz., *M.P.Kalashnikov et al.*, "Characterization of a nonlinear filter for the front-end of a high contrast double-CPA Ti:sapphire laser", Opt. Express 12, 5088-5097 (2004) straipsnyje), arba faziškai moduluotų impulsų stiprintuvą (kaip US5720894 (*Perry et al.*) patente). Plačiajuostė Ti:S aktyviosios medžiagos spinduliuotė, perdengianti matomosios šviesos ilgųjų bangų sritį ir artimosios infraraudonosios spinduliuotės sritį, užtikrina nuo kelių iki keliasdešimties femtosekundžių impulso trukmę, arba atveria galimybes bangos ilgio derinimui. (700÷1000)nm bangio ilgio spinduliuotė turi nemažai privalumų įvairiuose taikymuose. Tačiau Ti:S osciliatoriams ir stiprintuvams kaupinti reikalinga kito kietakūnio lazerio antra harmonika arba argono dujų lazerio spinduliuotė. Be to, dėl aktyviojoje Ti:S terpėje pasireiškiančių šiluminių reiškinių reikalingas efektyvus aušinimas. Ti:S lazeriams, ypač stiprintuvams reikalinga grįžtamuoju ryšiu paremta temperatūros bei mechaninio stabilizavimo įranga geram impulsų energijos stabilumui ir aukštai pluošto kokybei užtikrinti. Dėl šių priežasčių Ti:S lazeriniai šaltiniai yra sudėtingi ir brangūs, o pilnas elektrinės energijos vertimo į optinę energiją efektyvumas yra žemas.

Alternatyva titano safyro osciliatoriams-stiprintuvams yra parametrinio šviesos stiprinimo sistemos, kuriose plačiajuosčio impulso stiprinimas vyksta netiesiniame parametrinio šviesos stiprinimo kristale ir dėl to išvengiama stiprinamos juostos siaurėjimo efekto. Be to, parametriniame kristale vieno praėjimo stiprinimo koeficientas gali viršyti 10^3 , ir nepasireiškia šiluminiai reiškiniai, nes spinduliuotės stiprinimas vyksta per netiesinę dažnio konversiją be sugerties. Milidžaulių eilės energijai pasiekti reikalingos kelios stiprinimo pakopos, o impulsai turi būti ištempti laike. Tai yra taip vadinamas faziškai moduluotų impulsų parametrinio šviesos stiprinimo (FMIPŠS) metodas. Jose kaip pirminiai šaltiniai taip pat dažniausiai yra naudojami Ti:S osciliatoriai, kurie užtikrina reikiamą spektrinę juostą ultratrumpajam pradiniam signalinės bangos impulsui (užkratui) generuoti [US6775053 (*Jovanovic et al.*); *R.T.Zinkstok et al.*, "High-power parametric amplification of 11.8-fs laser pulses with carrier-envelope phase control", *Opt. Lett.* 30, 78-80 (2005); *S.Witte et al.*, "Generation of few-cycle terawatt light pulses using optical parametric chirped pulse amplification", *Opt. Express* 13, 4903-4908 (2005); *N.Ishii et al.*, "Multimillijoule chirped parametric amplification of few-cycle pulses," *Opt. Lett.* 30, 567-569 (2005); *S.Witte et al.*, "A source of 2 terawatt, 2.7 cycle laser pulses based on noncollinear optical parametric chirped pulse amplification", *Opt. Express* 14, 8168-8177 (2006)], ir dalis spinduliuotės dar gali būti panaudota kaupinimo impulso lazerinio šaltinio sinchronizavimui [WO2006122709 (*Ishii et al.*); *N.Ishii et al.*, "Seeding of an eleven femtosecond optical parametric chirped pulse amplifier and its Nd^{3+} picosecond pump laser from a single broadband Ti:Sapphire oscillator," *Sel.Tops.in QE12*, 173-180 (2006); *J.Rothhardt et al.*, "Compact fiber amplifier pumped OPCPA system delivering Gigawatt peak power 35 fs pulses", *Opt. Express* 17, 24130-24136 (2009); *A.Harth et al.*, "Two-color pumped OPCPA system emitting spectra spanning 1.5 octaves from VIS to NIR", *Opt. Express* 20, 3076-3081 (2012)].

Techninis uždavinys, kurį reikia išspręsti FMIPŠS sistemose, panaudojančiose Ti:S osciliatorių kaip pirminį šaltinį – kokios aktyviosios medžiagos kaupinimo impulso šaltinį pasirinkti, ir kaip jį sinchronizuoti su ultratrumpojo impulso šaltiniu – Ti:S osciliatoriumi. Optinis sinchronizavimo būdas, kai dalis osciliatoriaus spinduliuotės panaudojama kaip kaupinimo šaltinio užkratas, užtikrina mažą signalinės bangos ir kaupinimo impulsų tirtį vienas kito atžvilgiu. Tik taip įmanoma pasiekti aukštą signalinės bangos energijos stabilumą. Tačiau daugelio aktyviųjų

medžiagų, pasižyminčių aukštu stiprinimo koeficientu, stimuliuotosios emisijos maksimumas yra toli nuo Ti:S osciliatoriaus liuminescencijos juostos maksimumo. Nd jonais legiruotos aktyviosios medžiagos pasižymi ypač aukštu stiprinimo koeficientu, be to yra termiškai ir mechaniškai stabilios, dėl ko gali dirbti aukšto impulsų pasikartojimo dažnio ir didelės galios režime. Nd:YAG ir Nd:YVO₄ yra ypač tinkamos medžiagos didelės galios stiprintuvams, tačiau Ti:S spinduliuotės energija ties Nd:YAG ir Nd:YVO₄ stiprinimo maksimumu (1064nm) yra labai maža. Taigi tiesioginio užkrato schemos, kuriose dalis Ti:S osciliatoriaus spinduliuotės be bangos ilgio pakeitimo yra panaudojama kaip užkratas Nd jonais legiruotos aktyviosios medžiagos kaupinimo impulso stiprintuvui, taip užtikrinant pasyvią (optinę) sinchronizaciją tarp pradinės signalinės bangos ir kaupinimo impulsų, yra energišškai neefektyvios ir neretai turi ryškų spontaninės emisijos foną.

Ishii et al. (2006) straipsnyje aprašyta FMIPŠS sistema, kur kaupinimo impulso stiprintuvas yra Nd:YLF (vėliau atliekama antros harmonikos generacija): 1053nm spektrinė linija yra išskiriama tiesiai iš ypač plataus spektro Ti:S osciliatoriaus, kuris yra ir ultratrumpojo pradinės signalinės bangos impulso šaltinis. Šis sprendimas užtikrina optinę sinchronizaciją tarp signalinės ir kaupinimo bangos impulsų, bet yra energišškai neefektyvus dėl mažo Ti:S osciliatoriaus spinduliuotės spektrinio ryškio ties 1053nm.

Harth et al. (2012) straipsnyje aprašyta FMIPŠS sistema, kurioje dalis Ti:S osciliatoriaus, ultratrumpojo pradinės signalinės bangos impulso šaltinio, spinduliuotės yra atskiriama į regeneratyvinį Yb:YAG aktyviosios medžiagos kaupinimo stiprintuvą (vėliau atliekama antros ir antros harmonikos generacija). Yb:YAG yra plačiajuostė aktyvioji medžiaga, kurios spektrinė juosta persikloja su Ti:S aktyviosios medžiagos liuminescencijos juosta, todėl spinduliuotės dalis, atskirta iš Ti:S spektro, yra tinkama kaip užkratas Yb:YAG stiprintuvui. Tačiau dėl kvazi-trijų lygmenų kvantinės struktūros Yb:YAG aktyviojoje medžiagoje stiprinimas yra efektyvus tik esant dideliame kaupinimo šaltinio ryškiui, kuriuo užtikrinama reikalinga užpildos apgrąža. Daugiadiskinė Yb:YAG stiprintuvo struktūra, panaudota *Harth et al.* sprendime leidžia efektyviai aušinti Yb:YAG aktyviąją medžiagą ir taip užtikrinti, kad apatinis lazerinis lygmuo būtų greitai atlaisvinamas, tačiau yra sudėtinga ir reikalauja tikslios gamybos technologijos, kas didina stiprintuvo kainą, be to yra nedaug tokių struktūrų tiekėjų.

Tarptautinėje patentinėje paraiškoje WO2006122709 (*Ishii et al.*) aprašyta FMIPŠS sistema, panaudojanti vieną lazerinį šaltinį pradinės signalinės bangos (užkrato) ir kaupinimo impulsams gauti, apimanti sinchronizuotų modų Ti:S osciliatorių, kur ultratrumpasis pradinės signalinės bangos impulsas sutampa su Ti:S osciliatoriaus išėjimo impulsu, o kaupinimui skirtas impulsas yra stiprinamas neodimio (Nd) arba iterbio (Yb) kietakūniu stiprintuvu (vėliau atliekama antros harmonikos generacija) prieš tai fotoninių kristalų skaiduloje paslinkus Ti:S osciliatoriaus išėjimo impulso bangos ilgį iki Nd arba Yb spektrinės linijos. Techniniai sunkumai, su kuriais susiduriama panaudojant fotoninių kristalų skaidulas – aukšti reikalavimai lazerio pluošto krypties ir energijos stabilumui. Netiesinių reiškinių sąlygojamas spektro kitimas vyksta, kuomet tiksliai pataikoma į skaidulos šerdį, kuri yra vos kelių mikronų skersmens. Osciliatoriaus spinduliuotės įvedimas į fotoninių kristalų skaidulą ir ilgalaikis krypties išlaikymas yra nelengvas uždavinys. Kitas aspektas – skaidulos pažeidimo slenkstis nedaug viršija energiją, būtiną netiesiškumams pasireikšti. Taigi būtina užtikrinti aukštą energijos stabilumą, kad netiesiškumai pasireikštų, bet dar neįvyktų skaidulos pažeidimas.

Aukščiau aprašytos parametrinio šviesos stiprinimo sistemos, kaip pirminį lazerinį šaltinį panaudojančios Ti:S osciliatorių, nors ir neturi savyje Ti:S stiprintuvų, be to, nereikalauja spektro išplėtimo, nes Ti:S osciliatorius gali užtikrinti iki kelių femtosekundžių signalinės bangos impulso trukmę, yra palyginti brangios ir sudėtingos.

Pastaruoju metu populiarėja sistemos, kuriose kaip pirminiai šaltiniai yra naudojami kitų plačiajuosčių aktyviųjų medžiagų kietakūniai, pvz. Yb:KGW arba Yb:KYW, arba skaiduliniai Yb, Er, Yb/Er, Ho, Tm lazeriai. Pagrindiniai Yb jonais legiruotų aktyviųjų medžiagų privalumai – sugerties maksimumas patenka į lazerinių diodų spektrinę sritį, o plati spontaninės emisijos juosta leidžia pasiekti ultratrumpą impulsą trukmę. Galimybė tiesiogiai kaupinti lazeriniais diodais leidžia realizuoti žymiai mažesnių matmenų lazerinę sistemą. Kiti Yb jonais legiruotų aktyviųjų medžiagų privalumai – žemas generacijos slenkstis, didelis stimuliuotosios emisijos skerspjūvis ir geras šiluminis laidumas, leidžiantys pasiekti aukštą vidutinę spinduliuotės galią. Dėl šių priežasčių Yb jonais legiruoti kietakūniai lazeriai yra žymiai paprastesni, patikimesni ir pigesni, lyginant juos su Ti:S lazeriais.

Yb:KGW kietakūniais lazeriais pasiekama nuo 50 iki kelių šimtų fs impulso

trukmė, tuo tarpu centrinis bangos ilgis yra artimas Nd jonais legiruotų aktyviųjų medžiagų stiprinimo linijai. Yb-kristalinių aktyviųjų medžiagų sinchronizuotų modų osciliatoriais generuojami daugiau kaip 200nJ energijos, o osciliatoriais-stiprintuvais – iki kelių šimtų mikrodžaulių energijos ultratrumpieji lazeriniai impulsai. Siekiant platesnio derinimo diapazono, arba norint sutrumpinti impulso trukmę iki mažesnės nei 30 femtosekundžių, būtinas spektro išplėtimas. Plačiausiai naudojamas sprendimas – kontinuumo generacija (dar vad. baltos šviesos generacija) kietakūnėse tūrinėse medžiagose, kristaluose, arba fotoninių kristalų skaidulose. Svarbu pastebėti, kad sąlygos kontinuumo generacijai (kuri vyksta dėl vienu metu pasireiškiančių kelių netiesinių reiškinių), ir sugeneruoto kontinuumo charakteristikos skiriasi. Kontinuumo generacijos slenkstis fotoninių kristalų skaiduloje yra žemesnis nei tūriniame kristale, todėl gali pakakti osciliatoriaus energijos, tačiau sugeneruotas kontinuumas yra sunkiai spaudžiamas iki trumpesnių nei 100fs impulso trukmių (spektrinių komponentų vėlinimo neįmanoma kompensuoti įprastais dispersiniais impulsų spaustuvais). Tuo tarpu kontinuumui sugeneruoti tūriniame kristale energija iš minėtų osciliatorių yra nepakankama, ir faziškai moduluotų impulsų parametrinio šviesos stiprinimo (FMIPŠS) sistema būtinai turi turėti papildomą femtosekundinį pradinės signalinės bangos impulso (užkrato) stiprintuvą, kas didina sistemos kainą ir sudėtingumą.

Straipsnyje *R.Antipenkov et al.*, "Femtosecond Yb:KGW MOPA driven broadband NOPA as a frontend for TW few-cycle pulse systems", Opt. Express 19, 3519-3524 (2011) aprašyta faziškai moduluotų impulsų parametrinio šviesos stiprinimo sistema, generuojanti apie 10fs trukmės impulsus ties 800nm, kuri panaudoja vieną lazerinį šaltinį pradinės signalinės bangos ir kaupinimo impulsams gauti, apimančią sinchronizuotų modų Yb:KGW osciliatorių-stiprintuvą:

ultratrumpasis—pradinės signalinės bangos impulsas yra gaunamas iš Yb:KGW osciliatoriaus-stiprintuvo spinduliuotės generuojant kontinuumą safyro plokštelėje;

kaupinimo impulsas yra gaunamas iš minėto Yb:KGW osciliatoriaus-stiprintuvo spinduliuotės generuojant antrą harmoniką.

Dėl galimybės osciliatorių kaupinti lazeriniais diodais *Antipenkov et al.* sistema yra stabilesnė, patikimesnė už anksčiau minėtas Ti:S paremtas sistemas, tačiau energinis efektyvumas yra mažas, nes dėl specifinių Yb legiruotų aktyviųjų

kristalinių medžiagų savybių, stiprintuvų parametrai turi būti pertekliniai. Minėtame straipsnyje po dviejų parametrinio stiprinimo pakopų FMIPŠS sistemoje pasiekta 20μJ impulso energija. Tolimesnis impulso stiprinimas (iki milidžaulių eilės) panaudojant to paties oscilatoriaus-stiprintuvo spinduliuotę, nebūtų galimas.

Straipsnyje *C.Aguergaray et al.*, "Parametric amplification and compression to ultrashort pulse duration of resonant linear waves", Opt. Express 15, 5699-5710 (2007) aprašyta FMIPŠS sistema, kurios ultratrumpojo išėjimo impulso centrinis bangos ilgis lygus 870nm, panaudojanti vieną lazerinį šaltinį pradinės signalinės bangos ir kaupinimo impulsams gauti, apimančią sinchronizuotą modų Yb:KGW osciliatorių:

ultratrumpasis pradinės signalinės bangos impulsas yra gaunamas plečiant nepastiprintos Yb:KGW oscilatoriaus spinduliuotės spektrą fotoninių kristalų skaiduloje (kontinuumo generacija);

kaupinimo impulsas yra gaunamas stiprinant Yb:KGW oscilatoriaus išėjimo impulsą Yb jonais legiruotame skaiduliniame stiprintuve ir vėliau generuojant antrą harmoniką.

Minėtame sprendime sutelkiamas dėmesys į oscilatoriaus išėjimo spinduliuotės charakteristikų (energijos ir trukmės derinio) valdymą, kad spektrą plečiančioje skaiduloje būtų pasiektas kontinuumas su tokiais spektrinių komponentų faziniais sąryšiais, jog po parametrinio stiprinimo būtų galima suspausti iki maždaug 50fs trukmės įprastais dispersiniais spaustuvais. *Aguergaray* sprendimas parinkti tam tikras oscilatoriaus charakteristikas leido pasiekti apie 50fs, bet nemažesnes trukmes. Siekiant didelio impulsų pasikartojimo dažnio, apsiribota skaiduliniu stiprintuvu, kuriuo neįmanoma gauti tokių kaupinimo impulso energijų, kokias pasiekia tūrinių kietakūnių aktyviųjų medžiagų (kristalų) stiprintuvai, ypač Nd:YAG ir Nd:YVO₄. Taigi minėtame straipsnyje nėra nurodytas metodas ar įrenginys trumpesniems nei 30fs milidžaulių eilės impulsams gauti.

Straipsnyje *S.Hädrich et al.*, "Degenerate optical parametric amplifier delivering sub 30 fs pulses with 2GW peak power", Opt. Express 16, 19812-19820 (2008) aprašyta FMIPŠS sistema, išspinduliuojanti maždaug 30fs ties 1030nm, taip pat apima sinchronizuotą modų Yb:KGW osciliatorių:

pradinės signalinės bangos impulsas yra gaunamas plečiant minėto osciliatoriaus išėjimo spinduliuotės spektrą (iki 68nm) vienamodėje optinėje skaiduloje;

kaupinimo impulsas yra gaunamas stiprinant osciliatoriaus impulsą Yb legiruotoje specialaus dizaino strypo tipo fotoninių kristalų skaiduloje, galinčioje pasiekti 1mJ energiją (ir vėliau generuojant antrą harmoniką).

Minėtame sprendime po dviejų parametrinio stiprinimo pakopų išsigimusiame režime pasiekta 81μJ impulso energija. Tolimesniam signalinės bangos impulso stiprinimas iki milidžaulių nėra numatytas. Be to, išsigimęs parametrinio stiprinimo režimas turi keletą apribojimų. Pirma, signalinės ir šalutinės bangos bangų ilgiai sutampa, tad išėjimo spinduliuotės derinimas galimas tik tiek, kiek leidžia kaupinimo spinduliuotės spektrinė juosta. Antra, šalutinės bangos spinduliuotė paprastai pasižymi prasta pluošto kokybe, nes joje atsispindi kaupinimo impulso energijos ir fazės fliuktuacijos. Tai blogina viso išėjimo pluošto kokybę.

Alternatyva laisvos erdvės elementus naudojantiems osciliatoriams – skaiduliniai lazeriniai šaltiniai. Vienamodės optinės skaidulos pagrindu pagaminti skaiduliniai lazeriai užtikrina aukštą pluošto kokybę. Skaidulos turi didelį paviršiaus ploto ir tūrio santykį, todėl jas galima efektyviai aušinti. Tai leidžia dirbti didelės galios ir didelio pasikartojimo dažnio režime. Kiti skaidulinių lazerinių šaltinių privalumai: atsparumas išoriniams veiksniams (temperatūros pokyčiams ir vibracijoms) bei patogus spinduliuotės transportavimas. Yb jonų, įterptų į stiklinę optinės skaidulos medžiagą, stimuliuotosios emisijos skerspjūvio maksimumas (1030nm) yra netoli Nd:YAG ir Nd:YVO₄ stiprinimo linijos (1064nm), o liuminescencijos juostos kraštas ilgų bangų srityje siekia 1100nm. Todėl Yb jonais legiruoto skaidulinio osciliatoriaus ar osciliatoriaus-stiprintuvo spinduliuotė gali būti panaudota kaip užkratas Nd-stiprintuvui.

JAV patente nr. US8023538 (*Marcinkevicius et al.*) aprašytos kelios FMIPŠS sistemos realizacijos, panaudojančios skaidulinių osciliatorių pagrindu veikiančius pirminius šaltinius. Pateikti pavyzdžiai aprašo femtosekundinių, pagrindinai Tm ir Er, skaidulinių osciliatorių bei kriogeniškai šaldomų Yb legiruotų stiprintuvų panaudojimą, leidžiančių pasiekti maždaug 10 femtosekundžių parametriškai sustiprintų impulsų

trukmę bei aukštą pluošto kokybę. Taip pat minėtame sprendime yra numatytos netiesinės formavimo pakopos tiek signalinės, tiek kaupinimo impulsų kelyje, tačiau pateiktuose praktiniuose pavyzdžiuose signalinės bangos formavimas apsiriboja kontinuumo generacija tik aukšto netiesiškumo skaidulose.

Marcinkevicius et al. aprašytame techniniame sprendime pagal patentą US8023538 nėra išspręstas pradinės spinduliuotės formavimas, kuris užtikrintų aukštą pradinio šaltinio efektyvumą ir patikimumą. Femtosekundiniai osciliatoriai yra jautresni sistemos parametrams ir išoriniam poveikiui nei pikosekundiniai osciliatoriai. Taip pat nėra FMIPŠS realizacijos su siaurajuostės neodimiu legiruotos aktyviosios medžiagos stiprintuvu. Iš US8023538 patente nurodytų pavyzdžių neaišku, kaip praktiškai reikėtų panaudoti gerai išvystytą Yb-osciliatorių, siekiant FMIPŠS sistemos išėjime gauti mJ eilės ultratrumpuosius impulsus. Taip pat nėra nurodytos sąlygos kontinuumo generacijai kietakūnėje turinėje medžiagoje (kristale).

A.Fernández et al., "Broadly tunable carrier envelope phase stable optical parametric amplifier pumped by a monolithic ytterbium fiber amplifier", Opt. Lett. 34, 2799-2801 (2009) aprašytas skaidulinis lazerinis šaltinis, skirtas FMIPŠS sistemai, kuris apima femtosekundinį Yb-skaidulinį osciliatorių, dirbantį ties 1040nm bangos ilgiu. FMIPŠS užkrato (pradinės signalinės bangos) impulso formavimas apima osciliatoriaus impulso išplėtimą ir stiprinimą keliuose skaiduliniuose stiprintuvuose iki maždaug 9μJ energijos. Tolimesnis užkrato impulso formavimas apima impulso spaudimą, bangos ilgio pakeitimą antros harmonikos kristale, kontinuumo generaciją safyro plokštelėje bei optinės fazės po impulso gaubtine stabilizavimą parametrinio stiprinimo kristale.

Fernández et al. straipsnyje yra nurodyta, kad panaudojant minėtą pradinį šaltinį, nesunkiai galima realizuoti FMIPŠS sistemos užkrato ir kaupinimo impulsų pasyvią sinchronizaciją, nes Yb-skaidulinio osciliatoriaus spinduliuotė yra tinkama Nd-stiprintuvui užkrėsti.

Fernández et al. sprendimo pilnai skaidulinė plačiajuosčio impulso formavimo ir stiprinimo grandinė yra sudaryta iš 480m vienamodės optinės skaidulos, kad impulsas būtų ištemptas laike iki 350ps, dviejų „stipriai iterbiu legiruotų“ 1,5m ilgio vienamodžių skaidulų, 3m ilgio didelio modos diametro dvigubo apvalkalo skaidulos bei papildomų komponentų, pavyzdžiui, skaidulinių akustooptinių moduliatorių (spontaninės emisijos fonui sumažinti) ir modos diametro adapterių. Tokia

keliapakopė skaidulinė sistema femtosekundinio impulso stiprinimui iki kelių mikrodžaulių, būtinų kontinuumo generacijos slenksčiui pasiekti, yra gana sudėtinga ir neefektyvi.

Artimiausias pagal techninę esmę yra Femtosekundinis šviesos impulsų lazerinis šaltinis aprašytas *Harth et al.* (2012) , kur oscilatoriaus išėjimo impulso pastiprinimas iki reikiamos energijos, užtikrinančios kontinuumo generaciją kietakūnėje turinėje medžiagoje (konkrečiai, BaF₂ plokštelėje), yra atliekamas parametrinio stiprinimo kristale, o ne kvantiniame stiprintuve. *Harth et al.* FMIPŠS sistema apima Ti:S oscilatorių kaip pradinės spinduliuotės šaltinį, iš kurios yra formuojamas sub-5fs impulsas. Dalis oscilatoriaus spinduliuotės yra stiprinama diskiniame regeneratyviniame Yb:YAG stiprintuve ir vėliau atliekama antros bei trečios harmonikų generacija, kurios tarnauja kaip kaupinimo impulsai pirmoje ir antroje parametrinio šviesos stiprinimo pakopose. Greta aukščiau minėtų trūkumų, susijusių su Ti:S oscilatoriaus ir Yb:YAG stiprintuvo panaudojimu, dėl skirtingo kaupinimo impulsų bangos ilgio pirmoje bei antroje parametrinio stiprinimo pakopose *Harth et al.* sprendimas negali pasiūlyti optimalios FMIPŠS konfigūracijos sub-30fs ir mJ eilės impulsams NIR srityje generuoti.

Sistemos, apimančios femtosekundinius oscilatorius ir/arba stiprintuvus yra iš principo sudėtingesnės, nes reikalauja papildomų optinių elementų, tokių kaip impulsų plėstuvai ir spaustuvai. Be to, turi būti tenkinamos tam tikros sąlygos superfluorescencijai ir/arba sustiprintai spontaninei emisijai išvengti.

Išradimu siekiama sukurti femtosekundinių impulsų generavimo būdą ir lazerinį šaltinį, užtikrinantį impulso trukmę neviršijančią 100fs, geriau nuo 5fs iki 30fs, ir ne mažesnę kaip 30GW smailinę galią. Išradimu taip pat siekiama sukurti faziškai moduluotų impulsų parametrinio šviesos stiprinimo (FMIPŠS) sistemos optimalią konfigūraciją, sudarytą tiek iš kietakūnių, tiek ir skaidulinių komponentų, užtikrinančią aukštą sistemos stabilumą ir efektyvumą.

Pagal pasiūlytą išradimą femtosekundinis šviesos impulsų generavimo būdas, apima bent dvi parametrinio šviesos stiprinimo pakopas, kur pirmoje stiprinimo pakopoje į pirmąjį parametrinio šviesos stiprinimo kristalą nukreipia tarpusavyje optiškai sinchronizuotus užkrato spinduliuotės ir kaupinimo spinduliuotės

impulsus, kuriame jie persikloja laike ir erdvėje, tenkinant nekolinearaus fazinio sinchronizmo sąlygas. Antroje stiprinimo pakopoje į antrąjį parametrinio šviesos stiprinimo kristalą nukreipia tarpusavyje optiškai sinchronizuotus užkrato spinduliuotės ir kaupinimo spinduliuotės impulsus, kuriame jie persikloja laike ir erdvėje, tenkinant nekolinearaus fazinio sinchronizmo sąlygas. Minėtas užkrato ir kaupinimo spinduliuotės formuoja iš to paties pirminio ultratrumpųjų impulsų lazerinio šaltinio spinduliuotės, galios dalikliu ją padalinant į užkrato atšakos spinduliuotę ir kaupinimo atšakos spinduliuotę, kur minėto pirminio ultratrumpųjų impulsų lazerinio šaltinio spinduliuotės impulsų trukmė yra nuo 1ps iki 3ps. Minėtą pirmos stiprinimo pakopos užkrato spinduliuotę formuoja iš užkrato atšakos spinduliuotės jos impulsus ištempiant laike ir papildomai spinduliuotę išplečiant iki $(10+20)$ nm pločio. Pirmos pakopos kaupinimo spinduliuotę formuoja iš kaupinimo atšakos spinduliuotės stiprinant jos ne platesnę kaip 1 nm spektrinę juostą ir atliekant antros harmonikos generaciją. Minėtos antros stiprinimo pakopos užkrato spinduliuotę formuoja iš pirmoje pakopoje sustiprintos signalinės bangos spinduliuotės jos impulsus suspaudžiant laike, po to jos spektrą išplečiant baltos šviesos generatoriuje iki ne mažesnio kaip 300nm spektro pločio ir jeigu reikia atlieka papildomai jos impulsų suspaudimą laike. Minėtą antros stiprinimo pakopos kaupinimo spinduliuotę formuoja iš pirmoje pakopoje sustiprintos signalinės bangos spinduliuotės po jos suspaudimo atskira jos dalį ir iš jos generuoja antrą harmoniką, o prieš nukreipiant į antrą parametrinio šviesos stiprinimo kristalą, jeigu reikia, impulsus ištempia laike. Paskutinėje minėtoje antroje stiprinimo pakopoje sustiprintus signalinės bangos impulsus suspaudžia, suformuojant išėjimo impulsus, kurių trukmė yra intervale nuo 5fs iki 100fs.

Kitame pranašumą turinčiame šio išradimo realizavimo pavyzdyje femtosekundinių šviesos impulsų generavimo būdas apima tris stiprinimo pakopas, kurioje į trečiąjį parametrinio šviesos stiprinimo kristalą nukreipia tarpusavyje optiškai sinchronizuotus užkrato spinduliuotės ir kaupinimo spinduliuotės impulsus, kuriame jie persikloja laike ir erdvėje tenkinant nekolinearaus fazinio sinchronizmo sąlygas. Užkrato spinduliuotę formuoja iš antrajame parametrinio šviesos stiprinimo kristale sustiprintos signalinės bangos spinduliuotės, jos impulsus ištempiant laike. Kaupinimo spinduliuotę formuoja iš kaupinimo atšakos spinduliuotės stiprinant jos ne platesnę kaip 1 nm spektrinę juostą ir atliekant antros harmonikos generaciją.

Paskutinėje minėtoje trečioje stiprinimo pakopoje sustiprintus signalinės bangos impulsus suspaudžia, suformuojant išėjimo impulsus, kurių trukmė yra intervale nuo 5fs iki 100fs.

Minėto pirminio ultratrumpųjų impulsų lazerinio šaltinio spinduliuotės centrinis bangos ilgis yra parinktas iš Yb jonais legiruotų aktyviųjų medžiagų liuminescencijos juostos taip, kad perdengtų Nd jonais legiruotos aktyviosios medžiagos stiprinimo liniją, o paskutinės stiprinimo pakopos femtosekundinių išėjimo impulsų centrinis bangos ilgis yra maždaug lygus 800nm. Minėto pirminio ultratrumpųjų impulsų lazerinio šaltinio (1) spinduliuotės centrinis bangos ilgis yra maždaug lygus 1064nm.

Privalumą turintis pasiūlyto išradimo konstrukcinis išpildymas yra femtosekundinių šviesos impulsų lazerinis šaltinis, apimantis pirminį ultratrumpųjų impulsų lazerinį šaltinį, ir bent du parametrinio šviesos stiprinimo kristalus. Minėtas pirminis ultratrumpųjų impulsų lazerinis šaltinis yra pikosekundinis, kurio išėjimo spinduliuotės impulsų trukmė yra intervale nuo 1ps iki 3ps ir kurio spinduliuotė galios daliklio yra padalinta į užkrato atšakos spinduliuotę ir kaupinimo atšakos spinduliuotę. Užkrato atšakos spinduliuotės kelyje yra patalpintas impulsų formuotuvai, sukonstruotas užkrato atšakos spinduliuotės impulsams ištempti laike ir išplėsti jos spektrą iki (10+20)nm pločio bei nukreipti į pirmąjį parametrinio šviesos stiprinimo kristalą kaip užkrato spinduliuotę. Kaupinimo atšakos spinduliuotės kelyje yra išdėstyti siaurajuostis kvantinis stiprintuvas, kurio stiprinimo juosta yra neplatesnė nei 1nm ir antros harmonikos kristalas, kurio sugeneruota antros harmonikos spinduliuotė optiniais elementais yra nukreipta į pirmąjį parametrinio šviesos stiprinimo kristalą kaip kaupinimo spinduliuotę taip, kad parametrinio šviesos stiprinimo kristale kaupinimo spinduliuotės impulsai persiklotų su minėtos užkrato spinduliuotės atitinkamais impulsais laike ir erdvėje tenkinant nekolinearaus fazinio sinchronizmo sąlygas. Pirmajame stiprinimo kristale sustiprintos signalinės bangos spinduliuotės kelyje yra išdėstyti spinduliuotės impulsų spaustuvas ir baltos šviesos generatorius, kurio generuojama nemažesnė kaip 300nm pločio spinduliuotė yra nukreipta į antrąjį parametrinio šviesos stiprinimo kristalą kaip užkrato spinduliuotę. Kaupinimo spinduliuotė suformuota iš parametrinio šviesos stiprinimo kristale sustiprintos ir suspaustos signalinės bangos spinduliuotės formuotuve, apimančiame antros harmonikos kristalą ir jeigu reikia impulsų plėstuvą, bei optiniais elementais nukreipta į antrąjį parametrinio šviesos stiprinimo kristalą taip, kad persiklotų su

minėtos užkrato spinduliuotės atitinkamais impulsais laike ir erdvėje tenkinant nekolinearaus fazinio sinchronizmo sąlygas. Paskutiniame parametrinio šviesos stiprinimo kristale sustiprinti signalinės bangos spinduliuotės impulsai yra nukreipti į impulsų spaustuvą, skirtą suformuoti išėjimo impulsus, kurių trukmė yra intervale nuo 5fs iki 100fs. Minėtas siaurajuostis kvantinis stiprintuvas apima bent vieną Nd jonais legiruotą kietakūnį stiprintuvą, ir kur bent vienas iš minėtų kietakūnių stiprintuvų yra regeneratyvinis, kur stiprintuvo išėjimo impulsų energija yra intervale nuo 100μJ iki 1mJ, o sugeneruotų femtosekundinių išėjimo impulsų energija siekia nuo 1 iki 10 μJ.

Kitas privalumą turintis šio išradimo konstrukcinis išpildymas yra femtosekundinių šviesos impulsų lazerinis šaltinis, turintis trečią parametrinio šviesos stiprinimo kristalą, į kurį per impulsų plėstuvą yra nukreipta antrajame parametrinio šviesos stiprinimo kristale sustiprinta signalinės bangos spinduliuotė kaip užkrato spinduliuotė. Minėto antros harmonikos kristalo generuojamos spinduliuotės galios dalikliu atskirta dalis optiniais elementais yra nukreipta kaip kaupinimo spinduliuotė į trečią parametrinio šviesos stiprinimo kristalą taip, kad jame kaupinimo spinduliuotės impulsai persiklotų su minėtos užkrato spinduliuotės atitinkamais impulsais laike ir erdvėje tenkinant nekolinearaus fazinio sinchronizmo sąlygas. Trečiojo parametrinio šviesos stiprinimo kristalo sustiprinta signalinės bangos spinduliuotė yra nukreipta į impulsų spaustuvą, skirtą suformuoti išėjimo impulsus, kurių trukmė yra intervale nuo 5fs iki 100fs.

Minėtas siaurajuostis kvantinis stiprintuvas apima bent vieną Nd jonais legiruotą kietakūnį stiprintuvą, ir kur bent vienas iš minėtų kietakūnių stiprintuvų yra regeneratyvinis, kur stiprintuvo išėjimo impulsų energija yra intervale nuo 100μJ iki 100mJ, o sugeneruotų femtosekundinių išėjimo impulsų energija siekia nuo 10μJ iki 10mJ. Minėtas pirminis ultratrumpųjų impulsų šaltinis yra iterbio (Yb) jonais legiruotos aktyviosios medžiagos pagrindu sukonstruotas lazeris, suderintas išspinduliuoti spektrinę liniją, perdengiančią Nd jonais legiruotų aktyviųjų medžiagų stiprinimo liniją. Pirminis ultratrumpųjų impulsų šaltinis yra Yb jonais legiruotos vienamodės optinės skaidulos pagrindu sukonstruotas lazerinis šaltinis, o minėtas kvantinis stiprintuvas yra Nd:YAG, Nd:YVO₄ ar Nd:YLF stiprintuvas. Pirminio ultratrumpųjų impulsų šaltinio išėjimo spinduliuotės impulsų energija neviršija 100pJ, o minėtas formotuvas apima priešstiprintuvį, skirtą impulsų energijai padidinti iki (1+10)nJ ir optinį elementą, kuriame vyksta impulso fazinė savimoduliacija. Pirminio ultratrumpųjų impulsų šaltinio

išėjimo spinduliuotės impulsų energija siekia $(1\div 10)nJ$. Užkrato spinduliuotės impulsų formuotuvą yra pagamintas vienamodės optinės skaidulos pagrindu. Baltos šviesos generatorius yra safyro arba YAG plokštelė. Pirmame parametrinio šviesos stiprinimo kristale sustiprintos ir impulsų spaustuvu suspaustos signalinės bangos spinduliuotės impulsų trukmė yra intervale nuo 100fs iki 200fs.

Šio išradimo femtosekundinių šviesos impulsų generavimo būdo vienas iš skiriamųjų požymių yra tas, kad pradiniam etape yra generuojama siauro spektro spinduliuotė, kurios spektro plotis atitinka kelių pikosekundžių spektriškai ribotą impulsą, o galiausiai gaunami femtosekundiniai impulsai.

Kitas šio išradimo skiriamasis požymis yra tai, kad prieš kontinuumo (baltos šviesos) generaciją atliekamas minėtas pradinės spinduliuotės spektro išplėtimas yra nedidelis, iki ne daugiau kaip 20nm, todėl nereikalauja sudėtingų optinių elementų ir/ar aukštos pradinio impulso energijos.

Femtosekundinis impulsas pagal šį išradimą yra sugeneruojamas dviejose arba trijose (bendruoju atveju, gali būti ir daugiau) parametrinio šviesos stiprinimo pakopose, tarp pirmos ir antros stiprinimo pakopų atliekant kontinuumo generaciją, o lazerinis stiprinimas yra reikalingas tik siaurajuosčiams kaupinimo impulsams stiprinti. Visose parametrinio stiprinimo pakopose pradinės signalinės bangos (užkrato) impulsai ir kaupinimo impulsai yra tarpusavyje optiškai sinchronizuoti, nes yra kilę iš vieno pradinio šaltinio.

Dar vienas svarbus pasiūlyto femtosekundinių šviesos impulsų generavimo būdo skiriamasis požymis yra tas, kad kaupinimo impulsai pirmajai ir trečiajai pakopoms yra siaurajuosčiai ($<1nm$), nes yra gaunami iš Nd-stiprintuve sustiprintos spinduliuotės. Tuo tarpu, antroje parametrinio stiprinimo pakopoje kaupinimo impulsas yra plačios spektrinės juostos (iki 20nm), nes yra gaunamas iš pirmoje parametrinio šviesos stiprinimo pakopoje sustiprintos ir kontinuumo generacijai nepanaudotos spinduliuotės.

Kitas pasiūlyto išradimo aspektas yra tas, kad visose parametrinio stiprinimo pakopose vyksta nekolinarus faziškai moduluotų (išplitusių laike) impulsų stiprinimas. Nekolineri sąveika užtikrina plačią stiprinimo juostą, o išplitimas laike – efektyvią energijos konversiją iš kaupinimo į signalinę bangą. Spinduliuotė prieš pirmąją parametrinio stiprinimo pakopą savaime faziškai susimoduliuoja plečiant jos

spektrą vienamodėje optinėje skaiduloje arba yra sumoduliuojama („čirpuojama“) papildomais dispersiniais elementais. Prieš antrąją parametrinio stiprinimo pakopą impulsas tampa faziškai moduluotas dėl kontinuumo generatoriaus dispersinių savybių. Prieš trečiąją pakopą – panaudojami dispersiniai impulsų plėstuvai, kad būtų pasiekta reikiama užkrato impulso trukmė ir kuo geresnis parametrinės sąveikos efektyvumas.

Nemažiau svarbus šio išradimo aspektas ir privalumas yra tas, kad pirmojoje parametrinio stiprinimo pakopoje galima pasiekti impulso smailinę galią, reikalingą kontinuumo generacijai kietakūnėje turinėje medžiagoje (kristale).

Šio išradimo femtosekundinių šviesos impulsų generavimo būdas leidžia realizuoti lazerinį šaltinį, išspinduliuojantį nuo 5fs iki 30fs trukmės impulsus artimojoje infraraudonojoje elektromagnetinių bangų srityje, kuris yra žymiai paprastesnis ir patikimesnis, lyginant jį su iki šiol žinomais sprendimais. Hibridinė optinė schema, sudaryta iš skaidulinių ir kietakūnių komponentų, užtikrina didelį sistemos efektyvumą, aukštą energijos bei trukmės stabilumą ir aukštą pluošto kokybę. Šio išradimo trijų pakopų lazeriniame šaltinyje gali būti gaunama milidžaulių eilės femtosekundinių impulsų energija, bei yra alternatyva Ti:S paremtoms sistemoms. Dviejų pakopų pagal išradimą pasiūlytame femtosekundinių šviesos impulsų lazeriniame šaltinyje gali būti gaunama iki dešimties mikrodžaulių femtosekundinių impulsų energija bei yra alternatyva Yb:KGW paremtoms sistemoms.

Tokiu būdu pasiūlytas femtosekundinio šviesos impulso generavimo būdas, apimantis pradinio ultratrumpojo impulso generavimą ir jo parametrinį stiprinimą, leidžia padidinti impulso energiją bei sumažinti trukmę.

Pasiūlytas lazerinis šaltinis, apimantis nedidelės energijos pikosekundinių impulsų pradinį generatorių, pvz. iterbio jonais legiruatą skaidulinį lazerį, suderintą su Nd jonų pagrindu veikiančiu kietakūniu kaupinimo atšakos impulso siaurajuosčiu stiprintuvu, be to, kontinuumo generacijai panaudojanti įprastą kristalinę medžiagą, pvz. safyro arba YAG plokštelę, yra gana nesudėtingas ir patikimas. Bendras visų sistemos komponentų sąryšis sąlygoja aukštą lazerinio šaltinio efektyvumą. Galiausiai, šio išradimo lazerinis šaltinis pasižymi mažesne kaina, lyginant jį su analogiškų charakteristikų žinomais femtosekundinių impulsų šaltiniais.

Lazerinis šaltinis pagal šį išradimą, nereikalauja plačiajuosčio regeneratyvinio

lazerinio stiprintuvo užkrato atšakos impulso stiprinimui, tačiau yra panaudojamas kristalas kontinuumo (baltos šviesos) generacijai, todėl turi privalumų prieš žinomus sprendimus. Dar vienas šio išradimo lazerinio šaltinio privalumas yra tas, kad antrai parametrinio stiprinimo pakopai kaupinimo impulsas yra suformuojamas iš pirmoje parametrinio stiprinimo pakopoje sustiprintos ir kontinuumo generacijai nepanaudotos spinduliuotės. Plati kaupinimo impulso spektrinė juosta leidžia pasiekti didelį antros parametrinio stiprinimo pakopos efektyvumą ir/arba suteikia galimybę derinti stiprinamo impulso trukmę.

Šio išradimo trijų pakopų lazeriniame šaltinyje gali būti gaunama milidžaulių eilės femtosekundinių impulsų energija, bei yra alternatyva Ti:S paremtoms sistemoms. Dviejų pakopų pagal išradimą pasiūlytame femtosekundinių šviesos impulsų lazeriniame šaltinyje gali būti gaunama iki dešimties mikrodžaulių femtosekundinių impulsų energija bei yra alternatyva Yb:KGW paremtoms sistemoms.

Toliau išradimas detaliau paaiškinamas brėžiniais, kuriuose:

Fig.1 iliustruoja šio išradimo veikimo principą.

Fig.2 pavaizduota pasiūlyto lazerinio šaltinio principinė blokinė schema, realizuojanti veikimo principą pagal Fig.1

Fig.3 pavaizduota pasiūlyto ilazerinio šaltinio su trimis parametrinio šviesos stiprinimo kristalais blokinė schema.

Femtosekundinio šviesos impulso generavimo būdas, apimantis pradinio ultratrumpojo impulso generavimą ir jo parametrinį stiprinimą, kuriuo ne tik padidinama impulso energija, bet ir sumažinama trukmė, pima šiuos etapus (Fig.1):

pikosekundinio impulso generavimas,

užkrato bei kaupinimo impulsų suformavimas,

bent dvi parametrinio stiprinimo pakopas, kuriuose vyksta faziškai moduluotų impulsų stiprinimas, t.y. prieš parametrinį stiprinimą impulsas yra išplečiamas, o po stiprinimo – suspaudžiamas laike.

Minėtas užkrato suformavimo etapas yra sudarytas iš spinduliuotės paruošimo kontinuumo (baltos šviesos) generacijai ir kontinuumo (baltos šviesos) generacijos. Spinduliuotės paruošimas kontinuumo generacijai apima pradinės

spinduliuotės (pikosekundinio impulso) spektro išplėtimą, stiprinimą bei impulso suspaudimą, kur stiprinimas atliekamas taip pat parametrinio šviesos stiprinimo kristale.

Lazerinis šaltinis (Fig.2) realizuoja šio išradimo būdą yra faziškai moduluotų impulsų nekolinearaus parametrinio šviesos stiprinimo sistema, apimanti vieną pradinės spinduliuotės šaltinį 1, siaurajuostį ($<1\text{nm}$) kvantinį stiprintuvą 2 ir du arba tris netiesinius parametrinio šviesos stiprinimo kristalus 3, 4, 5, kur minėtas kvantinis stiprintuvas 2 apima bent vieną regeneratyvinį stiprintuvą, o tarp pirmojo 3 ir antrojo 4 netiesinių kristalų yra kontinuumo (baltos šviesos) generacijos kristalas 6. Regeneratyvinis stiprinimas yra reikalingas tik siaurajuosčiams kaupinimo atšakos impulsams 7, 8 stiprinti, tuo tarpu plačiajuosčio užkrato atšakos impulso 9 formavime regeneratyvinio stiprinimo nėra. Fig.3 pavaizduota pagal išradimą pasiūlyto lazerinio šaltinio, turinčio tris nekolinearaus parametrinio šviesos stiprinimo pakopas, detali blokinė schema. Pradinio šaltinio 1 spinduliuotė 11, charakterizuojama centriniu bangos ilgiu λ_0 ir spektro plotiu $\Delta\lambda_0$, galios dalikliu 12 yra išskaidoma į dvi dalis: užkrato atšakos spinduliuotė 13 ir kaupinimo atšakos spinduliuotė 14. Impulsų 13, 14 energijų santykis gali būti nuo 10:90 iki 90:10. Pradinio šaltinio 1 spinduliuotės 11 centrinis bangos ilgis λ_0 parenkamas toks, kad perdengtų kietakūnių aktyviųjų medžiagų, geriau Nd legiruočių aktyviųjų medžiagų stiprinimo liniją, o spektro plotis atitiktų kelių pikosekundžių trukmės ribotojo spektro impulsą. Išradimo tikslams pasiekti labai gerai tinka Yb skaidulinis sinchronizuotų modų lazeris, nes jo liuminescencijos juosta yra plati ir perkloja daugelio Nd legiruočių aktyviųjų medžiagų (Nd:YAG, Nd:YVO₄, Nd:YLF ir kt.) stimuliuotosios emisijos maksimumą. Modų sinchronizacijos režime Yb skaiduliniai lazeriai išspinduliuoja spektriškai ribotus nuo 1 iki 5ps trukmės impulsus. Skaidulinių lazerinių osciliatorių impulsų energija neviršija 100pJ, tuo tarpu skaiduliniais šaltiniais, sudarytais iš osciliatoriaus ir galios stiprintuvo, galima gauti iki 10nJ energijos impulsus.

Toliau užkrato atšakos impulso 13 optiniame kelyje yra formuotuvai 15, skirtas impulsui pastiprinti ir/arba faziškai moduluoti. Jeigu reikia, priešstiprintuvyje 16 impulsas 13, yra pastiprinamas iki tokios energijos, kad netiesiniame-dispersiniame optiniame elemente 17 vyktų impulso fazinė savimoduliacija. Spektriškai išplėstas užkrato atšakos impulsas 9, kurio spektro plotis $\Delta\lambda_1$ lygus $(10\div 20)\text{nm}$, yra nukreipiamas į pirmąjį parametrinio šviesos stiprinimo kristalą 3 kaip

pradinė signalinė banga. Minėti optiniai elementai 16 ir 17 taip pat gali būti skaiduliniai. Turint pikosekundinį kelių nJ energijos impulsą priešstiprintuvio 16 išėjime, minėtą iki 20nm spektro išplitimą galima pasiekti nuo dešimties iki kelių dešimčių metrų ilgio standartinėje vienamodėje optinėje skaiduloje. Dėl netiesinių skaidulos savybių vykstanti impulso fazinė savimoduliacija lemia ne tik papildomų spektrinių komponentių atsiradimą, bet ir spektrinių komponentių fazių išsiderinimą (toks impulsas vadinamas faziškai moduluotu arba čirpuotu). Rezultatinis impulso 9 čirpo (spektrinių dažnių pasiskirstymo po impulso gaubtine) profilis, atsirandantis vienamodės optinės skaidulos netiesinių-dispersinių savybių pasekoje, yra toks, kad komponentių fazių nesutapimą galima sukompensuoti paprastais dispersiniais optiniais elementais, pavyzdžiui, prizmių ar gardelių pora. Dėl spektrinių komponentių fazių nesutapimo impulsas 9 laike užima nuo 10 iki 20 pikosekundžių.

Pagal kitą šio išradimo modifikaciją, netiesinis-dispersinis optinis elementas 17 yra vienamodės optinės skaidulos ir čirpuotos skaidulinės Brego gardelės kombinacija, kuria galima gauti didesnį spektrinių komponentių išsifazavimą ir impulso 9 išplitimą laike iki 100ps.

Lygiagrečiai vyksta kaupinimo impulsų formavimas. Pirma, galios dalikliu 12 atskirta pradinio šaltinio spinduliuotės dalis 14 yra stiprinama kvantiniame stiprintuve 2, sudarytame iš vieno arba kelių Nd jonais legiruočių kietakūnių stiprintuvų 18, 19, kur bent vienas iš minėtų kietakūnių stiprintuvų yra regeneratyvinis. Minėtoje stiprintuvų 18, 19 grandinėje impulso energija yra padidinama (6÷9) eilėmis. Dėl siauros Nd-stiprintuvų spektrinės juostos ir regeneratyvinių stiprintuvų savybių sustiprintas impulsas yra nuo 10 iki 100 pikosekundžių trukmės (atskiru atveju galima gauti 5ps sustiprintą impulsą).

Pagal dar vieną šio išradimo modifikaciją, pradinio šaltinio 1 išėjimo impulsas 11 yra faziškai moduluotas (pvz., pradinio šaltinio skaiduliniame osciliatoriuje nėra čirpuotos skaidulinės Brego gardelės, kuri sukompensuotų skaidulinio rezonatoriaus dispersijos sukeltą lazerinės generacijos spektrinių komponentių fazių nesutapimą). Tuomet į impulso formuotuvą 15 patenka jau faziškai moduluotas impulsas 13, ir reikiamas spektro išplitimas bei čirpo profilis pasiekiamas su kitais elementų 16, 17 parametrais. Impulso 14 čirpas nėra svarbus, nes stiprinimas Nd-stiprintuve 2 vyksta tik siauroje spektrinėje srityje.

Toliau yra atliekama antros harmonikos generacija kristale 20 ir pirmos bei

trečios stiprinimo pakopų kaupinimo impulsų 7, 8 formavimas: sugeneruotas antros harmonikos impulsas 21 galios daliklio 22 yra padalinamas į dvi dalis. Mažesnioji antros harmonikos spinduliuotės 21 dalis, kurios energija siekia kelis mJ (pagal kitą modifikaciją – kelis šimtus mikrodžaulių), optiniais elementais 23, apimančiais ir vėlinimo liniją, yra nukreipiama į pirmąjį parametrinio šviesos stiprinimo kristalą 3 kaip kaupinimo impulsas 7. Likusioji antros harmonikos spinduliuotės 21 dalis 8, kurios energija yra kelios dešimtys milidžaulių, yra skiriama kaupinti trečiąją parametrinio stiprinimo pakopą.

Pirmajame parametrinio šviesos stiprinimo kristale 3 pradinis signalinės bangos (užkrato) impulsas 9 ir kaupinimo impulsas 7 yra sutapdinami taip, kad persiklotų laike ir erdvėje bei tenkintų nekolinearaus fazinio sinchronizmo sąlygas. Nors nekolinearios parametrinės sąveikos atveju įmanoma sustiprinti plačią spektrinę juostą, pirmoje parametrinio stiprinimo pakopoje labai geras signalinės bangos impulso 9 ir kaupinimo impulso 7 trukmių suderinimas bei persiklojimas laike nėra būtinas. Svarbiausia yra sustiprinti tokį impulso 9 spektro segmentą, kurį vėliau būtų galima suspausti iki $(100\div 200)$ fs trukmės impulso (t.y. kad būtų reikiamas spektro plotis ir impulsas būtų nesunkiai spaudžiamas). Turint kelių šimtų mikrodžaulių energijos kaupinimo impulsą 7, galima gauti $(10\div 100)$ μJ energijos sustiprintos signalinės bangos impulsą 24, su $(1\div 5)$ mJ kaupinimu - impulso 24 energija siekia $(50\div 300)$ μJ. Tai yra pakankama ir netgi perteklinė energija kontinuumo generacijai kristale 6.

Pirmoji stiprinimo pakopa užbaigiama parametriškai sustiprinto signalinės bangos impulso 24 suspaudimu impulsų spaustuvu 25. Impulso 24 čirpo profilis leidžia suspausti impulsą iki $(100\div 200)$ fs trukmės, kaip impulsų spaustuvą 25 pasirenkant gardelių porą, prizmių porą ar tūrinę čirpuotą Brego gardelę. Suspausto impulso 26 energija siekia nuo kelių iki poros šimtų μJ, o centrinis bangos ilgis λ_1 maždaug lygus pradinio šaltinio (1) spinduliuotės 11 bangos ilgiui λ_0 .

Pažymėtina, kad pirmoji parametrinio stiprinimo pakopa yra artima tradicinei nekolinearaus parametrinio šviesos stiprinimo (NPŠS) schemai: pradinio šaltinio bangos ilgis, pvz. 1064nm, yra parametriškai stiprinamas to paties šaltinio antra harmonika, konkrečiai 532nm. Įvardintiems bangos ilgiams tinka BBO netiesinis kristalas, kurio parametrinio stiprinimo juosta nekolinearioje konfigūracijoje siekia 300nm. Kaupinimo impulso kelyje patalpinus stiprintuvą, galima pasiekti didesnę

sustiprintos signalinės bangos energiją. Tradicinėje NPŠS schemoje 1064nm spinduliuotės (būsimo užkrato) kelyje yra kontinuumo generatorius – taip suformuojamas plačiajuostis užkratas, ir atsiranda galimybė derinti bangos ilgį arba pasiekama trumpesnė nei 100fs impulso trukmė. Šio išradimo pirmoji nekolinearaus parametrinio stiprinimo pakopa nuo tradicinės NPŠS skiriasi tuo, kad: 1) pradinės signalinės bangos (užkrato) impulso 9 spektro plotis $\Delta\lambda_1$ yra sąlyginai mažas, žymiai mažesnis nei netiesinio kristalo parametrinio stiprinimo juosta; 2) pradinės signalinės bangos impulso 9 reikiamos spektrinės juostos suformavimas nereikalauja didelės pradinės spinduliuotės 13 energijos; 3) pradinės signalinės bangos impulsas 9 yra faziškai moduluotas, kur spektrinių komponentų išsifazavimas atsiranda savaime plečiant spinduliuotės 13 spektrą, arba yra įvedamas tyčia, o čirpo profilis yra toks, kad impulsas būtų spaudžiamas prizmių ar gardelių pora iki (100÷500)fs arba (100÷200)fs (priklausomai nuo pasirinkto kontinuumo generacijos kristalo) trukmės.

Šio išradimo pirmoji parametrinio stiprinimo pakopa yra spinduliuotės 26, reikalingos kontinuui (t.y. užkrato tolimesnėms parametrinio stiprinimo pakopoms) sugeneruoti, paruošimas. Didžiausias minėto pasiruošimo etapo išskirtinumas ir privalumas yra tai, kad impulsas 9 gali būti suformuotas vien tik skaiduliniais optiniais elementais, pagamintais paprastų vienamodžių optinių skaidulų pagrindu.

Toliau seka antroji parametrinio stiprinimo pakopa. Kontinuui 27, iš kurio formuojamas pradinės signalinės bangos impulsas (užkratas) 28 antrai parametrinio stiprinimo pakopai, sugeneruoti yra skiriama dalis, dažniausiai – ne daugiau kaip 5%, spinduliuotės 26 energijos. Pluoštų daliklio 29 atskirtas (100÷500)fs arba (100÷200)fs trukmės (0,5÷4) μ J energijos impulsas 30 yra sufokusuojamas kontinuume kristale 6 – YAG arba safyro plokštelėje, kur vienu metu vykstančių kelių netiesinių reiškinių pasekoje yra sugeneruojama daug papildomų spektrinių komponentų. Kontinuui generuoti gali būti panaudoti ir kiti žinomi kristalai. Rezultatinis spinduliuotės 27 spektro plotis siekia kelis šimtus nm, t.y. atitinka sub-5fs spektriškai riboto impulso trukmę, tačiau dėl kontinuumo kristalo 6 dispersijos sąlygoto spektrinių komponentų išsifazavimo laike užima nuo 100fs iki 1ps. Impulso 27 energija siekia apie 10nJ.

Kontinuumo generacijai nepanaudota impulso 26 dalis pluoštų daliklio 29 yra nukreipiama į antro kaupinimo impulso 10 formavimo atšaką. Čia iš spinduliuotės 31, kurios centrinis bangos ilgis maždaug sutampa su pradinio šaltinio 1 bangos ilgiu, pvz., 1064nm (jei stiprintuvas 2 yra Nd:YAG), netiesiniame kristale 32 yra

sugeneruojama antra harmonika. Sugeneruotas antros harmonikos impulsas yra nukreipiamas į antrąjį parametrinio šviesos stiprinimo kristalą 4 kaip kaupinimo impulsas 10.

Antrajame parametrinio šviesos stiprinimo kristale pradinės signalinės bangos (užkrato) impulsas 28 ir kaupinimo impulsas 10 taip pat yra suvedami kampu, tenkinant nekolinearaus fazinio sinchronizmo sąlygas. Šiame etape geras impulsų 28 ir 10 persiklojimas laike yra svarbus – nuo to priklauso viso lazerinio šaltinio impulso trukmė (ir centrinis bangos ilgis). Dėl šios priežasties kiekvieno iš impulsų 28, 10 kelyje gali būti papildomi optiniai elementai – impulsų plėstuvai ir/arba spaustuvai 33, 34 bei keičiamo ilgio vėlinimo linija 35. Nuo užkrato ir kaupinimo impulsų 28, 10 trukmių santykio bei impulsų tarpusavio vėlinimo priklauso, kurioms stiprinamos bangos spektrinėms komponentėms parametrinis stiprinimas yra efektyviausias. Kadangi impulsai 28 ir 10 yra palyginamų trukmių ir yra femtosekundiniai, bet koks trukmių pakeitimas, arba impulsų perslinkimas, turi didelės įtakos.

Pagal vieną iš šio išradimo realizacijų, užkrato impulso 28 kelyje papildomo optinio elemento 33 nėra, o kaupinimo impulso 10 kelyje yra patalpinamas impulsų plėstuvai 34. $(10+20)$ nm pločio spektrinės juostos impulsas 10 lengvai plečiasi. Šiuo atveju impulso 10 trukmė padidinama tiek, kad susilygintų arba viršytų užkrato impulso 28 trukmę. Pagal alternatyvią šio išradimo realizaciją kaupinimo impulsas 10 nėra plečiamas (komponento 34 nėra), o užkrato impulso 28 kelyje yra spaustuvai 33. Kadangi impulsas 28 yra stipriai faziškai moduluotas, jo trukmę galima sumažinti, panaikinant arba sumažinant spektrinių komponentių fazių skirtumus. Paprastais gardeliniais ar prizminiais spaustuvais galima pasiekti apie 10fs impulso 28 trukmę, t.y. ne visos spektrinės komponentės yra sufazuojamos, ir impulsas išlieka šiek tiek faziškai moduluotas. Sukompensuoti aukštesnės eilės dispersijos narius, atsiradusius kontinuumo generacijos metu ir pasiekti spektriškai riboto impulso trukmę nėra būtina, nes parametrinis stiprinimas efektyviau vyksta, kai kaupinimo impulsas yra ne daugiau kaip 10 kartų ilgesnis už užkrato impulsą; be to, dirbant su faziškai moduluotais impulsais yra mažesnė netiesinio kristalo pažeidimo tikimybė. Pagal dar kitas šio išradimo variacijas yra galimà ir kitokia elementų 33, 34 kombinacija: abu impulsai 28 ir 10 gali būti išplečiami laike, arba impulsas 28 šiek tiek suspaudžiamas, o impulsas 10 – išplečiamas. Taigi ir kaupinimo impulsas gali būti čirpuotas. Parametriškai stiprinant čirpuotą impulsą 28 čirpuotu kaupinimo

impulsu 10, priklausomai nuo jų čirpo profilio ir tarpusavio vėlinimo, kinta atskirų signalinės bangos spektrinių komponentių stiprinimo sąlygos. Turint kintamo ilgio vėlinimo liniją 35, atsiranda galimybė valdyti impulso 36 centrinių bangos ilgį λ_2 .

Parenkant optimalų užkrato ir kaupinimo impulsų 28, 10 persiklojimą laike, galima parametriškai sustiprinti visas kontinuumo spektrines komponentes, kurios tik patenka į netiesinio kristalo 4 nekolinearaus parametrinio stiprinimo juostą. BBO kristalo, kuris ypač tinka 1064nm spinduliutei stiprinti, kai kaupinimui naudojama 532nm spinduliuotė, parametrinio stiprinimo juostos plotis siekia 300nm. O tai reiškia, kad sustiprintos signalinės bangos 36 spektro plotis atitiks <10fs trukmės spektriškai ribotą impulsą.

Tuo atveju, kai užkrato ir kaupinimo impulsų 28, 10 persiklojimas laike nėra optimalus, ir parametrinio stiprinimo kristale 4 metu yra sustiprinamos ne visos sugeneruoto kontinuumo spektrinės komponentės, kurios patenka į netiesinio kristalo 4 parametrinio stiprinimo juostą, sustiprintos signalinės bangos 36 spektro plotis atitinka (10÷100)fs trukmės impulsą.

Šio išradimo lazeriniame šaltinyje pagal Fig.2, turinčiame tris parametrinio šviesos stiprinimo pakopas, antros pakopos pabaigoje už netiesinio kristalo 4 sustiprinto signalinės bangos impulso 36 spaudimas nėra atliekamas, nes iškart seka trečioji parametrinio stiprinimo pakopa. Kadangi spinduliuotė 36 yra faziškai moduluota, laike ji užima nuo 100fs iki 1ps arba ir daugiau. Energija siekia nuo 1μJ iki 10μJ.

Trečioji parametrinio stiprinimo pakopa atitinka tradicinę faziškai moduluotų impulsų parametrinio šviesos stiprinimo (FMIPŠS) schemą. Pradinės signalinės bangos (užkrato) impulsas 37 yra suformuojamas iš antroje pakopoje sustiprinto impulso 36 ištempiant jį laike (plėstuve 38), kad jo trukmė būtų palyginama su kaupinimo impulso 8 trukme. Efektyviam parametriniam stiprinimui pasiekti užkrato impulsas 37 turi būti trumpesnis už kaupinimo impulsą 8, bet ne daugiau kaip 10 kartų. Optimalioje šio išradimo realizacijoje užkrato impulso ir kaupinimo impulsų trukmių santykis yra (1÷2) ribose. Esant tokiam trukmių santykiui ir vėlinimo linija 39 suderinus impulsų laikinę poziciją taip, kad užkrato impulsas būtų po kaupinimo impulso gaubtinės viršūnės, visoms signalinės bangos spektrinėms komponentėms tenka maždaug vienoda kaupinimo energija. Tokiu atveju stiprinamo signalinės

bangos centrinis bangos ilgis nepasislenka bei yra išlaikomos ir kitos spektro charakteristikos – atskirų komponentių amplitudžių santykis bei čirpo profilis. Trečios pakopos užkrato impulsas 37 ir kaupinimo impulsas 8 taip pat yra perklojami parametrinio šviesos stiprinimo kristale 5 nekolineariai.

Turint kelių dešimčių milidžaulių, pavyzdžiui 50mJ, energijos kaupinimo impulsą 8, už parametrinio šviesos stiprinimo kristalo 5, pavyzdžiui BBO, gaunamas nuo 2 iki 20mJ energijos sustiprintas signalinės bangos impulsas 40. Po to ši spinduliuotė kerta impulsų spaustuvą 41, kuriame yra suformuojamas femtosekundžių trukmės išėjimo impulsas 42. Priklausomai nuo pasirinktų impulso plėstuvo 38 ir spaustuvo 41 bei spinduliuotės 36 spektro pločio, šio išradimo trijų parametrinio stiprinimo pakopų lazerinėje sistemoje galima gauti ~1mJ sub-30fs arba derinamos trukmės (nuo 30fs iki 100fs) derinamo bangos ilgio (650÷1000)nm srityje impulsus 42. Antroje parametrinio stiprinimo pakopoje pasirenkant tokį impulsų 28 ir 10 trukmių santykį bei jų persiklojimą laike, kad būtų stiprinamos visos sugeneruoto kontinuumo 27 spektro komponentės, kurios tik patenka į netiesinio kristalo 4 parametrinio stiprinimo juostą (~300nm), ir panaudojant sudėtingus impulsų plėtimo ir spaudimo elementus 38, 32, kurie geba kompensuoti netiesinį impulso čirpą, šio išradimo lazerinė sistema galima gauti sub-10fs ar net iki 5fs trukmės impulsus, kurių energija siekia (1÷5)mJ, o centrinis bangos ilgis maždaug lygus 800nm. Vienas iš pavyzdžių – akustooptinis impulsų plėstuvas, kuriuo galima suformuoti norimo profilio impulso čirpą. Taigi galima kompensuoti sudėtingą spinduliuotės fazinę moduliaciją, atsiradusią kontinuomo generacijos metu bei suteikti spektrinių komponentių išsifazavimą, kurį gebės kompensuoti impulsų spaustuvai 41, pvz., stiklo kubas. Tuo tarpu, ~30fs impulso trukmei pasiekti užtenka naudoti įprastus 2- ar 4- gardelinių impulsų plėstuvą 38 ir spaustuvą 41. Siekiant ~20fs impulso trukmės, tinkamas pasirinkimas – impulsų plėstuvai ir spaustuvai, sudaryti iš gardelių ir lęšių.

Schemoje su trimis parametrinio šviesos stiprinimo pakopomis reikalingas kvantinis stiprintuvas 2, kurio aktyvioji medžiaga gali būti pasirinkta iš Nd:YAG, Nd:YVO₄, Nd:YLF ir kitų Nd jonais legiruotų aktyviųjų medžiagų, gebantis sustiprinti kaupinimo atšakos impulsą 14 iki (100μJ÷100mJ) energijos.

Lazerinis šaltinis pagal kitą šį išradimo būdo realizaciją yra sudarytas iš dviejų parametrinio šviesos stiprinimo pakopų. Jo optinė schema skiriasi nuo Fig.3 tuo, kad neturi elementų 22, 5, 38 ir 39, o kaupinimo atšakoje reikalingas mažesnės

galios kaupinimo impulso stiprintuvas 2. Šio išradimo dviejų parametrinio stiprinimo pakopų lazeriniame šaltinyje su 1mJ kaupinimo impulsų stiprintuvu 2 galima gauti iki 10μJ nuo 5fs iki 30fs trukmės išėjimo impulsus 42.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Femtosekundinių šviesos impulsų generavimo būdas, apimantis bent dvi parametrinio šviesos stiprinimo pakopas, kur

pirmoje stiprinimo pakopoje į pirmąjį parametrinio šviesos stiprinimo kristalą (3) nukreipia tarpusavyje optiškai sinchronizuotus užkrato spinduliuotės (9) ir kaupinimo spinduliuotės (7) impulsus, kuriame jie persikloja laike ir erdvėje, tenkinant nekolinearaus fazinio sinchronizmo sąlygas, ir

antroje stiprinimo pakopoje į antrąjį parametrinio šviesos stiprinimo kristalą (4) nukreipia tarpusavyje optiškai sinchronizuotus užkrato spinduliuotės (28) ir kaupinimo spinduliuotės (10) impulsus, kuriame jie persikloja laike ir erdvėje, tenkinant nekolinearaus fazinio sinchronizmo sąlygas,

o paskutinėje stiprinimo pakopoje sustiprintos signalinės bangos spinduliuotės impulsus suspaudžia iki femtosekundžių trukmės išėjimo impulsų,

kur minėtas užkrato ir kaupinimo spinduliuotės (9, 28, 7, 10) formuoja iš to paties pirminio ultratrumpųjų impulsų lazerinio šaltinio (1) spinduliuotės (11) galios daliklio (12) ją padalinant į užkrato atšakos spinduliuotę (13) ir kaupinimo atšakos spinduliuotę (14),

minėtą pirmos stiprinimo pakopos užkrato spinduliuotę (9) formuoja iš užkrato atšakos spinduliuotės (13), jos impulsus ištempiant laike, o

minėtą pirmos stiprinimo pakopos kaupinimo spinduliuotę (7) formuoja iš kaupinimo atšakos spinduliuotės (14), ją sustiprinant ir atliekant antros harmonikos generaciją,

minėtą antros stiprinimo pakopos užkrato spinduliuotę (28) formuoja iš pirmajame parametrinio šviesos stiprinimo kristale (3) sustiprintos signalinės bangos spinduliuotės (24), jos impulsus suspaudžiant laike, o po to suspaustų impulsų spinduliuotės (26) spektrą išplečiant baltos šviesos generatoriuje (6) iki ne mažesnio kaip 300nm spektro pločio,

besiskiriantis tuo, kad

minėto pirminio ultratrumpųjų impulsų lazerinio šaltinio (1) spinduliuotės (11) impulsų trukmė yra nuo 1ps iki 3ps,

minėtos pirmos stiprinimo pakopos užkrato spinduliuotės (9) formavimas papildomai apima spektro išplėtimą iki $(10+20)\text{nm}$ pločio,

formuojant minėtą pirmos stiprinimo pakopos kaupinimo spinduliuotę (7), stiprina neplatesnę nei 1nm pločio kaupinimo atšakos spinduliuotės (14) spektrinę juostą,

formuojant antros stiprinimo pakopos užkrato spinduliuotę (28) po spektro išplėtimo baltos šviesos generatoriuje (6), jeigu reikia, papildomai atlieka jos impulsų suspaudimą laike,

minėtą antros stiprinimo pakopos kaupinimo spinduliuotę (10) formuoja iš pirmoje pakopoje sustiprintos signalinės bangos spinduliuotės (24), kur po jos impulsų suspaudimo, galios dalikliu (29) atskiria suspaustų impulsų spinduliuotės dalį (31) ir iš jos generuoja antrą harmoniką, o prieš nukreipiant į antrąjį parametrinio šviesos stiprinimo kristalą (4), jeigu reikia, antros harmonikos spinduliuotės impulsus ištempia laike,

o paskutinėje minėtoje antroje stiprinimo pakopoje sustiprintus signalinės bangos impulsus suspaudžia, suformuojant išėjimo impulsus, kurių trukmė yra intervale nuo 5fs iki 100fs .

2. Femtosekundinių šviesos impulsų generavimo būdas pagal 1 punktą, besiskiriantis tuo, kad

turi trečią stiprinimo pakopą, kurioje į trečiąjį parametrinio šviesos stiprinimo kristalą (5) nukreipia tarpusavyje optiškai sinchronizuotus užkrato spinduliuotės (37) ir kaupinimo spinduliuotės (8) impulsus, kuriame jie persikloja laike ir erdvėje tenkinant nekolinearaus fazinio sinchronizmo sąlygas, kur

užkrato spinduliuotę (37) formuoja iš antrajame parametrinio šviesos stiprinimo kristale (4) sustiprintos signalinės bangos spinduliuotės (36), jos impulsus ištempia laike,

kaupinimo spinduliuotę (8) formuoja taip pat kaip ir pirmos stiprinimo pakopos kaupinimo spinduliuotę (7),

o paskutinėje minėtoje trečioje stiprinimo pakopoje sustiprintus signalinės bangos impulsus suspaudžia, suformuojant išėjimo impulsus, kurių trukmė yra intervale nuo 5fs iki 100fs .

3. Femtosekundinių šviesos impulsų generavimo būdas pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, besiskiriantis tuo, kad

minėto pirminio ultratrumpųjų impulsų lazerinio šaltinio (1) spinduliuotės centrinis bangos ilgis yra parinktas iš Yb jonais legiruotų aktyviųjų medžiagų liuminescencijos juostos taip, kad perdengtų Nd jonais legiruotos aktyviosios medžiagos stiprinimo liniją, o paskutinės stiprinimo pakopos femtosekundinių išėjimo impulsų centrinis bangos ilgis yra maždaug lygus 800nm.

4. Femtosekundinių šviesos impulsų generavimo būdas pagal 3 punktą, besiskiriantis tuo, kad minėto pirminio ultratrumpųjų impulsų lazerinio šaltinio (1) spinduliuotės centrinis bangos ilgis yra maždaug lygus 1064nm.

5. Femtosekundinių šviesos impulsų lazerinis šaltinis,

apimantis pirminį ultratrumpųjų impulsų lazerinį šaltinį (1), ir bent du parametrinio šviesos stiprinimo kristalus (3, 4),

minėto pirminio ultratrumpųjų impulsų lazerinio šaltinio (1) spinduliuotė (11) galios daliklio (12) yra padalinta į užkrato atšakos spinduliuotę (13) ir kaupinimo atšakos spinduliuotę (14),

užkrato atšakos spinduliuotės (13) kelyje yra patalpintas impulsų formuotuvą (15), skirtas užkrato atšakos spinduliuotės (13) impulsams ištempti laike ir nukreipti į pirmąjį parametrinio šviesos stiprinimo kristalą (3) kaip užkrato spinduliuotę (9),

kaupinimo atšakos spinduliuotės (14) kelyje yra išdėstyti kvantinis stiprintuvas (2) ir antros harmonikos kristalas (20), kurio sugeneruota antros harmonikos spinduliuotė optiniais elementais (23) yra nukreipta į pirmąjį parametrinio šviesos stiprinimo kristalą (3) kaip kaupinimo spinduliuotę (7) taip, kad parametrinio šviesos stiprinimo kristale (3) kaupinimo spinduliuotės (7) impulsai persiklotų su minėtos užkrato spinduliuotės (9) atitinkamais impulsais laike ir erdvėje tenkinant nekolinearaus fazinio sinchronizmo sąlygas,

pirmajame stiprinimo kristale (3) sustiprintos signalinės bangos spinduliuotės (24) kelyje yra išdėstyti spinduliuotės impulsų spaustuvas (25) ir baltos šviesos generatorius (6), kurio sugeneruota nemažesnio kaip 300nm pločio spinduliuotė (27) yra nukreipta į antrąjį parametrinio šviesos stiprinimo kristalą (4) kaip užkrato

spinduliuotė ,

į kurį optiniais elementais (35) taip pat yra nukreipta formuotuve suformuota kaupinimo spinduliuotė (10) taip, kad parametrinio šviesos stiprinimo kristale (4) kaupinimo spinduliuotės (10) impulsai persiklotų su minėtos užkrato spinduliuotės (28) atitinkamais impulsais laike ir erdvėje tenkinant nekolinearaus fazinio sinchronizmo sąlygas,

paskutiniame parametrinio šviesos stiprinimo kristale sustiprinti signalinės bangos spinduliuotės impulsai yra nukreipti į impulsų spaustuvą, skirtą suformuoti femtosekundžių trukmės išėjimo impulsus, besiskiriantis tuo, kad

minėtas pirminis ultratrumpųjų impulsų lazerinis šaltinis (1) yra pikosekundinis, kurio išėjimo spinduliuotės (11) impulsų trukmė yra intervale nuo 1ps iki 3ps,

minėtos užkrato spinduliuotės (9) impulsų formuotuvus (15) yra sukonstruotas taip, kad ne tik ištemptų impulsus laike, bet ir išplėstų jų spektrą iki $(10\div 20)\text{nm}$ pločio,

minėtas kvantinis stiprintuvas (2) yra siaurajuostis, kurio stiprinimo juosta yra neplatesnė nei 1nm,

minėtos užkrato spinduliuotės (28) kelyje prieš antrąjį parametrinės šviesos stiprinimo kristalą (4) gali būti patalpinamas impulsų spaustuvus (33),

antros stiprinimo pakopos kaupinimo spinduliuotės (10) impulsų formuotuvus yra išdėstytas minėtu spaustuvu (25) suspaustos ir dalikliu (29) atskirtos spinduliuotės dalies (31) kelyje bei apima antros harmonikos kristalą (32), ir gali turėti impulsų plėstuvą (34),

o antrojo parametrinio šviesos stiprinimo kristalo (4) sustiprinta signalinės bangos spinduliuotė yra nukreipta į impulsų spaustuvą, skirtą suformuoti išėjimo impulsus, kurių trukmė yra intervale nuo 5fs iki 100fs.

6. Femtosekundinių šviesos impulsų lazerinis šaltinis pagal 5 punktą, besiskiriantis tuo, kad

minėtas siaurajuostis kvantinis stiprintuvas (2) apima bent vieną Nd jonais legiruotą kietakūnį stiprintuvą (18, 19), ir kur bent vienas iš minėtų kietakūnių stiprintuvų (18, 19) yra regeneratyvinis, kur stiprintuvo (2) išėjimo impulsų energija

yra intervale nuo $100\mu\text{J}$ iki 1mJ , o sugeneruotų femtosekundinių išėjimo impulsų energija siekia nuo 1 iki $10\mu\text{J}$.

7. Femtosekundinių šviesos impulsų lazerinis šaltinis pagal 5 punktą, besiskiriantis tuo, kad

turi trečią parametrinio šviesos stiprinimo kristalą (5),

į kurį per impulsų plėstuvą (38) yra nukreipta antrajame parametrinio šviesos stiprinimo kristale (4) sustiprinta signalinės bangos spinduliuotė (36) kaip užkrato spinduliuotė (37)),

o minėto antros harmonikos kristalo (20) generuojamos spinduliuotės (21) galios daliklio (22) atskirta dalis optiniais elementais (39) yra nukreipta kaip kaupinimo spinduliuotė (8) į trečią parametrinio šviesos stiprinimo kristalą (5) taip, kad jame kaupinimo spinduliuotės (8) impulsai persiklotų su minėtos užkrato spinduliuotės (37) atitinkamais impulsais laike ir erdvėje tenkinant nekolinearaus fazinio sinchronizmo sąlygas,

o trečiojo parametrinio šviesos stiprinimo kristalo (4) sustiprinta signalinės bangos spinduliuotė yra nukreipta į impulsų spaustuvą (41), skirtą suformuoti išėjimo impulsus, kurių trukmė yra intervale nuo 5fs iki 100fs .

8. Femtosekundinių šviesos impulsų lazerinis šaltinis pagal 7 punktą, besiskiriantis tuo, kad minėtas siaurajuostis kvantinis stiprintuvas (2) apima bent vieną Nd jonais legiruotą kietakūnį stiprintuvą (18, 19), ir kur bent vienas iš minėtų kietakūnių stiprintuvų (18, 19) yra regeneratyvinis, kur stiprintuvo (2) išėjimo impulsų energija yra intervale nuo $100\mu\text{J}$ iki 100mJ , o sugeneruotų femtosekundinių išėjimo impulsų (42) energija siekia nuo $10\mu\text{J}$ iki 10mJ .

9. Femtosekundinių šviesos impulsų lazerinis šaltinis pagal bet kurį iš 5-8 punktų, besiskiriantis tuo, kad minėtas pirminis ultratrumpųjų impulsų šaltinis (1) yra iterbio (Yb) jonais legiruotos aktyviosios medžiagos pagrindu sukonstruotas lazeris, suderintas išspinduliuoti spektrinę liniją, perdengiančią Nd jonais legiruotų aktyviųjų medžiagų stiprinimo liniją.

10. Femtosekundinių šviesos impulsų lazerinis šaltinis pagal 9 punktą, besiskiriantis tuo, kad

pirminis ultratrumpųjų impulsų šaltinis (1) yra Yb jonais legiruotos

vienamodės optinės skaidulos pagrindu sukonstruotas lazerinis šaltinis, o minėtas kvantinis stiprintuvas (2) yra Nd:YAG, Nd:YVO₄ ar Nd:YLF stiprintuvas.

11. Femtosekundinių šviesos impulsų lazerinis šaltinis pagal bet kurį iš 5-10 punktų, besiskiriantis tuo, kad pirminio ultratrumpųjų impulsų šaltinio (1) išėjimo spinduliuotės (11) impulsų energija neviršija 100pJ, o minėtas formuotuvus (15) apima priešstiprintuvį (16), skirtą impulsų energijai padidinti iki $(1\div 10)$ nJ ir optinį elementą (17), kuriame vyksta impulso fazinė savimoduliacija.

12. Femtosekundinių šviesos impulsų lazerinis šaltinis pagal bet kurį iš 5-10 punktų, besiskiriantis tuo, kad pirminio ultratrumpųjų impulsų šaltinio (1) išėjimo spinduliuotės (11) impulsų energija siekia $(1\div 10)$ nJ.

13. Femtosekundinių šviesos impulsų lazerinis šaltinis pagal bet kurį iš 5-12 punktų, besiskiriantis tuo, kad formuotuvus (15) yra pagamintas vienamodės optinės skaidulos pagrindu.

14. Femtosekundinių šviesos impulsų lazerinis šaltinis pagal bet kurį iš 5-13 punktų, besiskiriantis tuo, kad baltos šviesos generatorius (6) yra safyro arba YAG plokštelė.

15. Femtosekundinių šviesos impulsų lazerinis šaltinis pagal bet kurį iš 5-14 punktų, besiskiriantis tuo, kad pirmame parametrinio šviesos stiprinimo kristale (3) sustiprintos ir impulsų spaustuvu (25) suspaustos signalinės bangos spinduliuotės (26) impulsų trukmė yra intervale nuo 100fs iki 200fs.

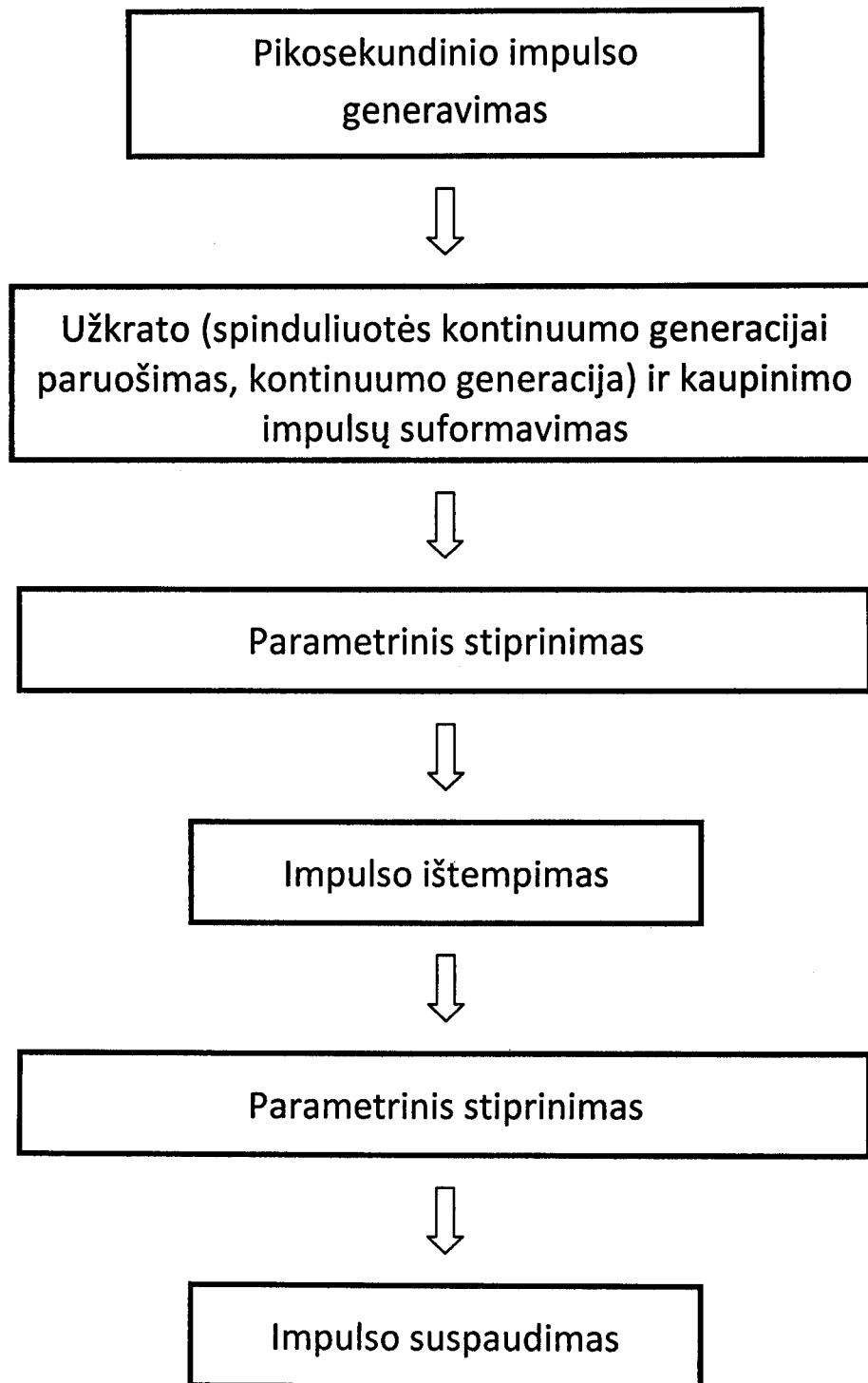


Fig.1

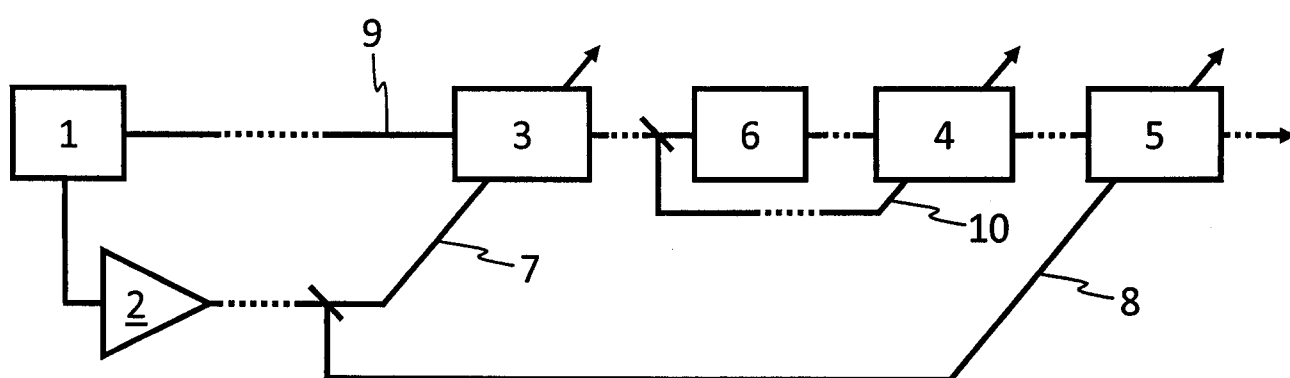


Fig.2

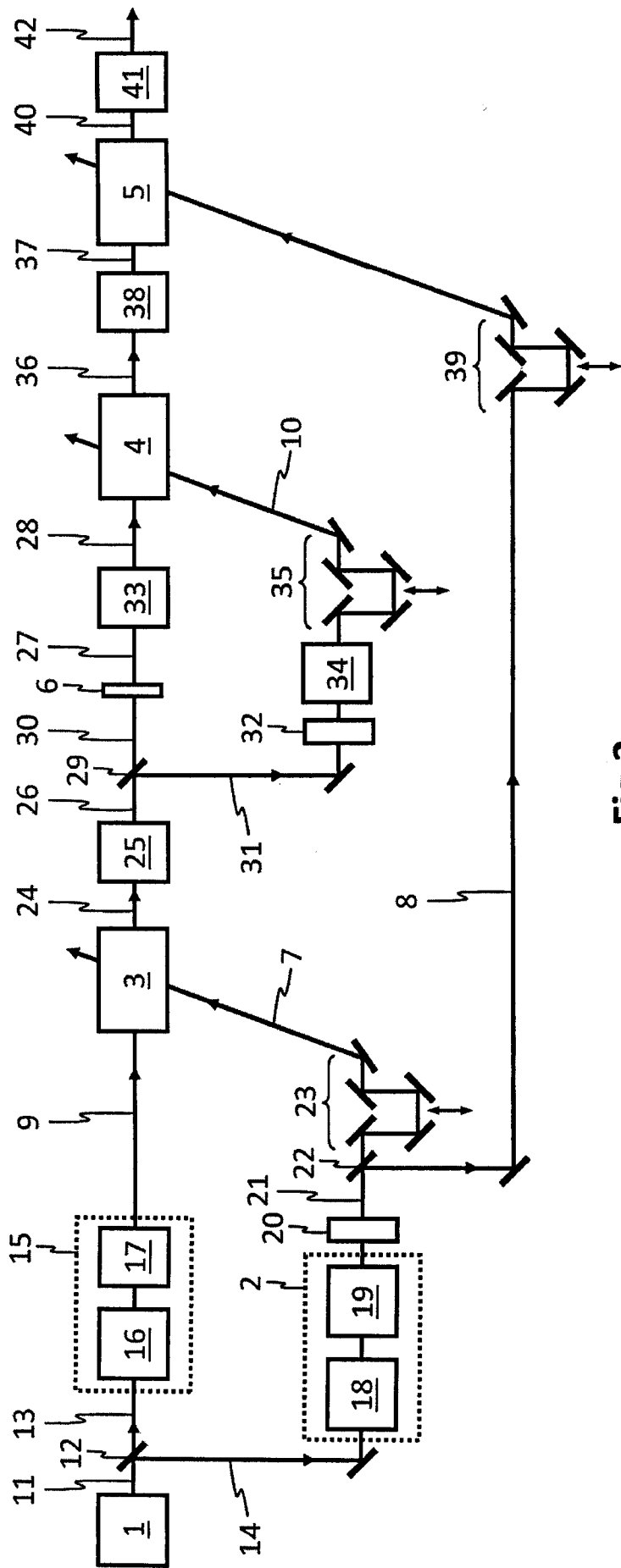


Fig.3