

(51) Int. Cl. (2022.01):

H01S 3/00
G02F 1/00

(21) Paraiškos numeris:	2020 559
(22) Paraiškos padavimo data:	2020-12-02
(41) Paraiškos paskelbimo data:	2022-06-10
(45) Patento paskelbimo data:	2022-06-27

(73) Patento savininkas:

**UAB „EKSPLO“, Savanorių pr. 237, LT-02300
Vilnius, LT**

(72) Išradėjas:

Romaldas ANTANAVIČIUS, LT
Mikhail GRISHIN, LT
Andrejus MICHAILOVAS, LT

(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:

**Virgina Adolfina DRAUGELIENĖ, 8, UAB TARPINĖ,
A.P.Kavoliuko g. 24-152, LT-04328 Vilnius, LT**

(54) Pavadinimas:

Derinamo bangos ilgio impulsinės lazerinės spinduliuotės šaltinis VIS-NIR spektroskopijai

(57) Referatas:

Išradimas susijęs su tolygiai derinamais siauros spektrinės juostos lazeriniais šaltiniais. Matomosios ir artimosios infraraudonosios srities spektroskopijai skirtas šaltinis yra sudarytas iš kaupinimo impulsų šaltinio, suformuojančio didelio impulsų pasikartojimo dažnio pikosekundinių impulsų paketus, ir sinchroniškai kaupinamo parametrinio šviesos osciliatoriaus. Kaupinimo šaltinis apima kietakūnį regeneracinį stiprintuvą, kurio rezonatoriaus viduje yra vienas arba du elektro-optiniai raktai. Raktai laiko intervalui, ilgesniam negu rezonatoriaus apėjimo laikas, sukuria dalinį rezonatoriaus pralaidumą, ir išmeta dalį viduje cirkuliuojančio impulso energijos. Suformuojami (5-10) ns trukmės impulsų paketai su pikosekundinių didelės smailinės galios impulsų užpilda. GHz eilės kaupinimo impulsų pasikartojimo dažnis leidžia konstruoti kompaktišką parametrinį šviesos osciliatorių. Visas parametru rinkinys užtikrina aukštą energinį efektyvumą, stabilumą ir galimybę tiekti iki 10kHz paketų pasikartojimo dažnio išėjimo impulsų paketus. Kaupinant artimojo infraraudonojo diapazono lazerio spinduliuote arba jo harmonikų spinduliuote, bangos ilgio derinimo diapazonas perdengia matomąją ir artimąją infraraudonąją spektro sritį.

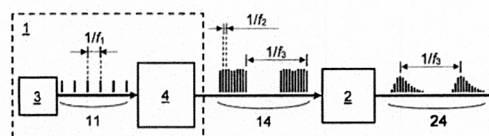


Fig.1A

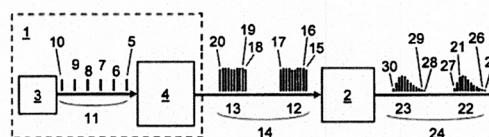


Fig.1B

LT 6919 B

Derinamo bangos ilgio impulsinės lazerinės spinduliuotės šaltinis VIS-NIR spektroskopijai

Technikos sritis

Išradimas yra susijęs su lazeriniais šaltiniais, ypač su derinamo bangos ilgio ir siauros spektrinės juostos šaltiniais. Labiausiai išradimas yra susijęs su (1–10) kHz impulsų pasikartojimo dažnio didelio efektyvumo ir stabilumo lazeriniais šaltiniais VIS-NIR spektroskopijai.

Technikos lygis

Daugelyje mokslo, medicinos ir pramonės sričių yra reikalinga matomosios ir artimosios infraraudonosios spektro srities (sutrumpintai, VIS-NIR) lazerinė spinduliuotė. Spektroskopiniams taikymams (medžiagų identifikavimui, cheminės sudėties analizei ir pan.) reikalinga derinamo bangos ilgio spinduliuotė. Vienas iš svarbiausių parametrų spektroskopijoje yra spektrinė skyra, kuri nulemia, kokią siauriausią spektrinę liniją galima identifikuoti. Dujų detekcijai reikalinga labai siauro spektro ($<1\text{ cm}^{-1}$) spinduliuotė, kurią galima sugeneruoti naudojant nuolatinės veikos arba ilgų impulsų lazerius. Kondensuotoms medžiagoms (skystos ir kietos) tirti (1–10) cm^{-1} pločio spektrinė juosta yra tinkama. Komercinis lazerinis šaltinis turi būti kompaktiškas, lengvai aptarnaujamas ir patikimas, o taip pat efektyvus, santykinai nebrangus ir reikalingų parametrų. Dar vienas svarbus aspektas – impulso trukmė. Laikinės skyros spektroskopijai reikalingos trumpesnės nei kelios dešimtys pikosekundžių impulsų trukmės. Iš čia seka išvada, kad parametrinis šviesos osciliatorius, skirtas spektroskopiniams tyrimams, turi generuoti derinamą spinduliuotę optimalios impulso trukmės, su kuria galima tirti greitus procesus, tačiau ne per daug mažos trukmės, kad nebūtų prarasta spektrinė skyra. Tobulėjant optoelektroninėms signalų registracijos ir apdorojimo sistemoms, o taip pat optomechaninių šviesos pluoštų skenavimo sistemoms, atsiranda poreikis lazerinėms sistemoms, generuojančioms derinamo bangos ilgio impulsus dideliu pasikartojimo dažniu. Tai leidžia sukurti spektroskopinius ir analitinius prietaisus, kuriais galima atlikti ženkliai didesnę matavimų ciklą per laiko vienetą.

Parametrinio šviesos stiprinimo įrenginiai yra tipiniai derinamo bangos ilgio spinduliuotės šaltiniai. Yra išvystyti parametriniai šviesos osciliatoriai PŠO (dar vad. rezonatoriniais parametriniais šviesos generatoriais), parametriniai šviesos

generatoriai PŠG ir kaskadinės schemos, kuriose PŠO arba PŠG spinduliuotė yra pastiprinama parametriniais šviesos stiprintuvais PŠS. Siekiant užtikrinti aukščiau minėtų gerų komercinio produkto charakteristikų visumą, ir kad šaltiniai būtų prieinami platesniam vartotojų ratui, parametriniai šviesos prietaisai yra nuolat tobulinami.

Parametrinė šviesos generacija ir stiprinimas labai priklauso nuo kaupinančio lazerio parametrų. Spektroskopiniams taikymams, kuriems nereikia didelės impulsų energijos, svarbiausias kriterijus kaupinimo lazeriui yra parametrų rinkinys, kad vyktų efektyvi parametrinė konversija. Efektyvi konversija reikalinga ne tik dėl bendro sistemos energinio efektyvumo, bet ir dėl stabilumo. Esant labai efektyviai sąveikai, pasiekiamas taip vadinamas energetinių mainų soties režimas, kai kaupinančio lazerio energijos pokyčiai silpnai veikia parametrinio signalo energiją. Todėl turi būti optimalus kaupinimo spinduliuotės intensyvumo (impulso trukmės, energijos, pluošto dėmės) ir sąveikos trukmės santykis.

Vienas iš būdų realizuoti derinamo bangos ilgio impulsinės lazerinės spinduliuotės šaltinius yra parametrinio šviesos stiprinimo įrenginiai, kaupinami nanosekundiniais impulsais. Nanosekundiniai lazeriai yra vieni iš labiausiai paplitusių ir paprasčiausių pagal savo konstrukciją lazerių. Be to, pasižymi siaura parametriškai sugeneruotos spinduliuotės spektrine linija. Dėl paprastumo, patikimumo ir nebrangumo jie yra labiausiai tinkami integravimui į analitinius prietaisus. Tačiau turi atitikti pagrindinį reikalavimą – jų generuojamų impulsų intensyvumas turi būti pakankamas tam, kad vyktų efektyvi parametrinė generacija plačiame bangos ilgio derinimo spektriniame diapazone. Šis reikalavimas tampa sunkiai įgyvendinamas keliant nanosekundinio lazerio impulsų pasikartojimo dažnį. Priežastis – mažėjanti energija (atvirkščiai proporcingai impulsų pasikartojimo dažniui) ir ilgėjanti generuojamų impulsų trukmė. Tokiu būdu krenta impulsų intensyvumas, kas parametrinės sąveikos atveju prastina derinamo bangos ilgio šaltinio efektyvumą ir stabilumą. Be to, prastėja ir paties nanosekundinio lazerio impulsų energinis stabilumas, kadangi mažėja vieno nanosekundinio impulso generacijai sukaupta užpildos apgrąža (sužadavimo energija). Parametrinio šviesos stiprinimo sąveika yra netiesinis procesas, todėl kaupinimo impulsų energijos nestabilumas pasireiškia dar didesniu parametriškai generuojamų impulsų energijos nestabilumu. Siekiant atstatyti blogėjančius derinamos spinduliuotės parametrus, reikėtų kelti kaupinančių impulsų intensyvumą proporcingai mažėjančiai impulsų energijai. Tai reiškia, kad, padidinus

impulsų pasikartojimo dažnį, pavyzdžiui 10 kartų, impulsų trukmę reikėtų sumažinti tiek pat – 10 kartų. Toks ženklus kaupinančio impulso trukmės sumažinimas, savo ruožtu, reikalauja tiek pat kartų sumažinti PŠO rezonatoriaus ilgį, kad nepasikeistų bendras sąveikos su netiesiniu kristalu ilgis. Šis priėjimas, galiausiai, pasidaro nepraktiškas. Nanosekundiniais lazeriais kaupinami parametrinio šviesos stiprinimo įrenginiai taip pat yra jautrūs šiluminiams reiškiniams dėl sugertos kaupinimo ir parametrinės spinduliuotės. Moduluotosios kokybės lazerių arba lazerių su rezonatoriaus iškrova nanosekundiniai impulsai pasižymi impulso laikinės gaubtinės amplitudės moduliacija dėl išilginių modų mušimo, kuri tarp impulsų neatsikartoja dėl rezonatoriaus ilgio svyravimų ir impulso atsiradimo iš triukšmų. Didelio impulsų pasikartojimo dažnio (1 kHz ir didesnio) nanosekundinių lazerių pluoštus tenka aštriai fokusuoti, norint užtikrinti efektyvią netiesinę sąveiką. Susidarantys temperatūriniai gradientai gali būti netiesinio kristalo sutrūkimo priežastimi.

Kita parametrinių šviesos osciliatorių klasė yra osciliatoriai, kurių kaupinimui naudojami vienos išilginės modos nanosekundiniai lazeriai, pasižymintys glotnia laikine impulso gaubtine. Šios derinamo bangos ilgio lazerinės sistemos pasižymi itin siaura spektrine linija ir geresniu stabilumu bei dirba saugesniu režimu, tačiau yra sudėtingesnės ir brangesnės.

Parametrinio šviesos generavimo ir stiprinimo sistemose taip pat naudojami ultratrumpųjų impulsų kaupinimo šaltiniai – sinchronizuotų modų lazeriai. Sinchronizuotų modų lazeriai generuoja nenutrūkstamas arba ilgas pikosekundinių arba femtosekundinių impulsų sekas. Impulsų pasikartojimo dažnis yra apspręstas lazerinio osciliatoriaus rezonatoriaus ilgio. Be papildomo stiprintuvo, generuojamų impulsų energijos yra mažos: skaidulinių osciliatorių – pikodžaulių (pJ) eilės, kietakūnių osciliatorių – nuo kelių iki kelių dešimčių nanodžaulių (nJ). Tipinės sinchronizuotų modų lazerių impulsų trukmės – nuo dešimčių femtosekundžių iki dešimčių pikosekundžių. Siekiant siauros parametrinės spinduliuotės spektrinės linijos, siauresnės nei 1 cm^{-1} , optimalu naudoti pikosekundinės trukmės kaupinimo impulsus ir papildomas spektro siaurinimo priemones PŠO rezonatoriuje. Parametriniuose šviesos osciliatoriuose kaupinimui naudojant ultratrumpuosius impulsus, itin trumpą parametrinės sąveikos laiką galima kompensuoti realizavus sinchroninį kaupinimą, kaip aprašyta, pavyzdžiui, H. M. van Driel, „Synchronously pumped optical parametric oscillators“, Applied Physics B 60, 411–420 (1995). Parametrinė spinduliuotė ir

kaupinimo impulsai turi tiksliai persikloti netiesiniame kristale. Tai reiškia, kad parametrinis impulsas, apėjęs PŠO rezonatorių, turi tiksliai sutapti su sekančiu kaupinimo sekos impulsu. PŠO rezonatoriaus apėjimo laiko suvienodinimas su impulsų periodu kaupinimo impulsų sekoje yra užtikrinamas derinant PŠO rezonatoriaus ilgį. (50–200) MHz kaupinimo impulsų pasikartojimo dažnis sąlygoja gan ilgą – nuo 0,75 iki 6 metrų – PŠO rezonatoriaus ilgį. Sinchroninio kaupinimo nuolatinės ir ilgos pikosekundinių impulsų sekos atveju rezonatoriaus ilgį reikia palaikyti kelių arba kelių dešimčių mikrometrų tikslumu. Techniškai, esant ilgam rezonatoriui, tai yra sudėtingas uždavinys. O visa kombinacija – kaupinimo lazeris ir sinchroniškai kaupinamas PŠO – pasižymi nemažais gabaritais ir dėl to yra jautrus išoriniams, šiluminiais ir mechaniniams, poveikiams.

Didesne impulso energija pasižymi lazeriniai osciliatoriai, dirbantys moduluotosios kokybės sinchronizuotų modų režimu. Toks osciliatorius išspinduliuoja nevienodos amplitudės impulsų seką, kuri visa arba jos dalis gali būti panaudojama PŠO kaupinti, kaip aprašyta P. J. Wegner ir M. D. Feit, „High-power narrow-band pulses with wavelengths tunable about $1.053\ \mu\text{m}$ from a synchronously pumped optical parametric oscillator”, Applied Optics 35, 890-902 (1996) straipsnyje ir JAV patente Nr. US9099837 (E. Miesak). Moduluotosios kokybės sinchronizuotų modų režimu veikiantis kaupinimo lazeris turi keletą trūkumų: stabiliam darbui užtikrinti paprastai reikia ne tik pasyvaus, bet ir aktyvaus optinio modulatoriaus; pikosekundinių impulsų amplitudė po gaubtine kinta plačiose ribose, tad parametrinė šviesos konversija vyksta tik su intensyviausiais impulsais. Didesnės energijos ir smailinės galios pikosekundinius kaupinimo impulsus galima gauti naudojant lazerinį stiprintuvą. Tačiau, jei yra naudojamas regeneracinis stiprintuvas, kurio stiprinimas siekia nuo 10^3 iki 10^6 kartų, kaupinimo impulsų pasikartojimo dažnis yra stipriai sumažinamas, pavyzdžiui, iki 1 kHz. Parametrinis šviesos osciliatoriaus rezonatorius tokiam kaupinimo impulsų pasikartojimo dažniui yra nerealizuojamas.

Tarptautinėje patentinėje paraiškoje Nr. WO2010136761 (D. T. Reid et al.) aprašytas daugialėkės veidrodžių sistemos, pavyzdžiui Herioto celės, panaudojimas parametrinio šviesos osciliatoriaus rezonatoriaus viduje tam, kad būtų padidintas rezonatoriaus optinis ilgis iki reikiamo ilgio sinchroniniam kaupinimui realizuoti ir kad būtų išlaikytas geometrinis PŠO kompaktiškumas. Tai leido panaudoti mažesnio nei įprasta dažnio kaupinimo impulsų šaltinį. Patentinėje paraiškoje pateiktuose

pavyzdžiuose kalbama apie 15 MHz kaupinimo impulsų šaltinį, kas, ko gero, yra praktinė riba tokiam sprendimui. Teoriškai numatyta galimybė panaudoti 1 MHz impulsų pasikartojimo dažnio kaupinimo šaltinį, t. y. PŠO rezonatoriaus optinis ilgis daugialėkėje veidrodžių sistemoje yra pailginamas iki 150 m, bet greičiausiai veidrodžių nuostoliai viršytų parametrinį stiprinimą.

Kitas sprendimas – parametrinio osciliatoriaus ir parametrinio stiprintuvo schema: lazerinio osciliatoriaus didelio dažnio (nuo 50 MHz iki 200 MHz) kaupinimo impulsų seka PŠO rezonatoriuje generuoja silpnus signalinės bangos impulsus, kurie vėliau yra stiprinami vienalėkiame arba dvilėkiame parametriniame šviesos stiprintuve. Kaip kaupinimas parametriniame stiprintuve naudojama mažesnio dažnio (1 kHz) kaupinimo impulsų seka iš regeneracinio stiprintuvo. Pasyviai sinchronizacijai užtikrinti minėtas regeneracinis stiprintuvas yra užkrečiamas to paties lazerinio osciliatoriaus impulsų seka. Žr., pavyzdžiui, G. R. Holtom et al., „High-repetition-rate femtosecond optical parametric oscillator-amplifier system near 3 μm ”, J. Opt. Soc. Am. B 12, 1723–1731 (1995).

Aukščiau minėtame E. Miesak patente pristatyta parametrinio osciliatoriaus ir parametrinio stiprintuvo schema, kurioje nėra regeneracinio stiprintuvo. Moduluotosios kokybės sinchronizuotų modų lazerinio osciliatoriaus impulsų sekos pradžia yra panaudojama parametriniam šviesos osciliatoriui kaupinti, o sekos pabaiga – parametriniam šviesos stiprintuvui kaupinti.

L.-J. He et al., „30.5- μJ , 10-kHz, picosecond optical parametric oscillator pumped synchronously and intracavity by a regenerative amplifier”, Optics Letters 43, 539-542 (2018) straipsnyje aprašyta didelės išėjimo impulsų energijos parametrinio šviesos stiprinimo lazerinė sistema, kurią sudaro Nd:YVO₄ sinchronizuotų modų lazeris, Nd:YAG regeneracinis stiprintuvas ir PŠO. Regeneracinis stiprintuvas ir PŠO turi bendrą rezonatoriaus atkarpą. Minėtoje bendroje atkarpoje yra patalpintas KTA netiesinis kristalas, todėl per jį keliauja regeneracinio stiprintuvo rezonatoriuje cirkuliuojantis impulsas. Regeneracinio stiprintuvo rezonatoriaus ilgis yra apskaičiuotas 1064 nm bangos ilgiui, o PŠO rezonatoriaus – 1,5 μm bangos ilgiui (signalinei bangai), taip, kad abiejų bangos ilgių fundamentinė skersinė moda būtų to paties dydžio. Regeneracinio stiprintuvo viduje yra Pokelso elementas ir ketvirčio bangos ilgio fazinė plokštelė 1064 nm bangos ilgiui, kurie atlieka osciliatoriaus impulsų retinimą. Iš 76 MHz dažnio osciliatoriaus impulsų sekos yra atrenkami 10 kHz dažniu

pasikartojantys impulsai, kurie uždaromi rezonatoriuje. Gana greitai 1064 nm bangos impulsų smailinė galia pasiekia tokią vertę, kad prasideda konversija į parametrinę spinduliuotę. Prasidėjus konversijai, 1064 nm bangos augimas sulėtėja (konvertuota energijos dalis prisideda prie regeneracinio stiprintuvo rezonatoriaus nuostolių). PŠO rezonatorių sudarantys veidrodžiai yra didelio atspindžio koeficiento signalinei bangai, todėl išėjimo impulsas yra išmetamas rezonatoriaus iškrovos būdu: PŠO rezonatoriaus viduje yra kitas Pokelso elementas, kuriam reikiamu momentu yra prijungiama ketvirčio bangos ilgio įtampa 1,5 μm bangos ilgiui; per du praėjimus spinduliuotės poliarizacija yra pasukama 90 laipsnių, ir ji per poliarizatorių išeina iš rezonatoriaus. Per vieną ciklą iš PŠO rezonatoriaus yra išmetamas vienas impulsas – tuo metu, kai jo energija yra didžiausia. Išėjime gaunama 10 kHz dažniu pasikartojančių impulsų seka, 7 ps trukmės impulsų energija 30 μJ , o spektro plotis apie 4 cm^{-1} . Pasiekta maždaug 4 MW smailinė galia; konversijos iš kaupinimo į signalinę bangą efektyvumas – 18 %. Tačiau kelių bangos ilgių efektyvus generavimas ar bangos ilgio tolygus derinimas nėra numatytas. Be to, minėtas sprendimas negali pasiūlyti metodo matomosios spektrinės srities bangos ilgių generavimui. Netiesinio kristalo įterpimas į regeneracinio stiprintuvo rezonatoriaus vidų sąlygoja greitą PŠO spinduliuotės evoliuciją, tačiau 1,5 μm spinduliuotės augimas turi gana aštrią evoliucijos viršūnę, o tai rodo jautrumą parametrų pasikeitimui ir kad gana greitai prasideda energijos konversija atgal į kaupinimo bangą. Bendra rezonatorių atkarpa leido sumažinti lazerinės sistemos dydį, bet tik labai nedaug. Pasirinktas gana standartinis 1,5 m rezonatorių optinis ilgis, tad bendra sistema nėra kompaktiška ir yra jautri išorės veiksniams. Apskritai, surištų rezonatorių sprendimas yra sudėtingesnis nei atskirų rezonatorių panaudojimas, nes negalima nepriklausomai stebėti kaupinimo šaltinio veikimo.

Artimiausi pagal techninę esmę yra sprendimai, kuriuose yra naudojami atskiri moduliai, o pikosekundinių kaupinimo impulsų šaltinis turi itin didelio impulsų pasikartojimo dažnio impulsų paketų formavimo pakopą. Turint didesnio nei 200 MHz dažnio kaupinimo impulsus, galima realizuoti trumpą sinchroniškai kaupinamo PŠO rezonatorių.

K. Wei et al., „Fiber laser pumped high power mid-infrared laser with picosecond pulse bunch output“, Optics Express 21, 25364-25372 (2013) straipsnyje aprašyta kompaktiška parametrinio šviesos stiprinimo lazerinė sistema, sudaryta iš skaidulinio kaupinimo impulsų šaltinio ir trumpo PŠO. Viduriniojoje infraraudonojoje

(sutrumpintai, Mid-IR) spektro srityje spinduliuojančio parametrinio šviesos osciliatoriaus geometrinis ilgis yra tik 12 cm, nes kaupinimo impulsų šaltinis tiekia itin didelio pasikartojimo dažnio pikosekundinių impulsų paketus. Kaupinimo impulsų šaltinis apima skaidulinį lazerinį osciliatorių ir impulsų paketų formavimo bei stiprinimo pakopas. Skaidulinis lazerinis osciliatorius generuoja 2,72 MHz pasikartojimo dažnio nuolatinę pikosekundinių užkrato impulsų seką. Impulsų paketų formavimo pakopa apima 3 skaidulines kilpas, kurių ilgiai yra surišti taip: antroji kilpa yra 2 kartus trumpesnė nei pirmoji, o trečioji kilpa – 2 kartus trumpesnė nei antroji. Iš kiekvieno osciliatoriaus impulso yra suformuojamas 13 impulsų paketas; impulsai paketo viduje pasikartoja antruoju maždaug 800 MHz pasikartojimo dažniu, kuris yra apspręstas trumpiausios skaidulinės kilpos ilgio. Po paketų suformavimo, jie dar buvo stiprinami dviejose skaidulinėse stiprinimo pakopose (stiprinimo faktorius lygus 1800). Minėtas impulsų paketų formavimo būdas neturi daug laisvės paketo profilio formavimui, be to, dėl netikslaus kilpų ilgio kai kurie impulsai suskyla į du impulsus, o impulsų pasikartojimo periodas yra neidentiškas. Taigi kaupinimo impulsų paketas nebuvo optimizuotas sinchroniniam PŠO kaupinimui. Naudojant ilgą (50 mm) periodiškai polintą magnio oksidu legiruatą ličio niobato kristalą (MgO:PPLN), kai kaupinimo spinduliuotės smailinė galia siekė 24 kW, pavyko gauti 1,4 kW smailinės galios spinduliuotę ties 3,45 μm bangos ilgiu. Konversijos iš kaupinimo spinduliuotės (1,067 μm) į šalutinę bangą (3,45 μm) efektyvumas neviršijo 10 %. Tai atitinka ne didesnę kaip 1,5 μJ išėjimo impulsų paketo energiją ir ne didesnę nei 75 nJ pavienių impulsų energiją. Kaupinimo galios padidinimas iki maksimalios nedavė parametriškai sugeneruotos spinduliuotės galios padidėjimo. Viena iš priežasčių – netiesinio kristalo kaitimas, kuris keičia kristalo parametrus ir gali būti kristalo sutrūkimo priežastimi. Antra priežastis – minėtas neoptimizuotos formos ir impulsų periodo kaupinimo impulsų paketas. Dar viena nepageidaujama kristalo kaitimo pasekmė, kuri pasireiškia jau prie vidutinių kaupinimo galių, kuomet dar nenukrenta efektyvumas – tai parametriškai sugeneruotos spinduliuotės spektro pločio didėjimas. Galiausiai, minėtas PŠO stabiliai dirbo tik tuomet, kai abu jo rezonatoriaus veidrodžiai buvo aukšto atspindžio koeficiento signalinei bangai. Tokiu atveju viduje cirkuliuoja visa signalinės bangos energija, kuri gerina parametrinio šviesos stiprinimo sąlygas. Norint išėjime turėti ir šalutinės, ir signalinės bangos spinduliuotę, rezonatoriaus galinis veidrodis turėtų būti dalinai pralaidus signalinei bangai. Sumažinus išėjimo veidrodžio atspindžio koeficientą iki 78 %, stabilaus veikimo gauti nepavyko. Taigi minėtas sprendimas nėra

pritaikytas keliems bangos ilgiams ar derinamo bangos ilgio spinduliuotei generuoti. Trūkumas, susijęs su impulsų paketų formavimu, gali būti ištaisytas metodu, aprašytu tarptautinėje patentinėje paraiškoje Nr. PCT/IB2019/058167 (padavimo data: 2019-09-26) ir straipsnyje T. Bartulevicius et al., „Active fiber loop for synthesizing GHz bursts of equidistant ultrashort pulses”, Optics Express 28, 13059-13067 (2020). Šiuo metodu galima suformuoti norimo ilgio, identiško impulsų periodo ir kontroliuojamos formos impulsų paketą. JAV patente Nr. US9531151 (D. Fuchs et al.) aprašytas kelių impulsų paketo formavimo būdas, apimantis regeneracinio stiprintuvo panaudojimą. Stiprintuvo elektro-optinis raktas, kuris valdo viduje cirkuliuojančio impulso poliarizaciją, yra valdomas įtampa, kuri turi kelias vertes. Pagal pirmą realizaciją iš regeneracinio stiprintuvo yra išleidžiamas trijų vienodos amplitudės impulsų paketas. Tai pavyksta padaryti tokiu būdu: kai regeneracinio stiprintuvo viduje cirkuliuojančio impulso energija pasiekia maksimumą, elektro-optinio rakto įtampa sumažinama iki vertės, kuri yra mažesnė nei ketvirčio bangos ilgio fazinio vėlinimo įtampa $U_{\lambda/4}$, bet didesnė nei 0V. Paskui įtampa yra tolygiai mažinama iki 0V. Pagal antrą realizaciją iš regeneracinio stiprintuvo yra išleidžiamas keturių nevienodos amplitudės impulsų paketas. Tai pasiekama parinkus kitokį įtampos profilį: elektro-optinio rakto įtampa sumažinama iki minėtos tarpinės vertės anksčiau nei stiprintuvo viduje cirkuliuojančio impulso energija pasiekia maksimumą, paskui tam tikrą laiko intervalą laikoma pastovi įtampa, ir tada išjungama. Dar vienas K. Wei et al. sprendimo trūkumas – žemesnis nei 10 % konversijos efektyvumas, nors buvo panaudotas kvazi-fazinio sinchronizmo netiesinis kristalas. Antra vertus, ne visa kaupinimo spinduliuotės galia buvo išnaudota, nes netiesinis kristalas pradėjo kaisti ir pasikeitė jo parametrai.

S. Cai et al., „High Conversion Efficiency, Mid-Infrared Pulses Generated via Burst-Mode Fiber Laser Pumped Optical Parametric Oscillator”, IEEE Access 8, 64725-64729 (2020) straipsnyje aprašyta dar viena kompaktiška Mid-IR parametrinio šviesos stiprinimo lazerinė sistema, sudaryta iš skaidulinio kaupinimo impulsų šaltinio ir trumpo PŠO. 1,1 GHz kaupinimo impulsų pasikartojimas dažnis leido naudoti itin trumpą (60 mm ilgio) PŠO rezonatorių, kurio viduje buvo 50 mm ilgio MgO:PPLN netiesinis kristalas. Kaupinimo impulsai tiekiami 100 kHz pasikartojančiais 220 ns trukmės impulsų paketais. Paketas suformuotas skaiduliniam kaupinimo šaltinyje esančiu moduliatoriumi, o 1,1 GHz dažnis – skaidulinių 50/50 daliklių ir vėlinimo linijų pagalba 8 kartus dauginant pradinį 138 MHz osciliatoriaus impulsų pasikartojimo

dažnį. Buvo pademonstruotas beveik 20 % konversijos iš $1,06\ \mu\text{m}$ į $3,8\ \mu\text{m}$ spinduliuotę (šalutinė banga) efektyvumas. Didelis efektyvumas siejamas su stačiu kaupinimo impulsų paketo priekiniu frontu. Tačiau, nors pavienio kaupinimo impulso energija buvo μJ eilės (o smailinė galia 10 kW), prireikė net 80 kaupinimo impulsų, kad konvertuoto bangos ilgio impulsų energija užaugtų, ir tik po to vyko stabili parametrinės spinduliuotės generacija. Gauta maždaug 1 kW šalutinės bangos spinduliuotės smailinė galia ir $0,1\ \mu\text{J}$ pavienio impulso energija, o spektro plotis $\sim 7\ \text{cm}^{-1}$. PŠO rezonatoriaus veidrodžiai pilnai atspindėjo signalinę bangą ir pilnai praleido šalutinę bangą, t. y. buvo optimizuotas vienam bangos ilgiui generuoti. Norint išėjime turėti ir šalutinės, ir signalinės bangos spinduliuotę, rezonatoriaus galinis veidrodis turėtų būti dalinai pralaidus signalinei bangai. Tai sumažintų rezonatoriaus viduje cirkuliuojančios signalinės bangos energijos dalį ir pablogintų parametrinio šviesos stiprinimo sąlygas. Apibendrinant, minėtas sprendimas nėra pritaikytas keliams bangos ilgiams ar derinamo bangos ilgio spinduliuotei generuoti.

Panašūs sprendimai aprašyti ir kituose straipsniuose. Pavyzdžiui, Y. Wu et al., „Compact picosecond mid-IR PPLN OPO with controllable peak powers“, OSA Continuum 3, 2741-2748 (2020) aprašyta derinamo bangos ilgio sistema su galimybe valdyti smailinę galią. Mid-IR parametrinio šviesos stiprinimo lazerinė sistema buvo sudaryta iš hibridinio kaupinimo impulsų šaltinio ir kompaktiško PŠO. Kaupinimo impulsų paketai sugeneruojami taip: startuojama nuo 1,5 GHz impulsų pasikartojimo dažnio lazerinio diodo, paskui elektrooptiniu modulatoriumi (1 MHz) formuojami impulsų paketai ir stiprinama trijuose iterbio jonų skaiduliniuose stiprintuvuose. Dėl didelio osciliatoriaus impulsų pasikartojimo dažnio, jo didinti nebuvo būtinybės. 40 mm ilgio PPLN netiesinis kristalas buvo patalpintas 15 cm geometrinio ilgio dviejų veidrodžių PŠO rezonatoriuje, kuris atitiko sub-harmoninio sinchroninio kaupinimo sąlygą, t. y. du kartus ilgesnis negu apibrėžia kaupinimo impulsų periodas. Dėl to vienu metu PŠO rezonatoriuje keliauja du signalinės bangos impulsai. Kadangi netiesinis kristalas patalpinamas rezonatoriaus centre, tai kaupinimo impulsas persikloja ir su keliaujančiu pirmyn signalinės bangos impulsu, ir su keliaujančiu atgal. Dviejų signalinės bangos impulsų persiklojimas, neabejotinai, pagerina parametrinio šviesos stiprinimo sąlygas ir pagreitina parametrinės spinduliuotės išsivystymą. Kita greito išsivystymo priežastis – status kaupinimo impulsų paketų frontas (tiek, kiek leido elektro-optinis modulatorius). Pasiiekta 1,2 kW maksimali smailinė galia, kuomet

kaupinimo impulsų paketas buvo 25 ns trukmės ir kaupinimo impulsų smailinė galia buvo didžiausia (90 kW). Konversijos efektyvumas iš kaupinimo ($1,04\text{ }\mu\text{m}$) spinduliuotės į šalutinę bangą siekė 20 %. Didinant kaupinimo impulsų paketų trukmę, kaupinimo impulsų smailinė galia mažėjo, todėl mažėjo ir parametrinės spinduliuotės smailinė galia, o konversijos efektyvumas išliko panašus. PPLN netiesinis kristalas turėjo 5 sritis su skirtingais polinimo periodais, kurie leido generuoti penkias siauras, maždaug 1 cm^{-1} pločio, spektrines linijas šalutinės bangos derinimo srityje nuo 2260 nm iki 3573 nm. Tačiau diskretinės periodiškai polinto netiesinio kristalo gardelių sritys neleido atlikti tolygaus bangos ilgio derinimo, o signalinės bangos spinduliuotės išvedimas iš rezonatoriaus nebuvo numatytas.

Derinamo bangos ilgio spinduliuotei VIS-NIR spektro srityje gauti optimalu naudoti BBO kristalus, o jų kaupinimui – antrą, trečią arba ketvirtą harmoniką nuo $1\text{ }\mu\text{m}$ lazerio fundamentinio bangos ilgio. Siauresnei kaupinimo spinduliuotės spektrinei juostai gauti ir didelei energijai pasiekti labiausiai tinka Nd jonais legiruočių kietakūnių aktyviųjų terpių stiprintuvai. Didelė impulso energija ir smailinė galia užtikrina gerą konversiją harmonikų modulyje, o paskui ir parametriniame šviesos osciliatoriuje.

Apibendrinant, aptartuose žinomuose sprendimuose sistemos, tiekiančios mikrodžaulių lygio energijos ir $>10\text{ kW}$ smailinės galios derinamo bangos ilgio pikosekundinius išėjimo impulsus, nėra kompaktiškos. Sprendimuose be lazerinio ar parametrinio stiprintuvo sistemos yra labiau kompaktiškos, tačiau pavienių išėjimo impulsų energijos yra mažesnės nei $1\text{ }\mu\text{J}$, o smailinė galia $<10\text{ kW}$. Be to, sprendimuose, kur kaupinimo šaltiniai yra silpni, paprastai reikalingi kvazi-fazinio sinchronizmo (periodiškai polinti) netiesiniai kristalai, tačiau šie pasižymi didele kaina ir žemu pažeidimo slenksčiu. Nei vienas iš minėtų sprendimų negali pasiūlyti (1–10) kHz impulsų pasikartojimo dažnio derinamo bangos ilgio didelio efektyvumo ir stabilumo lazerinio šaltinio VIS-NIR spektroskopijai.

Išradimu siekiama sukurti lazerį, skirtą VIS-NIR spektroskopijai, kuris tenkintų šiuos reikalavimus:

- būtų kompaktiškas, lengvai aptarnaujamas ir stabilus;
- bangos ilgis būtų tolygiai derinamas plačiame matomojo ir/arba artimojo infraraudonojo spektro diapazone;
- impulsų paketų pasikartojimo dažnis ne mažesnis kaip 0,5 kHz, geriau – ne

mažesnis kaip 2 kHz; prioritetiškai – ne mažesnis kaip 10 kHz; arba valdomas pagal poreikį (0,5–10) kHz ribose;

- visame derinimo diapazone spektro plotis ne didesnis nei 10 cm^{-1} , geriau – ne didesnis nei 8 cm^{-1} , prioritetiškai – ne didesnis nei 3 cm^{-1} ;

- konversijos iš kaupinimo spinduliuotės į parametrinę spinduliuotę efektyvumas bent 10 % visame derinimo diapazone;

- impulsų paketų energija ne mažesnė kaip $5\text{ }\mu\text{J}$, o pavienių impulsų – $1\text{ }\mu\text{J}$ eilės, visame derinimo diapazone;

- išėjimo spinduliuotės smailinė galia (10–100) kW ribose su galimybe sumažinti, jeigu reikia;

- greitas bangos ilgio derinimas;

- gera lazerinio pluošto kokybė.

Išradimo esmė

Pirmame šio išradimo konstrukciniame variante derinamo bangos ilgio impulsinės lazerinės spinduliuotės šaltinis VIS-NIR spektroskopijai yra sudarytas iš kaupinimo impulsų šaltinio ir parametrinio šviesos osciliatoriaus. Kaupinimo impulsų šaltinis apima: 1) lazerinį osciliatorių, generuojantį nuolatinę pikosekundinių užkrato impulsų seką, apibūdinamą pirmuoju pasikartojimo dažniu f_1 ribose nuo 10 kHz iki 100 MHz; 2) impulsų paketų formavimo ir stiprinimo modulį, kuris tiekia kaupinimo impulsų paketų seką, kur kiekvienas minėtas kaupinimo impulsų paketas yra sudarytas iš pikosekundinių kaupinimo impulsų, pasikartojančių antruoju pasikartojimo dažniu f_2 , didesniu nei minėtas pirmasis pasikartojimo dažnis f_1 , ir kuris yra ribose nuo 200 MHz iki 2 GHz, o laiko tarpas tarp gretimų kaupinimo impulsų paketų atitinka trečiąjį pasikartojimo dažnį f_3 , kuris yra mažesnis už antrąjį pasikartojimo dažnį f_2 ir mažesnis arba lygus pirmajam pasikartojimo dažniui f_1 . Parametrinis šviesos osciliatorius apima: 1) bent vieną parametrinio šviesos stiprinimo netiesinį kristalą, patalpintą optiniame rezonatoriuje; netiesiniame kristale iš vieno kaupinimo λ_P bangos ilgio spinduliuotės fotono yra sugeneruojami du mažesnės energijos fotonai: λ_S bangos ilgio signalinės bangos fotonas ir λ_I bangos ilgio šalutinės bangos fotonas; 2) bent du veidrodžius, suformuojančius minėtą optinį rezonatorių, kurio ilgis L_2 . Kaupinimo impulsų šaltinis ir parametrinis šviesos osciliatorius tarpusavyje yra suderinti taip, kad parametrinio

šviesos osciliatoriaus rezonatoriaus apėjimo laikas yra lygus laiko tarpui $1/f_2$ tarp gretimų kaupinimo impulsų. Parametrinis šviesos osciliatorius tiekia išėjimo impulsų paketų seką, kur kiekvienas minėtas išėjimo impulsų paketas yra sudarytas iš pikosekundinių signalinės ir/arba šalutinės bangos impulsų. Impulsų paketų formavimo ir stiprinimo modulio sudėtyje yra kietakūnis regeneracinis stiprintuvas, kurio rezonatoriaus viduje yra vienas arba du optiniai raktai. Jungiant įtampą ant abiejų arba vieno iš optinių raktų, užkrato impulsai, tarpusavyje nutolę intervalu $1/f_3$, yra uždaromi regeneracinio stiprintuvo rezonatoriaus viduje. Optinių raktų įtampos jungimo momento t_0 tikslumas užtikrina geresnį nei 1 % išėjimo impulsų energijos stabilumą. Laiko momentu t_1 išjungiant įtampą ant vieno iš optinių raktų arba sumažinant įtampą ant abiejų arba vieno iš optinių raktų, laiko intervalui Δt , kuris yra ilgesnis negu rezonatoriaus apėjimo laikas, sukuriamas dalinis regeneracinio stiprintuvo rezonatoriaus pralaidumas, ir išmetama dalis rezonatoriaus viduje cirkuliuojančio impulso energijos. Kaupinimo impulsų paketų trukmė yra lygi minėtam laiko intervalui Δt . Trečiasis pasikartojimo dažnis f_3 yra ribose nuo 500 Hz iki 10 kHz. Kiekviename kaupinimo impulsų pakete yra nuo 7 iki 15 iš eilės einančių kaupinimo impulsų, kurių smailinė galia viršija 800 kW, o suminė kiekvieno kaupinimo impulsų paketo energija yra ne mažesnė kaip 300 μ J. Kaupinimo impulsų spektro plotis neviršija 1 cm^{-1} , o trukmė yra nuo 15 ps iki 70 ps. Minėtas bent vienas parametrinio šviesos stiprinimo netiesinis kristalas pasižymi plačia derinimo juosta parametrinio šviesos stiprinimo sąveikai ties kaupinimo lazerio spinduliuotės bangos ilgiu λ_p . Visame derinimo diapazone konversijos iš kaupinimo impulsų paketų sekos į išėjimo impulsų paketų seką efektyvumas yra ne mažesnis kaip 10 %, ir kiekviename išėjimo impulsų pakete yra nuo 5 iki 10 iš eilės einančių išėjimo impulsų, kurių smailinė galia viršija 10 kW. Išėjimo impulsų spektro plotis neviršija 10 cm^{-1} . Kaupinant artimojo infraraudonojo diapazono lazerio spinduliuote arba jo harmonikų spinduliuote, bangos ilgio derinimo diapazonas perdengia matomąją ir artimąją infraraudonąją spektro sritį.

Pranašumą turinčiame šio išradimo šaltinio išpildyme pagal pirmą konstrukcinį variantą minėto regeneracinio stiprintuvo rezonatoriuje yra vienas elektro-optinis raktas, valdomas dviejų lygių įtampos signalu $U_3(t)$, o regeneracinio stiprintuvo rezonatoriaus dalinio pralaidumo jungimo laiko momentas t_1 yra tuomet, kai rezonatoriaus viduje cirkuliuojančio impulso energija pasiekia 1 μ J lygį.

Kiti pranašumų turintys šio išradimo šaltinio išpildymai išvardinti žemiau.

Impulsų paketų formavimo ir stiprinimo modulio sudėtyje taip pat yra kietakūnis tiesinis stiprintuvas, ir regeneracinio stiprintuvo bei tiesinio stiprintuvo bendras stiprinimo faktorius yra ne mažesnis kaip 10^4 . Lazerinis osciliatorius yra kietakūnis Nd:YVO₄ arba Nd:YAG sinchronizuotų modų osciliatorius, generuojantis (1–10) nJ energijos pikosekundinius impulsus, kurių pasikartojimo dažnis f_1 lygus 80 MHz, regeneracinis stiprintuvas yra Nd:YVO₄ arba Nd:YAG terpės regeneracinis stiprintuvas, kurio suformuotų paketų energija viršija 20 μ J, kai f_3 lygus 10 kHz, o tiesinis stiprintuvas yra Nd:YVO₄ arba Nd:YAG terpės vienalėkis arba dvilėkis stiprintuvas, kurio paketų energija viršija 1 mJ, kai f_3 lygus 10 kHz. Bangos ilgių pora λ_s , λ_l , kuri yra sugeneruojama parametrinės sąveikos metu, yra keičiama: 1) sukant minėtą bent vieną parametrinio šviesos stiprinimo netiesinį kristalą jo optinės ašies atžvilgiu, 2) keičiant netiesinio kristalo temperatūrą arba 3) keičiant spektrą selektuojančio elemento pralaidumo arba atspindžio bangos ilgį. Kaupinimo spinduliuotės pluoštas sklinda kolineariai parametrinio šviesos osciliatoriaus rezonatoriaus ašiai, minėtas bent vienas parametrinio šviesos stiprinimo netiesinis kristalas yra du kristalai, parinkti iš BBO, BIBO, LBO, KTA, KTP, MgO:LiNbO₃, ZnO:LiNbO₃ ar kitų VIS-NIR srityje skaidrių netiesinių kristalų; bangos ilgio derinimas yra atliekamas simetriškai sukant abu parametrinio šviesos stiprinimo netiesinius kristalus į priešingas puses kristalų optinių ašių atžvilgiu ir/arba keičiant kristalų temperatūrą. Kaupinimo spinduliuotės bangos ilgis yra ribose nuo 250 nm iki 1340 nm. Išėjimo spinduliuotės derinimo diapazonas yra ribose nuo 395 nm iki 2600 nm arba ribose nuo 1350 nm iki 5000 nm. Išėjimo impulsų spektro plotis spektro plotis neviršija 3 cm^{-1} .

Dar viename pranašumą turinčiame šio išradimo šaltinio išpildyme išėjimo impulsų spektro plotis spektro plotis neviršija 3 cm^{-1} .

Dar viename pranašumų turinčiame šio išradimo šaltinio išpildyme tiekiamų kaupinimo impulsų paketų trukmė pusės amplitudės aukštyje yra (5–10) ns ribose, o minėtų kaupinimo impulsų, kurių smailinė galia viršija 800 kW, amplitudė skiriasi ne daugiau nei 20 %. Vienas veidrodis iš minėtų bent dviejų veidrodžių, kurie suformuoja parametrinio šviesos osciliatoriaus optinį rezonatorių, yra dalinai pralaidus signalinės bangos ilgiui λ_s ir visiškai pralaidus šalutinės bangos ilgiui λ_l . Minėtas parametrinio šviesos osciliatoriaus rezonatoriaus apėjimo laiko suderinimas su laiko tarpu $1/f_2$ tarp gretimų kaupinimo impulsų yra atliekamas paderinant parametrinio šviesos osciliatoriaus rezonatoriaus ilgį L_2 arba regeneracinio stiprintuvo rezonatoriaus ilgį L_1 .

Bangos ilgio derinimo metu sukant bent vieną parametrinio šviesos stiprinimo netiesinį kristalą jo optinės ašies atžvilgiu arba keičiant netiesinio kristalo temperatūrą, yra paderinamas parametrinio šviesos osciliatoriaus rezonatoriaus ilgis L_2 , ilgio paderinimas atliekamas pagal didžiausią išėjimo spinduliuotės vidutinės galios vertę.

Antrame šio išradimo konstrukciniame variante derinamo bangos ilgio impulsinės lazerinės spinduliuotės šaltinis VIS-NIR spektroskopijai yra sudarytas iš kaupinimo impulsų šaltinio ir parametrinio šviesos osciliatoriaus, kur minėtas kaupinimo impulsų šaltinis apima: 1) lazerinį osciliatorių, kuris gali generuoti pikosekundinius užkrato impulsus dažniu ribose nuo 0,5 kHz iki 500 MHz, 2) impulsų paketų formavimo ir stiprinimo modulį, kuris tiekia kaupinimo impulsų paketų seką, kur kiekvienas minėtas kaupinimo impulsų paketas yra sudarytas iš pikosekundinių kaupinimo impulsų, pasikartojančių dažniu f_2 iš intervalo nuo 200 MHz iki 2 GHz, bet didesniu nei lazerinio osciliatoriaus impulsų pasikartojimo dažnis, o laiko tarpai T_1 , T_2 tarp gretimų kaupinimo impulsų paketų yra lygūs arba didesni už laiko intervalą tarp gretimų minėto lazerinio osciliatoriaus impulsų. Minėtas parametrinis šviesos osciliatorius apima: bent du veidrodžius, kurie suformuoja optinį rezonatorių ir bent vieną parametrinio šviesos stiprinimo netiesinį kristalą, patalpintą minėtame optiniame rezonatoriuje. Kaupinimo impulsų šaltinis ir parametrinis šviesos osciliatorius tarpusavyje yra suderinti taip, kad parametrinio šviesos osciliatoriaus rezonatoriaus apėjimo laikas yra lygus laiko tarpui $1/f_2$ tarp gretimų kaupinimo impulsų. Parametrinis šviesos osciliatorius tiekia išėjimo impulsų paketų seką, kur kiekvienas minėtas išėjimo impulsų paketas yra sudarytas iš pikosekundinių signalinės ir/arba šalutinės bangos impulsų. Minėto impulsų paketų formavimo ir stiprinimo modulio sudėtyje yra kietakūnis regeneracinis stiprintuvas, turintis vieną arba du optinius raktus, kurie pasirinktam laiko intervalui Δt sukuria dalinį rezonatoriaus pralaidumą ir taip suformuoja impulsų paketus. Kaupinimo impulsų paketų trukmė pusės amplitudės aukštyje yra (5–10) ns ribose, o minėti laiko tarpai T_1 , T_2 tarp gretimų kaupinimo impulsų paketų yra lygūs arba didesni nei 100 μ s. Kiekviename kaupinimo impulsų pakete yra nuo 7 iki 15 iš eilės einančių kaupinimo impulsų, kurių smailinė galia viršija 800 kW, o amplitudė skiriasi ne daugiau nei 20 %. Kiekvieno kaupinimo impulsų paketo suminė energija yra ne mažesnė kaip 300 μ J, kaupinimo impulsų spektro plotis neviršija 1 cm^{-1} , o trukmė yra (15–70) ps ribose. Minėtas bent vienas parametrinio šviesos stiprinimo netiesinis kristalas pasižymi plačia derinimo juosta parametrinio

šviesos stiprinimo sąveikai ties kaupinimo lazerio spinduliuotės bangos ilgiu λ_P . Kiekviename išėjimo impulsų pakete yra nuo 5 iki 10 iš eilės einančių išėjimo impulsų, kurių smailinė galia viršija 10 kW. Išėjimo impulsų spektro plotis neviršija 10 cm^{-1} , o bangos ilgis yra tolygiai derinamas matomoje ir/arba artimojoje infraraudonojoje spektro srityje.

Pranašumą turinčiame šio išradimo šaltinio išpildyme pagal antrą konstrukcinį variantą impulsų paketų formavimo ir stiprinimo modulio sudėtyje taip pat yra kietakūnis tiesinis stiprintuvas ir harmonikų generavimo įrenginys, kur regeneracinio stiprintuvo ir tiesinio stiprintuvo bendras stiprinimo faktorius yra ne mažesnis kaip 10^4 , o harmonikų generavimo įrenginio efektyvumas viršija 25 %. Išėjimo spinduliuotės bangos ilgis yra derinamas diapazone nuo 395 nm iki 2600 nm.

Išradimo naudingumas

Šio išradimo derinamo bangos ilgio lazerinis šaltinis pasižymi didesniu konversijos efektyvumu, lyginant jį su parametriniais šviesos įrenginiais, kuriuose kaupimui yra panaudojami nanosekundiniai impulsai. Antra vertus, dėl didesnės kaupinimo smailinės galios, galima turėti tą patį parametrinės sąveikos efektyvumą, tačiau dirbti saugesniame režime ir/arba pasiekti didesnį pasikartojimo dažnį. Lyginant su parametriniais šviesos įrenginiais, kuriuose kaupimui yra panaudojami ultratrumpieji impulsai, šio išradimo lazerinis šaltinis yra labiau kompaktiškas. GHz eilės impulsų pasikartojimo dažnis sąlygoja keliasdešimties centimetrų dydžio geometrinį PŠO rezonatoriaus ilgį, tad reikalavimai ilgio stabilumui žymiai sumažėja. Galima toleruoti 1 mm rezonatoriaus pailgėjimą. Visa kombinacija – kaupinimo lazeris ir sinchroniškai kaupinamas PŠO – taip pat yra gana kompaktiška, nes ir regeneracinio stiprintuvo rezonatorius yra trumpas. Bendras lazerinės sistemos gabaritas yra labai svarbus integruojant į analitinius prietaisus.

Kadangi stiprinimas vyksta kietakūniuose lazeriniuose stiprintuvuose, pasiekiamos didelės kaupinimo impulsų energijos. Pirma, tai leidžia naudoti harmonikų modulį, kuris praplečia derinimo diapazono ribas į matomąją spektrinę sritį, antra, PŠO rezonatoriuje galima naudoti įprastus tūrinius netiesinius kristalus. Galima suformuoti kaupinimo impulsų paketus, kuriuose yra ne mažiau kaip 7 iš eilės einantys impulsai, kurių smailinė galia viršija 500 kW, prioritetiškai $>800\text{ kW}$. Be to, didelė smailinė kaupinimo impulsų galia ne tik užtikrina mikrodžaulių eilės parametriškai sugeneruotos spinduliuotės pavienių impulsų energiją plačiame derinimo diapazone, bet yra ir

priemonė parametrinės sąveikos efektyvumui ir stabilumui užtikrinti.

Apskritai, kaupinimas paketais duoda gerą vidutinės ir smailinės galios santykį, dėl ko netiesiniai kristalai gali dirbti didesniame dažnyje be pažeidimo. Dažnio padidėjimas paketų formavimo būdu gerina bendrą sistemos energinį efektyvumą. Kaupinimo impulsų paketo gaubtinė gali būti įvairi. Ji yra valdoma parenkant regeneracinio stiprintuvo dalinio atidarymo pradžią, trukmę ir lygį. Galima pasiekti, kad gaubtinė būtų panaši į stačiakampį nanosekundinį impulsą ir intensyviausių impulsų amplitudės variacija neviršytų 20 %. Dėl šio išradimo metu naudojamo paketų formavimo būdo, net ir pakitus regeneracinio stiprintuvo rezonatoriaus ilgiui, kaupinimo impulsų paketuose neatsiranda neprognozuojamų impulsų amplitudės fluktuacijų, pavojingų netiesiniam kristalui. O status kaupinimo impulsų paketų priekinis frontas lemia žemą generacijos slenkstį ir greitą parametrinės spinduliuotės išsivystymą.

Naudojant siaurajuostas aktyvias terpes osciliatoriuje ir stiprintuvuose ir/arba spektro siaurinio priemonės parametriniame šviesos osciliatoriuje, užtikrinama siaura spektrinė linija. Parametrinį šviesos osciliatorių kaupinant kelių atvirkštinių centimetrų spektro pločio pikosekundiniais impulsais, visame derinimo diapazone galima užtikrinti generuojamos derinamo bangos ilgio spinduliuotės spektro plotį mažesnį nei 10 cm^{-1} . Tūrinių kristalų arba jų porų naudojimas užtikrina mažesnę sistemos kainą, ilgaamžiškumą, tolygų kampinį arba temperatūrinį derinimą ir aukštą išėjimo pluošto kokybę.

Trumpas brėžinių aprašymas

Fig.1A–1B – blokinės schemos, iliustruojančios esminius šio išradimo lazerinio šaltinio bruožus.

Fig.2 – impulsų paketų formavimo ir stiprinimo modulio principinė schema.

Fig.3 – prioritetinis impulsų paketų formavimo ir stiprinimo modulio išpildymas.

Fig.4 – regeneracinio stiprintuvo, esančio paketų formavimo ir stiprinimo modulyje pagal Fig.3, optinė schema.

Fig.5 – dviejų lygių įtampos signalo $U_3(t)$ iliustracija ir valdiklių prijungimo prie elektro-optinio rakto schema.

Fig.6A–6D – impulsų paketo regeneracinio stiprintuvo išėjime modeliavimo rezultatai.

Fig.7A–7C – įvairios sinchroniškai kaupinamo parametrinio šviesos osciliatoriaus realizacijos.

Fig.8 – dar vienas prioritetinis impulsų paketų formavimo ir stiprinimo modulio išpildymas.

Fig.9 – blokinė schema, vaizduojanti šio išradimo lazerinio šaltinio antrą konstrukcinį variantą.

Tinkamiausi išradimo realizavimo pavyzdžiai

Fig.1A–1B blokinės schemos iliustruoja esminius šio išradimo lazerinio šaltinio bruožus. Šaltinį sudaro kaupinimo impulsų šaltinis 1 ir sinchroniškai kaupinamas parametrinis šviesos osciliatorius (PŠO) 2. Kaupinimo impulsų šaltinis 1 yra sudarytas iš lazerinio osciliatoriaus 3 ir impulsų paketų formavimo ir stiprinimo modulio 4. Lazerinis osciliatorius 3 generuoja nuolatinę pikosekundinių užkrato impulsų 5–10 seką 11. Impulsų pasikartojimo dažnis f_1 sekoje 11 yra nuo 10 kHz iki 100 MHz. Kaupinimo impulsų šaltinis 1 tiekia kaupinimo impulsų paketų 12, 13 seką 14. Kiekvienas kaupinimo impulsų paketas 12, 13 yra sudarytas iš pikosekundinių impulsų 15–17, 18–20. Impulsai paketo viduje pasikartoja dideliu nuo 200 MHz iki 2 GHz pasikartojimo dažniu f_2 , o paketų pasikartojimo dažnis f_3 yra nuo 500 Hz iki 10 kHz. Kaupinimo impulsų paketų 12, 13 trukmė yra nuo 5 ns iki 10 ns (pilnas plotis pusės amplitudės aukštyje), ir kiekviename pakete yra ne mažiau kaip penki iš eilės einantys kaupinimo impulsai, kurių energija viršija 10 μ J. Suminė kiekvieno kaupinimo impulsų paketo 12, 13 energija yra ne mažesnė kaip 300 μ J.

Parametrinis šviesos osciliatorius 2 yra sudarytas iš bent dviejų veidrodžių, suformuojančių optinį rezonatorių, kurio viduje yra vienas ar daugiau netiesinių kristalų, pasižyminčių parametriniu šviesos stiprinimu kaupinimo spinduliuotei. Netiesiniame parametrinio šviesos stiprinimo netiesiniame kristale ar kristaluose iš vieno kaupinimo λ_P bangos ilgio spinduliuotės fotono yra sugeneruojami du mažesnės energijos fotonai: λ_S bangos ilgio signalinės bangos fotonas ir λ_I bangos ilgio šalutinės bangos fotonas. Yra galimos kelios parametrinio šviesos osciliatoriaus 2 realizacijos:

- rezonatoriaus ilgis yra lygus sveikam signalinės bangos ilgių λ_S skaičiui (sakoma, tenkinama rezonanso sąlyga signalinei bangai), ir vienas iš veidrodžių yra dalinai pralaidus signalinei bangai ir dalinai arba visiškai pralaidus šalutinei bangai;
- rezonatoriaus ilgis yra lygus sveikam šalutinės bangos ilgių λ_I skaičiui

(sakoma, tenkinama rezonanso sąlyga šalutinei bangai), ir vienas iš veidrodžių yra dalinai pralaidus šalutinei bangai ir dalinai arba visiškai pralaidus signalinei bangai;

- rezonatoriaus ilgis yra kartotinis ir λ_s , ir λ_l , o veidrodžiai yra dalinai pralaidūs abiem arba vienai iš bangų.

Parametrinio šviesos osciliatoriaus 2 rezonatoriaus apėjimo laikas yra lygus laiko tarpui $1/f_2$ tarp gretimų kaupinimo impulsų 15, 16, taip užtikrinant sinchroninio kaupinimo sąlygą. Kadangi užkrato spinduliuotės nėra, kiekvieno kaupinimo impulsų paketo 12, 13 pirmasis impulsas 15 ir 18, atitinkamai, stiprina tik kvantinius triukšmus, t. y. vyksta spontaninė parametrinė fluorescencija. Parametrinio šviesos stiprinimo metu sugeneruotos signalinės ar šalutinės bangos spinduliuotės dalis, liekanti cirkuliuoti rezonatoriuje, ir kuriai tenkinama rezonanso sąlyga, tampa užkrato spinduliuote kitame PŠO rezonatoriaus apėjime, kuomet į PŠO netiesinį kristalą atkeliauja sekantis kaupinimo impulsas. Kaupinimo impulsas po vieno lėkio arba dviejų lėkių per netiesinį kristalą yra išmetamas iš PŠO rezonatoriaus.

Pradžioje galios konversijos efektyvumas iš kaupinimo spinduliuotės į signalinės ir šalutinės bangos spinduliuotę yra labai mažas. Vėliau prasideda eksponentinis galios augimas. Pasibaigus kaupinimo impulsų paketui, sekančiame rezonatoriaus apėjime parametrinis šviesos stiprinimas nebevyksta, tačiau iš PŠO 2 rezonatoriaus vis dar išeina viduje cirkuliuojančio impulso dalis. Todėl kaupinimo impulsų paketo 12 paskutinio impulso 17 sugeneruotas signalinės arba šalutinės bangos impulsas 21 nėra paskutinis išėjimo impulsų paketo 22 impulsas.

Iš parametrinio šviesos osciliatoriaus 2 išeina išėjimo impulsų paketų 22, 23 seka 24, kur kiekvienas išėjimo impulsų paketas 22, 23 yra sudarytas iš pikosekundinių signalinės ir/arba šalutinės bangos impulsų 25–27 ir 28–30, atitinkamai. Išėjimo impulsų paketų 22, 23 trukmė yra nuo 3 ns iki 8 ns (pilnas plotis pusės amplitudės aukštyje).

Esminis šio išradimo šaltinio bruožas – didelės energijos nanosekundinės trukmės kaupinimo impulsų paketas su pikosekundinių impulsų užpilda. Pikosekundinė kaupinimo impulso trukmė lemia didelę smailinę galią, dėl kurios žymiai padidėja parametrinės sąveikos stiprumas. Taigi nanosekundinis kaupinimo impulsų paketas, sudarytas iš pikosekundinių impulsų, lemia aukštesnį galios konversijos efektyvumą, jei lyginsime su PŠO, kaupinamu tos pačios trukmės ir energijos nanosekundiniu

impulsu.

Dar vienas šio išradimo šaltinio bruožas – nanosekundinis kaupinimo impulsų paketas yra sudarytas iš panašių pagal amplitudę pikosekundinių impulsų. Tai įgalina siekti parametrinės sąveikos efektyvumo, neviršijant PŠO komponentų pažeidimo slenksčio. Prioritetiniame šio išradimo išpildyme f_3 lygus 10 kHz, o kaupinimo impulsų paketuose 12, 13 yra nuo 5 iki 15 iš eilės einančių impulsų, kurių smailinė galia viršija 800 kW, o amplitudė skiriasi ne daugiau kaip 20 %.

Lazerinis osciliatorius 3 gali būti pasirinktas iš didelio skaičiaus rinkoje esančių mažos energijos – pJ arba nJ eilės – impulsinių šaltinių. Tai gali būti didelio impulsų pasikartojimo dažnio ir mažos energijos skaiduliniai arba kietakūniai sinchronizuotų modų lazeriai arba lazeriniai diodai. Tipinių skaidulinių osciliatorių generuojamų impulsų energijos yra pJ lygyje, o impulsų pasikartojimo dažnis – nuo kelių dešimčių MHz iki kelių GHz. Kietakūnių laisvos erdvės lazerinių osciliatorių, tokių kaip Nd:YVO₄, Nd:YAG, Nd:YAP, Nd:KGW, ir t. t. ar plačiauJosčių Yb:YAG, Yb:KGW, Yb:CALGO impulsų energijos paprastai viršija 1 nJ. Standartinių kietakūnių lazerinių osciliatorių impulsų pasikartojimo dažnis yra kelių dešimčių MHz eilės. (80–100) MHz yra tipinis komercinių kietakūnių sinchronizuotų modų lazerių, išduodančių nuolatinę stabilios amplitudės impulsų seką, impulsų pasikartojimo dažnis. Pagal vieną iš šio išradimo realizacijų, impulsų pasikartojimo dažnis f_1 sekoje 11 lygus 80 MHz, o kiekvieno impulso 5–10 energija yra apie 15 nJ. Tokių parametrų osciliatoriaus generuojamų impulsų spektro plotis yra maždaug 0,1 nm ties 1064 nm bangos ilgiu, arba – $\sim 1 \text{ cm}^{-1}$. Tarp galimų lazerinių osciliatorių, kurie galėtų būti panaudoti kaip šio išradimo šaltinio lazerinis osciliatorius 3, yra ir puslaidininkiniai lazeriniai diodai, išspinduliuojantys siauro spektro spinduliuotę, o impulsų pasikartojimo dažnių diapazonas yra nuo kelių šimtų Hz iki kelių šimtų MHz.

PŠO kaupinimo spinduliuotės charakteristikos yra formuojamos modulyje 4, kuris atlieka impulsų paketų formavimo ir stiprinimo funkciją. Esant poreikiui atliekama ir harmonikų generacija. Modulyje 4 gali būti impulsų retinimo įrenginys, kuris osciliatoriaus dažnį sumažina iki f_3 (išrenka iš sekos 11 impulsus 5 ir 10, kurie bus stiprinami, ir iš kurių bus formuojami impulsų paketai 12 ir 13). Yra keletas būdų suformuoti didelio impulsų pasikartojimo dažnio paketus. Šio išradimo šaltinyje, siekiant suformuoti didelės energijos (5–10) ns trukmės impulsų paketus, yra panaudojamas kietakūnis regeneracinis stiprintuvas.

Bendruoju atveju, kaupinimo spinduliuotės bangos ilgis yra ribose nuo 250 nm iki 1340 nm. Kaupinant artimojo infraraudonojo diapazono lazerio spinduliuote arba jo harmonikų spinduliuote ir naudojant VIS-NIR srityje skaidrius netiesinius kristalus (BBO, BIBO, LBO, KTA, KTP, MgO:LiNbO_3 , ZnO:LiNbO_3), šio išradimo šaltinio bangos ilgio derinimo diapazonas perdengia matomąją ir artimąją infraraudonąją spektro sritį nuo 395 nm iki 5000 nm. Nepertraukiamas derinimo diapazonas gali būti nuo 395 nm iki 2600 nm, nuo 600 nm iki 4000 nm arba nuo 1350 nm iki 5000 nm.

Fig.2 iliustruoja paketų formavimo regeneraciniu stiprintuvu idėją. Į modulio 4 sudėtį įeina regeneracinis stiprintuvas 31, kurio rezonatoriuje yra vienas arba du optiniai raktai 32, 33, kurie, bendrai veikdami, užtikrina osciliatoriaus impulso įvedimą į rezonatorių ir aukštos rezonatoriaus kokybės palaikymą (uždaro rezonatoriaus būseną) numatytam rezonatorius apėjimų skaičiui, kad vyktų regeneracinis stiprinimas. Minėti optiniai raktai 32, 33 taip pat realizuoja rezonatoriaus iškrovą per laiką Δt , kuris yra ilgesnis negu rezonatoriaus apėjimo laikas. Laiko intervalo Δt metu rezonatorius yra dalinai pralaidus – vieno apėjimo metu yra išmetama dalis rezonatoriuje cirkuliuojančio impulso energijos ir taip suformuojami impulsų paketai 34, 35 (seka 36). Galiausiai optiniai raktai 32, 33 pilnai atidaro rezonatorių (žema kokybė).

Optiniai raktai 32, 33 yra elektro-optiniai raktai (Pokelso elementai), valdomi įtampos signalais $U_1(t)$ ir $U_2(t)$, atitinkamai, valdo rezonatoriaus kokybę ir iškrovos lygį per rezonatoriuje patalpintą poliarizatorių. Pradinė rezonatoriaus būseną yra, kai rezonatorius pilnai uždarytas (įtampos ant elektro-optinių raktų nėra). Dėl didelių nuostolių, kuriuos įneša ketvirčio bangos ilgio plokštelė, nei generacija, nei stiprinimas nevyksta. Kai tik į rezonatorių patenka osciliatoriaus impulsas, ant elektro-optinių raktų paduodama įtampa, kompensuojanti fazinės plokštelės poveikį ir sumažinanti nuostolius iki minimumo. Prasideda impulso, uždaryto rezonatoriuje, stiprinimas. Uždaryto rezonatoriaus etape impulsas daug kartų praeina per aktyviąją terpę ir yra stiprinamas nuo 10^2 iki 10^4 kartų. Po numatyto rezonatoriaus apėjimų skaičiaus įtampa ant elektro-optinių raktų sumažinama laiko intervalui Δt . Tokiu būdu dalis sustiprinto impulso išleidžiama iš rezonatoriaus, o likusi toliau stiprinama. Momentas, kada rezonatorius pradedamas dalinai atidarinėti, yra parenkamas priklausomai nuo norimos impulsų paketų 34, 35 gaubtinės formos. Iš rezonatoriaus išeinančių impulsų pasikartojimo dažnis f_2 yra atvirkščiai proporcingas rezonatoriaus apėjimo laikui. Po laiko intervalo Δt rezonatorius yra pilnai atidaromas, kad rezonatorius būtų pilnai

iškrautas.

Tokiu režimu veikiantis regeneracinis stiprintuvas 31 atlieka ir stiprinimo, ir paketų formavimo funkcijas. Ir tai yra vienas iš išskirtinių siūlomo išradimo bruožų. Valdant regeneracinio stiprintuvo 31 iškrovos lygį ir trukmę, siekiama suformuoti tokią paketų 34, 35 laikinę gaubtinę, kad viso modulio 4 išėjime gautume kaupinimo impulsų paketus 12, 13, kurių intensyviausių impulsų amplitudės variacija neviršija 20 %. Modulyje 4 gali būti papildomų stiprinimo pakopų. Mažas regeneracinio stiprintuvo rezonatoriaus ilgis lemia trumpą apėjimo laiką, apsprendžiantį impulsų pasikartojimo dažnį f_2 paketų 34, 35 viduje. 500 MHz dažniui gauti reikalingas maždaug 30 cm, o 1 GHz dažniui – maždaug 15 cm ilgio rezonatorius. Turint du elektro-optinius raktus, ypač trumpą rezonatorių suformuoti nėra lengva, todėl geriau naudoti vieną elektro-optinį raktą (žr. prioritetinį išpildymą žemiau, Fig.3 ir Fig.4).

Fig.3 paveiksle pavaizduota, iš ko susideda impulsų paketų formavimo ir stiprinimo modulis 4 prioritetiniame šio išradimo išpildyme. Modulis 4 turi savyje trumpo rezonatoriaus kietakūnį regeneracinį stiprintuvą 31, kietakūnį tiesinį stiprintuvą 37 ir harmonikų generavimo įrenginį 38. Regeneraciniame stiprintuve 31 patalpintas tik vienas elektro-optinis raktas 32, valdomas kelių lygių įtampos signalu $U_3(t)$.

Kad šio išradimo lazerinės spinduliuotės šaltinis būtų derinamas VIS-NIR srityje, kaupinimo bangos ilgis turi būti matomoje spektro srityje. Todėl harmonikų generavimo įrenginyje 38 atliekama antros, trečios arba ketvirtos harmonikos generacija nuo stiprintuvų fundamentinės spinduliuotės. Galima sugeneruoti kaupinimo spinduliuotę spektrinėje srityje tarp 250 nm ir 750 nm. Pavyzdžiui, parametrinis šviesos osciliatorius su BBO netiesiniu kristalu, kaupinamas 355 nm bangos ilgiu, turi itin platų nepertraukiamą derinimo diapazoną nuo 395 nm iki 2600 nm. BBO, kaupinamu 532 nm, gaunamas derinimo diapazonas yra siauresnis – nuo 670 nm iki 2600 nm, nes nuo 2600 nm didėja kristalo sugertis. BIBO netiesinis kristalas turi siauresnį derinimo diapazoną nei BBO, tačiau netiesinio stiprinimo koeficientas yra didesnis, o stiprinama linija siauresnė nei BBO. KTA ir KTP kristalais, kaupinamais 532 nm spinduliuote, galima perdengti diapazoną nuo 610 nm iki 4000 nm. Ličio niobato kristalai skaidrūs iki 5000 nm.

Didžiausias pasikartojimo dažnis f_3 , kuriuo regeneracinis stiprintuvas gali dirbti stabiliai ir atsikartojančiai, priklauso nuo užkrato impulso energijos ir aktyviosios terpės sužadintos būsenos gyvavimo laiko. Nd:YVO₄ aktyviosios terpės regeneracinis

stiprintuvas, esant kelių dešimčių nJ užkrato impulso energijai, stabiliai veikia iki 10 kHz pasikartojimo dažnio f_3 . Nd:YAG terpės atveju, dėl ilgesnės sužadintos būsenos gyvavimo trukmės, stabiliai veikia iki 5 kHz. Tad šio išradimo šaltinyje iki $f_3 = 5$ kHz gali būti naudojamas tiek Nd:YAG, tiek Nd:YVO₄, ar kitų Nd jonais legiruočių aktyviųjų terpių lazeriniais diodais kaupinami regeneraciniai stiprintuvai. Atskirais atvejais viršutinė impulsų paketų pasikartojimo dažnio riba gali būti praplėsta iki 20 kHz. Apribojimo į mažesnių pasikartojimo dažnių pusę nėra, tačiau spektroskopiniams taikymams yra aktualūs dažniai ne mažesni kaip 500 Hz.

Formuojant impulsų paketus iš regeneracinio stiprintuvo ir po to juos stiprinant tiesiniame stiprintuve, svarbu atsižvelgti į stiprintuvo įsisotinimą, o tai reiškia, kad impulsų paketo pradžia turi būti auganti. Todėl Fig.2 pavaizduotų regeneracinio stiprintuvo paketų 34, 35 auganti gaubtinė yra tinkama, norint suformuoti plokščios viršūnės paketų seką 39 stiprintuvo 37 išėjime. Turint didelės smailinės galios impulsus po stiprintuvo 37, jie efektyviai konvertuojami į harmonikas, ir po harmonikų generavimo impulsų amplitudė paketuose 12, 13 skiriasi ne daugiau kaip 20 %. Regeneracinio stiprintuvo 31 ir tiesinio stiprintuvo 37 bendras stiprinimo faktorius turi būti ne mažesnis kaip 10^4 , o harmonikų generavimo įrenginio 38 efektyvumas bent 25 %, kad tenkintume užsibrėžtą reikalavimą – nuo 5 iki 15 kaupinimo impulsų smailinė galia būtų ne mažesnė kaip 800 kW, o kaupinimo impulsų paketų 12, 13 suminė energija siektų šimtus mikrodžaulių. Regeneracinio stiprintuvo 31 rezonatoriaus dalinio pralaidumo jungimo momentas yra tuomet, kai rezonatoriaus viduje cirkuliuojančio impulso energija pasiekia 1 μ J lygį.

Konkrečioje realizacijoje regeneraciniame ir tiesiniame stiprintuvuose 31, 37 buvo panaudotos Nd:YVO₄ aktyviosios terpės, o harmonikų generavimo įrenginyje 38 – BBO ir LBO antros ir trečios harmonikos kristalai. Regeneraciniam stiprintuvui veikiant 10 kHz dažniu f_3 , gautos 330 μ J suminės paketų energijos 355 nm bangos ilgio spinduliuotėje.

Regeneracinio stiprintuvo 31 optinis ilgis lygus 15 cm nulėmė $f_2 = 1$ GHz kaupinimo impulsų pasikartojimo dažnį paketų 12, 13 viduje.

Kaupinimo impulsų 15–17, 18–20 spektro plotis neviršijo $1,4 \text{ cm}^{-1}$, o trukmė siekė 40 ps.

Fig.4 vaizduoja optinę schemą vienos iš galimų kompaktiško regeneracinio

stiprintuvo realizacijų, kuri tinka prioritetiniam paketų formavimo ir stiprinimo moduliui 4 pagal Fig.3 išpildyti. Veidrodžiai 40, 41 ir poliarizatoriai 42 ir 43 sudaro regeneracinio stiprintuvo 31 rezonatorių 44, kurio optinis ilgis L_1 . Veidrodis 40 pilnai atspindi stiprinamą spinduliuotę, veidrodis 41 – dichroinis, pralaidus kaupinimo spinduliuotei 45 ir pilnai atspindintis stiprinamą spinduliuotę. Rezonatoriaus 44 viduje yra aktyvusis elementas 46, Pokelso elementas 32 ir ketvirčio bangos ilgio fazinė plokštelė 47. Nepridėjus įtampos ant Pokelso elemento 32, fazinė plokštelė per du praėjimus pakeičia poliarizaciją į statmeną.

Užkrato spinduliuotės impulsų seka 11 yra retinama impulsų retintuvu 48, kuris atrenka tik tuos impulsus, kurie bus stiprinami. Retintuvo 48 funkcija yra iš užkrato sekos 11 praleisti impulsus f_3 dažniu, likusius nukreipiant į šoną. Stiprinimui pasirinktas užkrato spinduliuotės impulsas 5 praeina optinį izoliatorių 49, sudarytą iš Faradėjaus rotatoriaus, pusės bangos ilgio fazinės plokštelės ir poliarizatoriaus ar poliarizatorių poros. Izoliatorius 49 apsaugo užkrato šaltinį nuo grįžtančios spinduliuotės arba spontaninės stiprintuvo aktyviosios terpės emisijos.

Į regeneracinį stiprintuvą 31 yra nukreipiama p poliarizacijos užkrato spinduliuotė, kuri per poliarizatorių 42 patenka į rezonatorių 44. Kol įtampos ant Pokelso elemento 32 nėra, per ketvirčio bangos ilgio fazinę plokštelę 47 praėjusios, atsispindėjusios nuo veidrodžio 40 ir darkart praėjusios fazinę plokštelę 47 spinduliuotės poliarizacija yra pasukama 90 laipsnių kampu. Grįžtantis link poliarizatoriaus 42 s poliarizacijos spinduliuotės impulsas yra atspindimas. Atsispindėjęs nuo kito poliarizatoriaus 43, praėjęs per aktyvųjį elementą 46, paskui atsispindėjęs nuo dichroinio veidrodžio 41 ir vėl sugrįžęs per elementus 46, 43, 42, pradeda antrą rezonatoriaus apėjimą.

Užkrato impulso uždarymas regeneraciniame stiprintuve įvyksta įjungiant ketvirčio bangos ilgio įtampą U_{M4} tarp Pokelso elemento 32 elektrodų. Jei iki antro impulso lėkio per Pokelso elementą 32, jame bus sukurtas ketvirčio bangos ilgio fazės vėlinimas (spės užaugti U_{M4} įtampa), fazinė plokštelė 47 ir Pokelso elementas 32 kartu veiks kaip pusės bangos ilgio fazinė plokštelė, kurią dukart praėjęs impulsas nepatirs poliarizacijos pasikeitimo, todėl po atspindžio nuo poliarizatoriaus 42 liks rezonatoriuje. Įtampos jungimo momentas ant Pokelso elemento parenkamas taip, kad būtų užtikrintas kuo stabilesnis stiprinimas, net jei į rezonatorių užkrato impulsas bus įleistas tik dalinai. Tai pasiekama tiksliai sinchronizuojant užkrato impulso atėjimo į

rezonatorių ir aukštos įtampos impulso atsiradimo ant Pokelso elemento. Šio išradimo regeneraciniame stiprintuve Pokelso elemento įtampos jungimo momento tikslumas užtikrina bent 1 % išėjimo impulsų energijos stabilumą. Stiprinimo metu impulsas pilnai uždaromas regeneracinio stiprintuvo rezonatoriuje 44, kur patiria maksimalų stiprinimą ir minimalius nuostolius.

Po to, kai impulsas sustiprinamas iki pageidaujamo lygio, dalis jo energijos yra išmetama iš rezonatoriaus 44 tokiu būdu: dukart praėjęs ketvirčio bangos ilgio fazinę plokštelę 47 ir Pokelso elementą 32, prie kurio prijungta įtampa yra mažesnė nei $U_{\lambda/4}$, patiria poliarizacijos pasikeitimą, ir yra dalinai išmetamas iš rezonatoriaus per poliarizatorių 42. Optinis izoliatoriaus 49 nukreipia jį kita kryptimi nei pradinė užkrato impulso kryptis. Per veidrodį 50 yra nukreipiamas į stiprintuvo 31 išėjimą. Jeigu įtampa būtų visiškai išjungta, tai rezonatoriaus dalinio pralaidumo fazė truktų tik tiek, kiek trunka galinis įtampos signalo frontas. Jeigu įtampa tik sumažinama (yra tarpinio lygio tarp $U_{\lambda/4}$ ir 0V įtampos), tai rezonatoriaus dalinio pralaidumo fazė tęsiasi ilgiau. Per dalinio pralaidumo laiką rezonatoriaus 44 viduje cirkuliuojantis impulsas atlieka daug apėjimų ir kiekvieną kartą dalis jo energijos yra išvedama į išėjimą, o dalis – atspindima į rezonatorių. Taip suformuojamas pageidaujamos trukmės ir energijos nuo 5 iki 15 impulsų paketas 34. Įtampai ant Pokelso elemento nukritus iki 0V, visa impulso energija išmetama iš rezonatoriaus. Geriausia rezonatorių visiškai atidaryti, kai suformuojamas reikiamos trukmės ir energijos paketas. Inversijos kaupimas aktyviajame elemente 46 naujam stiprinimo ciklui gali būti pradėtas iškart po rezonatoriaus iškrovos. Kiti pastebėjimai apie regeneracinio stiprintuvo konfigūraciją:

- Pokelso elementas 32 rezonatoriuje yra talpinamas kuo arčiau pluošto sąsmaukos. Taip užtikrinamas geras poliarizacijos kontrastas.

- Atšaka tarp poliarizatoriaus 42 ir veidrodžio 40, kurioje yra ketvirčio bangos ilgio fazinė plokštelė 47 ir Pokelso elementas 32, yra kiek galima trumpesnė.

- Gaudyklė 51 sugeria nesugertą kaupinimo spinduliuotę, kuri praeina poliarizatorių 43.

- Dėl baigtinio poliarizatoriaus kontrasto (tipiškai 1:1000), ne mažiau kaip 0,1 % viduje cirkuliuojančios s poliarizacijos spinduliuotės taip pat praeina poliarizatorių 43. Ji gali būti panaudota rezonatoriaus impulso evoliucijos stebėjimui ir vidinės rezonatoriaus energijos apskaičiavimui.

- Dar vienoje regeneracinio stiprintuvo realizacijoje rezonatoriaus 44 viduje yra spektro siaurinimo elementas, pavyzdžiui etalonas, kurio pagalba galima formuoti mažesnį impulso spektro plotį ir atitinkamai ilgesnius sustiprintus impulsus.

Fig.5 vaizduoja dviejų lygių įtampos signalą $U_3(t)$ laike ir aukštos įtampos valdiklių prijungimo prie Pokelso elemento schemą. Norint realizuoti aukščiau aprašytą regeneracinio stiprintuvo veikimo režimą, kurio metu suformuojamas trumpų impulsų paketas, sudarytas iš norimo skaičiaus vienodų ir norimos energijos impulsų, ant rezonatoriaus kokybę valdančio Pokelso elemento 32 reikia paduoti sudėtingos formos aukštos įtampos impulsą. Dviejų lygių signalas $U_3(t)$ yra suformuojamas iš skirtingos trukmės įtampos impulsų $U_1(t)$ ir $U_2(t)$. Pirmasis aukštos įtampos šaltinis 52 tiekia teigiamą potencialą, o raktu 53, kurį valdo sinchronizacijos impulsas S_1 , yra suformuojamas įtampos impulsas $U_1(t)$, paduodamas į pirmą Pokelso elemento elektrodą. Antrasis aukštos įtampos šaltinis 54 tiekia neigiamą potencialą, o raktu 55, kurį valdo sinchronizacijos impulsas S_2 , yra suformuojamas impulsas $U_2(t)$, paduodamas į antrą Pokelso elemento elektrodą. Tokiu būdu potencialų skirtumas ant Pokelso elemento elektrodų lygus $U_3(t) = U_1(t) - U_2(t) = U_1(t) + |U_2(t)|$.

Laiko momentu t_0 abu raktai 53, 55 pradeda atsidarinėti. Laiko momentu t_1 pirmasis raktas 53 pradeda užsidarinėti. Po laiko, reikalingo raktui 53 pilnai užsidaryti (frontas 56 yra kelių nanosekundžių trukmės), Pokelso elementą 32 veikia įtampa $U_3 = |U_2 \max|$, kuri yra mažesnė už ketvirčio bangos ilgio įtampą $U_{N/4}$. Laiko momentu t_2 , antrasis raktas 55 pradeda užsidarinėti. Per laiką, reikalingą raktui 55 pilnai užsidaryti (frontas 57 yra kelių nanosekundžių trukmės), Pokelso elementas 32 vis dar yra veikiamas potencialų skirtumo, tad rezonatorius vis dar yra dalinai pralaidus. Aukštos įtampos raktų išjungimo momentai t_1 ir t_2 yra parenkami taip, kad bendras laikas, kada rezonatorius turi dalinį pralaidumą, būtų maždaug 10 ns trukmės.

Fig.6A–6D iliustruoja, kaip impulsų paketo 34 forma ir energija regeneracinio stiprintuvo 31 išėjime yra valdoma keičiant rezonatoriaus dalinio pralaidumo įjungimo ir išjungimo momentą bei potencialų skirtumą ant Pokelso elemento elektrodų. Laiko skalę atitinka rezonatoriaus apėjimų skaičius N . Rezonatoriaus iškrovos lygis iliustruojamas kaip atspindžio atgal į rezonatorių koeficientas $R(N)$. $U_3'(N)$, $U_3''(N)$, $U_3^*(N)$, $U_3^{**}(N)$ – Pokelso elementą valdančios įtampos funkcijos, kur laikas yra išreikštas rezonatoriaus apėjimų skaičiumi N . $R'(N)$, $R''(N)$, $R^*(N)$, $R^{**}(N)$ – rezonatoriaus atspindžio funkcijos; R su rezonatoriaus pralaidumu T ir Pokelso

elemento įtampa yra susietas sąryšiu: $R = 1 - T = \sin^2(\pi/2 * U/U_{N2})$.

Paveiksluose iliustruojama, kaip nuo rezonatoriaus apėjimų skaičiaus N kinta impulso energija rezonatoriaus viduje ir išorėje: 58', 58'', 58*, 58** – rezonatoriaus viduje cirkuliuojančio impulso, o 59', 59'', 59*, 59** – išėjimo impulso. Varijuojant atidarymo momentą, atidarymo lygį ir trukmę, galima valdyti išėjimo impulsų paketų trukmę, formą (augančios, pastovios arba krentančios amplitudės) ir bendrą energiją.

Esant labai mažai užkrato energijai (10 pJ), prireikia kelių dešimčių rezonatoriaus apėjimų, kad impulsas būtų sustiprintas iki pageidaujamos energijos lygio. Kai $U_3 = U_{N4}$, rezonatoriaus kokybė yra maksimali, stiprinamas impulsas yra pilnai uždarytas (rezonatoriaus $R=1$), ir į išorę spinduliuotė neišeina. Pradedant atidarinti rezonatorių ($R<1$), dalis viduje cirkuliuojančio impulso energijos yra išleidžiama. Tuo būdu jau prasideda išėjimo impulsų paketo formavimas. Kuo mažesnis rezonatoriaus R , tuo didesnė impulso dalis yra išvedama iš rezonatoriaus. Impulsų paketo forma ir suminė energija priklauso nuo rezonatoriaus dalinio pralaidumo įjungimo momento N_{t1} ir trukmės Δt (žiūr. Fig.5) bei R vertės laiko intervale tarp N_{t1} ir N_{t2} . Kol rezonatoriaus vieno apėjimo stiprinimas viršija nuostolius, tol viduje cirkuliuojančio impulso energija auga. Kai vieno apėjimo stiprinimas susilygina su nuostoliais, viduje cirkuliuojančio impulso energija nustoja didėti. Kai aktyviosios terpės inversija yra išsekvojama, stiprinimas nebeatsveria nuostolių, ir rezonatoriaus impulso energija pradeda mažėti.

Fig.6A ir Fig.6B iliustruoja, kaip regeneracinio stiprintuvo impulsų paketo forma priklauso nuo dalinio atidarymo momento. Ankstinant rezonatoriaus atidarymą, galima suformuoti ilgesnį augančios amplitudės impulsų paketą 59'' (Fig.6B). Vėlinant atidarymą, galima suformuoti trumpą plokščios viršūnės impulsų paketą 59' (Fig.6A). Fig.6C ir Fig.6D iliustruoja, kaip regeneracinio stiprintuvo impulsų paketo forma priklauso nuo dalinio pralaidumo lygio 60 ir 61, kai N_{t1} ir N_{t2} yra fiksuoti.

Fig.7A–7C vaizduoja įvairias galimas sinchroniškai kaupinamo parametrinio šviesos osciliatoriaus 2 realizacijas. Veidrodžiai 62 ir 63 suformuoja tiesinį rezonatorių 64, kurio optinis ilgis L_2 . Veidrodžiai yra plokšti arba įgaubti. Fig.7A–7B rezonatoriaus viduje išilgai rezonatoriaus optinės ašies yra patalpinta kolineariai kaupinamų netiesinių kristalų 65, 66 pora, kaupinimo spinduliuotės įvedimo separatorius 67 ir keli papildomi elementai. Separatorius 67 atspindi kaupinimo, pvz. 355 nm, spinduliuotę ir visiškai praleidžia parametriškai sugeneruotą spinduliuotę. Kaupinimo spinduliuotė

teleskopo 68 pagalba sufokusuojama į netiesinius kristalus. Veidrodis 69 kartu su separatoriumi 67 nukreipia kaupinimo spinduliuotę išilgai PŠO optinės ašies. Elementas 70 – spektrinis filtras, jeigu reikia. PŠO bangos ilgio derinimas vykdomas keičiant kampą tarp kristalo optinės ašies ir kaupinimo spinduliuotės (o tuo pačiu ir rezonatoriaus ašies) atžvilgiu. Fiziškai tai daroma pasukant netiesinius kristalus 65, 66 kampu (kampinis derinimas). Naudojant netiesinių kristalų porą, yra sukompensuojamas lygiagretus spindulio poslinkis, o simetriškai juos suorientavus, kompensuojamas apertūrinis efektas, ir gaunamas simetriškas parametriškai sugeneruotos spinduliuotės pluoštas. Taip pat yra galimas temperatūrinis derinimas, tačiau šiuo atveju neįmanoma realizuoti greito bangos ilgio keitimo. Kampinio derinimo atveju, yra palaikoma pastovi netiesinių kristalų 65, 66 temperatūra. Sukant netiesinius kristalus 65, 66, keičiasi rezonatoriaus optinis ilgis. Sinchroninio kaupinimo metu svarbu rezonatoriaus apėjimo laiką priderinti prie kaupinimo impulsų pasikartojimo dažnio f_2 (kaupinimo impulsų paketų viduje). Todėl rezonatoriaus 64 optinis ilgis L_2 turi būti lygus regeneracinio stiprintuvo rezonatoriaus 44 optiniam ilgiui L_1 . Šios sąlygos išpildymas gali būti atliktas paderinant tiek PŠO rezonatoriaus 64 ilgį, tiek ir regeneracinio stiprintuvo rezonatoriaus 44 ilgį. Fig.7A rezonatoriaus 64 ilgio paderinimas realizuojamas naudojant kompensatorius 71 ir 72. Kompensatorių 71 ir 72 sukimas yra sinchronizuotas su netiesinių kristalų 65, 66 sukimu. Sukant lygiagrečias skaidrias plokšteles, keičiasi jų optinis storis ir tai naudojama kompensuoti netiesinių kristalų optinio storio pokyčius, kai yra derinamas generuojamos spinduliuotės bangos ilgis. Šiuo atveju, galiniai rezonatoriaus veidrodžių 62, 63 laikikliai yra stacionariai įtvirtinti. Fig.7B - rezonatoriaus 64 ilgio paderinimo variantas, realizuojamas stumdant vieną iš galinių veidrodžių: veidrodžio 62 laikiklis tvirtinamas ant pozicionavimo staliuko, kurio padėties keitimas yra sinchronizuojamas su netiesinių kristalų 65, 66 sukimu.

PŠO rezonatoriaus 64 viduje taip pat gali būti spektro siaurinio elementai, pvz. etalonas 73 arba difrakcinė gardelė vietoj veidrodžio 62. Kolinearios sąveikos atveju fazinis sinchronizmas yra užtikrinamas santykinai siaurai signalinės ir šalutinės bangos spektrinei sričiai, tad spektro siaurinio elemento galima ir nenaudoti. Parametriškai sugeneruotos spinduliuotės spektro plotis yra didesnis už kaupinimo spinduliuotės spektro plotį. Išėjimo spinduliuotės spektro plotis kinta priklausomai nuo signalinės ir šalutinės bangų ilgių λ_s ir λ_l . Pavyzdžiui, jei kaupinimo spinduliuotės

spektro plotis ties 355 nm bangos ilgiu yra siauresnis kaip $1,4 \text{ cm}^{-1}$, BBO kristaluose sugeneruotos parametrinės spinduliuotės 24 spektro plotis neviršys 10 cm^{-1} visame derinimo diapazone rezonatoriuje su plokščiais veidrodžiais 62, 63, o naudojant difrakcinę gardelę – neviršys 8 cm^{-1} . Panaudojant kelias spektro siaurinimo priemones, galima užtikrinti išėjimo spinduliuotės 24 spektro plotį ne didesnį kaip 3 cm^{-1} .

Pagal prioritetinę šio išradimo parametrinio šviesos osciliatoriaus realizaciją rezonanso sąlyga yra tenkinama signalinei bangai: rezonatoriaus 64 ilgis yra lygus sveikam signalinės bangos ilgių λ_s skaičiui, o veidrodis 63 yra visiškai pralaidus šalutinei bangai ir dalinai pralaidus signalinei bangai. Optimalus veidrodžio 63 atspindžio koeficientas signalinės bangos ilgiams (395–709) nm srityje yra 50 %. Taip pat gali būti naudojamas iki 75 % atspindžio koeficiento veidrodis 63, kuris sugrąžins didesnę signalinės bangos energijos dalį į rezonatorių, tuo būdu paspartins parametrinės spinduliuotės energijos išaugimą rezonatoriaus 64 viduje. Kadangi rezonatorius 64 yra trumpas, spinduliuotės moda yra labai maža, o pluoštas greitai skečiasi. Išėjime prieš arba už minėto filtro 70 yra kolimuojantis lęšis 74.

Kaupinant BBO parametrinį šviesos osciliatorių 355 nm bangos ilgio impulsų paketu, derinimo diapazonas yra nuo 395 nm iki 2600 nm, įskaitant signalinės bangos spinduliuotę (395 nm – 709 nm) ir šalutinės bangos spinduliuotę (710 nm – 2600 nm). Antro tipo parametrinio šviesos stiprinimo sąveikoje šalutinės bangos poliarizacija skiriasi nuo signalinės bangos poliarizacijos, todėl atskyrimas yra vykdomas poliarizacijai selektyviais elementais. Fig.7A, Fig.7B pavaizduotas poliarizacijai selektyvus elementas 75 prioritetiškai yra Rošono prizmė. Priklausomai nuo Rošono prizmės 75 orientacijos, į išėjimo kanalą 24 yra praleidžiama arba signalinės, arba šalutinės bangos spinduliuotė. Kita spinduliuotės dalis 76 nukreipiama į gaudyklę, arba į papildomą išėjimo kanalą.

Fig.7C pavaizduotas nekolinearaus fazinio sinchronizmo PŠO išpildymas. Nekolonearaus stiprinimo atveju signalinė arba šalutinė banga sklinda išilgai netiesinio kristalo išpjovimo ašies. Nekolonearią sąveiką galima realizuoti naudojant vieną netiesinį kristalą 77, jo nesukant, ir rezonatorius gali būti itin kompaktiškas. Kaupinimo spinduliuotė veidrodžiais 69, 78 į netiesinį kristalą 77 yra nukreipiama kampu (po vieno praėjimo, yra nukreipiama į gaudyklę 79). Tokioje sąveikos geometrijoje stiprinimo juosta yra itin plati, todėl bangos ilgio derinimui ir spektro siaurinimui turi būti naudojami spektriniai filtrai ir/arba etalonai 80.

Taip pat gali būti realizuotos žiedinio rezonatoriaus PŠO konfigūracijos, sudarytos iš trijų ar keturių veidrodžių. Tačiau konstruojant trumpo rezonatoriaus ilgio PŠO, žiedinės konfigūracijos tampa nepraktiškos.

Fig.8 pavaizduotas dar vienas šio išradimo išpildymas. Impulsų paketų formavimo ir stiprinimo modulio yra sudarytas iš regeneracinio stiprintuvo 31 ir tiesinio galios stiprintuvo 37, o harmonikų generavimo įrenginio nėra. Šiuo atveju kaupinimo spinduliuotė 14 yra fundamentinė aktyviosios terpės, kurios pagrindu yra pagaminti minėti stiprintuvai, spinduliuotė.

Fig.9 blokinė schema, vaizduojanti šio išradimo lazerinio šaltinio antrą konstrukcinį variantą. Kaupinimo lazeris 81 tiekia nepastovaus arba išretinto pasikartojimo dažnio pikosekundinių impulsų paketų 82, 83, 84 seką 85. Laiko intervalas tarp pirmo paketo 82 pradžios ir antro paketo 83 pradžios lygus T_1 , o tarp antro paketo 83 pradžios ir trečio paketo 84 pradžios lygus T_2 . T_1 ir T_2 tarpusavyje nebūtinai sutampa ir gali būti pakankamai maži, pradedant nuo 100 mikrosekundžių. Derinamo bangos ilgio impulsų paketai 86, 87, 88 (seka 89) yra generuojami tik tuo metu, kai į parametrinį šviesos osciliatorių 2 atkeliauja kaupinimo impulsų paketai. Kaupinimo lazeris 81 gali būti sukonstruotas panašiai kaip ir aukščiau aprašytas kaupinimo impulsų šaltinis 1: yra sudarytas iš lazerinio osciliatoriaus bei paketų formavimo ir stiprinimo modulio. Parametrinis šviesos osciliatorius 2 yra visiškai toks pats kaip aukščiau aprašytas. Kaupinimo lazeris 81 su nepastoviu paketų pasikartojimo dažniu gali būti realizuotas keliais būdais. Pirma, kai jo lazerinis osciliatorius yra parinktas iš osciliatorių, kurie turi galimybę išspinduliuoti impulsą tik tais laiko momentais, kai jis yra reikalingas. Antra, kai kaupinimo lazerio viduje yra papildomas optinis raktas, kuris iš sugeneruotos pastovaus paketų pasikartojimo dažnio sekos išrenka tik tuos paketus, kurie yra reikalingi. Trečia, gali būti moduluojama osciliatoriaus impulsų amplitudė ir, priklausomai nuo užkrato impulso energijos, jų stiprinimas paketų formavimo ir stiprinimo modulyje turi skirtingą evoliuciją; dėl sumažėjusios kaupinimo impulso smailinės galios parametrinė šviesos generacija parametriniame osciliatoriuje 2 vyks tik nuo didelės energijos kaupinimo impulso paketų. Nepastovaus paketų pasikartojimo dažnio derinamo bangos ilgio spinduliuotė gali būti reikalinga kai kuriems taikymams.

Siūlomo optinio parametrinio osciliatoriaus kaupinimas trumpais pikosekundinių impulsų paketais pasižymi tuo, kad kaupinimo ir parametrinių bangų

tikslus sutapimas laike sąlygoja nemažesnį kaip 10 % konversijos efektyvumą. Būtent reguliari kaupinimo impulsų paketo laikinė struktūra, palyginus su daugiamodžio nanosekundinio impulso triukšmine struktūra, yra pagrindinė gero konversijos efektyvumo priežastis. Nanosekundinį impulsą užpildančių triukšminių impulsų trukmė yra tos pačios eilės kaip siūlomo išradimo pikosekundinių kaupinimo impulsų trukmė, nanosekundinio kaupinimo atveju energijos konversijos efektyvumas, esant tai pačiai impulso energijai, yra kelis kartus mažesnis negu šio išradimo PŠO. Kaupinant kelių nanosekundžių trukmės pikosekundinių impulsų paketu, sugeneruotos derinamo bangos ilgio spinduliuotės spektrinio pločio savybės yra identiškos atvejui, kai kaupinama nanosekundiniais impulsais, o sugeneruoto parametriškai derinamo impulsų paketo trukmė yra identiška impulso trukmei, gautai PŠO kaupinant nanosekundiniais impulsais. Tai reiškia, kad šio išradimo šaltinis yra pilnai tinkamas tiek spektriniais tyrimams, tiek ir tyrimams su laikine skyra, bet pasižymi geresniu energijos konversijos efektyvumu. Potencialiai tai gali reikšti ir mažesnę pagal siūlomą sprendimą pagaminto lazerio savikainą, palyginus su nanosekundiniu lazeriu su tokiais pat derinamos spinduliuotės parametrais. Faktiškai pagal siūlomą išradimą pagamintas derinamo bangos ilgio lazerinis šaltinis yra pranašesnis. Naudojant visus gerai žinomus netiesinius kristalus ir kaupinant geriausiai jiems tinkamais bangos ilgiais, siūlomu derinamo bangos ilgio lazeriniu šaltiniu galima perkloti labai platų spektrinį diapazoną nuo UV iki NIR, nuo ~400 nm iki ~5000 nm. O papildomai realizavus suminio dažnio arba skirtuminio dažnio generaciją (su likutine kaupinimo spinduliuote), išplėsti derinimo diapazoną į UV sritį iki 190 nm ir į vidurinę IR sritį – iki 16 μm . Gali būti naudojami ir periodiškai orientuoti netiesiniai kristalai. Tuomet siūlomas temperatūrinis derinimas.

Aprašytoji šio išradimo derinamo bangos ilgio impulsinės lazerinės spinduliuotės lazerinė sistema yra kompaktiška, lengvai aptarnaujama ir patikima. Dėl trumpo rezonatoriaus, kuris atitinka impulsų pasikartojimo dažnį nuo 200 MHz iki 2 GHz, visos aukščiau aprašytos parametrinio šviesos osciliatoriaus konfigūracijos yra labai kompaktiškos, todėl silpnai reaguoja į išorės veiksnius. Reikalavimai grįžtamojo ryšio rezonatoriaus ilgio stabilizacijos sistemai, kuri suderina regeneracinio stiprintuvo ir parametrinio šviesos osciliatoriaus rezonatorių optinius ilgius, yra gana paprasti. Sinchroninio kaupinimo realizacija kelių nanosekundžių laiko intervale leidžia pasiekti didesnį nei 10 % parametrinės šviesos generacijos efektyvumą tūriniuose

netiesiniuose kristaluose visame derinimo diapazone. Pavienių parametriškai sugeneruotos spinduliuotės impulsų energija yra mikrodžaulių lygio. Parenkant kaupinimo bangos ilgį ir parametrinio netiesinio kristalo medžiagą, galima perdengti derinimo diapazoną nuo 200 nm iki 5000 nm, o papildomai realizavus suminio ar skirtuminio dažnio generaciją – nuo 200 nm iki 16 μm . Nanosekundinės trukmės pikosekundinių impulsų paketų spinduliuotė, kurios spektro plotis neviršija 3 cm^{-1} , o paketai pasikartoja dideliu impulsų pasikartojimo dažniu, labai tinka spektroskopiniams taikymams.

IŠRADIMO APBRĖŽTIS

1. Derinamo bangos ilgio impulsinės lazerinės spinduliuotės šaltinis VIS-NIR spektroskopijai, sudarytas iš kaupinimo impulsų šaltinio (1) ir parametrinio šviesos osciliatoriaus (2), kur minėtas kaupinimo impulsų šaltinis (1) apima:

- lazerinį osciliatorių (3), generuojantį nuolatinę pikosekundinių užkrato impulsų (5-10) seką (11), apibūdinamą pirmuoju pasikartojimo dažniu f_1 ribose nuo 10 kHz iki 100 MHz;

- impulsų paketų formavimo ir stiprinimo modulį (4), kuris tiekia kaupinimo impulsų paketų (12, 13) seką (14), kur kiekvienas minėtas kaupinimo impulsų paketas (12, 13) yra sudarytas iš pikosekundinių kaupinimo impulsų (15-17), (18-20), pasikartojančių antruoju pasikartojimo dažniu f_2 , didesniu nei minėtas pirmasis pasikartojimo dažnis f_1 , ir kuris yra ribose nuo 200 MHz iki 2 GHz; laiko tarpas tarp gretimų kaupinimo impulsų paketų (12, 13) atitinka trečiąjį pasikartojimo dažnį f_3 , kuris yra mažesnis už antrąjį pasikartojimo dažnį f_2 ir mažesnis arba lygus pirmajam pasikartojimo dažniui f_1 ;

minėtas parametrinis šviesos osciliatorius (2) apima:

- bent vieną parametrinio šviesos stiprinimo netiesinį kristalą, patalpintą optiniame rezonatoriuje (64); netiesiniame kristale iš vieno kaupinimo λ_P bangos ilgio spinduliuotės fotono yra sugeneruojami du mažesnės energijos fotonai: λ_S bangos ilgio signalinės bangos fotonas ir λ_I bangos ilgio šalutinės bangos fotonas;

- bent du veidrodžius (62, 63), suformuojančius minėtą optinį rezonatorių (64), kurio ilgis L_2 ;

kaupinimo impulsų šaltinis (1) ir parametrinis šviesos osciliatorius (2) tarpusavyje yra suderinti taip, kad parametrinio šviesos osciliatoriaus (2) rezonatoriaus (64) apėjimo laikas yra lygus laiko tarpui $1/f_2$ tarp gretimų kaupinimo impulsų (15, 16);

parametrinis šviesos osciliatorius (2) tiekia išėjimo impulsų paketų (22, 23) seką (24), kur kiekvienas minėtas išėjimo impulsų paketas (22, 23) yra sudarytas iš pikosekundinių signalinės ir/arba šalutinės bangos impulsų (25-27), (28-30),

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

minėto impulsų paketų formavimo ir stiprinimo modulio (4) sudėtyje yra kietakūnis regeneracinis stiprintuvas (31), kurio rezonatoriaus (44) viduje yra vienas

arba du optiniai raktai (32, 33); kur

- minėti optiniai raktai yra sukonstruoti taip, kad jungiant įtampą ant abiejų arba vieno iš optinių raktų (32, 33), užkrato impulsai (5, 10), tarpusavyje nutolę intervalu $1/f_3$, yra uždaromi rezonatoriaus (44) viduje; optinių raktų įtampos jungimo momento t_0 tikslumas užtikrina bent 1 % išėjimo impulsų energijos stabilumą;

- laiko momentu t_1 išjungiant įtampą ant vieno iš optinių raktų (32, 33) arba sumažinant įtampą ant abiejų arba vieno iš optinių raktų (32, 33), laiko intervalui Δt , kuris yra ilgesnis negu rezonatoriaus (44) apėjimo laikas, sukuriamas dalinis rezonatoriaus (44) pralaidumas, ir išmetama dalis rezonatoriaus viduje cirkuliuojančio impulso energijos;

- kaupinimo impulsų paketų (12, 13) trukmė yra lygi minėtam laiko intervalui Δt ;

- minėtas trečiasis pasikartojimo dažnis f_3 yra ribose nuo 500 Hz iki 10 kHz;

- kiekviename kaupinimo impulsų pakete (12, 13) yra nuo 7 iki 15 iš eilės einančių kaupinimo impulsų, kurių smailinė galia viršija 800 kW, o suminė kiekvieno kaupinimo impulsų paketo (12, 13) energija yra nemažesnė kaip 300 μ J;

- kaupinimo impulsų (15-17), (18-20) spektro plotis neviršija 1 cm^{-1} , o trukmė yra nuo 15 ps iki 70 ps;

- kaupinant λ_P bangos ilgio spinduliuote, parametrinio šviesos stiprinimo sinchronizmo sąlyga minėtame netiesiniame kristale yra tenkinama visame netiesinio kristalo skaidrumo diapazone;

- visame derinimo diapazone konversijos iš kaupinimo impulsų paketų sekos (14) į išėjimo impulsų paketų seką (24) efektyvumas yra ne mažesnis kaip 10 %;

- visame derinimo diapazone kiekviename išėjimo impulsų pakete (22, 23) yra nuo 5 iki 10 iš eilės einančių išėjimo impulsų, kurių smailinė galia viršija 10 kW;

- išėjimo impulsų spektro plotis neviršija 10 cm^{-1} ;

- kaupinant artimojo infraraudonojo diapazono lazerio spinduliuote arba jo harmonikų spinduliuote, bangos ilgio derinimo diapazonas perdengia matomąją ir artimąją infraraudonąją spektro sritį.

2. Šaltinis pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad

minėto regeneracinio stiprintuvo (31) rezonatoriuje (44) yra vienas elektro-optinis raktas (32), valdomas dviejų lygių įtampos signalu $U_3(t)$.

3. Šaltinis pagal 1 arba 2 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad

minėto regeneracinio stiprintuvo (31) rezonatoriaus dalinio pralaidumo jungimo laiko momentas t_1 yra tuomet, kai rezonatoriaus viduje cirkuliuojančio impulso energija pasiekia $1 \mu\text{J}$ lygį.

4. Šaltinis pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad

impulsų paketų formavimo ir stiprinimo modulio (4) sudėtyje taip pat yra kietakūnis tiesinis stiprintuvas (37); regeneracinio stiprintuvo (31) ir tiesinio stiprintuvo (37) bendras stiprinimo faktorius yra nemažesnis kaip 10^4 .

5. Šaltinis pagal 4 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad

lazerinis osciliatorius (3) yra kietakūnis Nd:YVO₄ arba Nd:YAG sinchronizuotų modų osciliatorius, generuojantis (1-10) nJ energijos pikosekundinius impulsus, kurių pasikartojimo dažnis f_1 lygus 80 MHz;

- regeneracinis stiprintuvas (31) yra Nd:YVO₄ arba Nd:YAG terpės regeneracinis stiprintuvas, kurio suformuotų paketų (34, 35) energija viršija $20 \mu\text{J}$, kai impulsų paketų pasikartojimo dažnis f_3 lygus 10 kHz;

- tiesinis stiprintuvas (37) yra Nd:YVO₄ arba Nd:YAG terpės vienalėkis arba dvilėkis stiprintuvas, kurio paketų energija viršija 1 mJ, kai f_3 lygus 10 kHz.

6. Šaltinis pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad

bangos ilgių pora λ_s, λ_l , kuri yra sugeneruojama parametrinės sąveikos metu, yra keičiama: 1) sukant minėtą bent vieną parametrinio šviesos stiprinimo netiesinį kristalą jo optinės ašies atžvilgiu, 2) keičiant netiesinio kristalo temperatūrą arba 3) keičiant spektrą selektuojančio elemento pralaidumo arba atspindžio bangos ilgį.

7. Šaltinis pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad

kaupinimo spinduliuotės pluoštas sklinda kolineariai parametrinio šviesos osciliatoriaus (2) rezonatoriaus (64) ašiai;

- minėtas bent vienas parametrinio šviesos stiprinimo netiesinis kristalas yra du kristalai (65, 66), parinkti iš BBO, BIBO, LBO, KTA, KTP, MgO:LiNbO₃, ZnO:LiNbO₃ ar kitų VIS-NIR srityje skaidrių netiesinių kristalų;

- bangos ilgio derinimas yra atliekamas simetriškai sukanant abu minėtus parametrinio šviesos stiprinimo netiesinius kristalus (65, 66) į priešingas puses kristalų optinių ašių atžvilgiu ir/arba keičiant kristalų (65, 66) temperatūrą.

8. Šaltinis pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad kaupinimo spinduliuotės bangos ilgis yra ribose nuo 250 nm iki 1340 nm.

9. Šaltinis pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad išėjimo spinduliuotės derinimo diapazonas yra ribose nuo 395 nm iki 2600 nm.

10. Šaltinis pagal bet kurį iš 1-8 punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad išėjimo spinduliuotės derinimo diapazonas yra ribose nuo 1350 nm iki 5000 nm.

11. Šaltinis pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad išėjimo impulsų spektro plotis neviršija 3 cm^{-1} .

12. Šaltinis pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad tiekiamų kaupinimo impulsų paketų (12, 13) trukmė pusės amplitudės aukštyje yra (5- 10) ns ribose, o minėtų kaupinimo impulsų, kurių smailinė galia viršija 800 kW, amplitudė skiriasi ne daugiau nei 20 %.

13. Šaltinis pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad vienas veidrodis (63) iš minėtų bent dviejų veidrodžių, kurie suformuoja optinį rezonatorių (64), yra dalinai pralaidus signalinės bangos ilgiui λ_s ir visiškai pralaidus šalutinės bangos ilgiui λ_l .

14. Šaltinis pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad minėtas parametrinio šviesos osciliatoriaus (2) rezonatoriaus (64) apėjimo laiko suderinimas su laiko tarpu $1/f_2$ tarp gretimų kaupinimo impulsų (15, 16) yra atliekamas paderinant rezonatoriaus (64) ilgį L_2 arba regeneracinio stiprintuvo (31) rezonatoriaus (44) ilgį L_1 .

15. Šaltinis pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad bangos ilgio derinimo metu sukanant bent vieną parametrinio šviesos stiprinimo netiesinį kristalą jo optinės ašies atžvilgiu arba keičiant netiesinio kristalo temperatūrą, yra paderinamas parametrinio šviesos osciliatoriaus rezonatoriaus (64) ilgis L_2 ; ilgio

paderinimas atliekamas pagal didžiausią išėjimo spinduliuotės (24) vidutinės galios vertę.

16. Derinamo bangos ilgio impulsinės lazerinės spinduliuotės šaltinis VIS-NIR spektroskopijai, sudarytas iš kaupinimo lazerio (81) ir parametrinio šviesos osciliatoriaus (2), kur minėtas kaupinimo impulsų šaltinis (81) apima:

- lazerinį osciliatorių, kuris gali generuoti pikosekundinius užkrato impulsus dažniu ribose nuo 0,5 kHz iki 500 MHz,

- impulsų paketų formavimo ir stiprinimo modulį, kuris tiekia kaupinimo impulsų paketų (82, 83, 84) seką (85), kur kiekvienas minėtas kaupinimo impulsų paketas (82, 83, 84) yra sudarytas iš pikosekundinių kaupinimo impulsų, pasikartojančių dažniu f_2 iš intervalo nuo 200 MHz iki 2 GHz, bet didesniu nei lazerinio osciliatoriaus impulsų pasikartojimo dažnis; laiko tarpai T_1 , T_2 tarp gretimų kaupinimo impulsų paketų (82, 83), (83, 84) yra lygūs arba didesni už laiko intervalą tarp gretimų minėto lazerinio osciliatoriaus impulsų;

minėtas parametrinis šviesos osciliatorius (2) apima:

- bent du veidrodžius (62, 63), kurie suformuoja optinį rezonatorių (64);
- bent vieną parametrinio šviesos stiprinimo netiesinį kristalą, patalpintą minėtame optiniame rezonatoriuje (64);

kaupinimo lazeris (81) ir parametrinis šviesos osciliatorius (2) tarpusavyje yra suderinti taip, kad parametrinio šviesos osciliatoriaus (2) rezonatoriaus (64) apėjimo laikas yra lygus laiko tarpui $1/f_2$ tarp gretimų kaupinimo impulsų;

mažo rezonatoriaus ilgio parametrinis šviesos osciliatorius (2) tiekia išėjimo impulsų paketų (86, 87, 88) seką (89), kur kiekvienas minėtas išėjimo impulsų paketas (86, 87, 88) yra sudarytas iš pikosekundinių signalinės ir/arba šalutinės bangos impulsų,

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

minėto impulsų paketų formavimo ir stiprinimo modulio sudėtyje yra kietakūnis regeneracinis stiprintuvas (31), turintis vieną arba du optinius raktus, kurie pasirinktam laiko intervalui Δt sukuria dalinį rezonatoriaus pralaidumą ir taip suformuoja impulsų paketus; kur

- kaupinimo impulsų paketų (82, 83, 84) trukmė pusės amplitudės aukštyje yra (5- 10) ns ribose;

- minėti laiko tarpai T_1 , T_2 yra lygūs arba didesni nei 100 μ s;

- kiekviename kaupinimo impulsų pakete (82, 83, 84) yra nuo 7 iki 15 iš eilės einančių kaupinimo impulsų, kurių smailinė galia viršija 800 kW, o amplitudė skiriasi ne daugiau nei 20 %;

- suminė kiekvieno kaupinimo impulsų paketo (82, 83, 84) energija yra nemažesnė kaip 300 μ J;

- kaupinimo impulsų spektro plotis neviršija 1 cm^{-1} , o trukmė yra (15-70) ps ribose;

- kaupinant λ_P bangos ilgio spinduliuote, parametrinio šviesos stiprinimo sinchronizmo sąlyga minėtame netiesiniame kristale yra tenkinama visame netiesinio kristalo skaidrumo diapazone;

- visame derinimo diapazone kiekviename išėjimo impulsų pakete (86, 87, 88) yra nuo 5 iki 10 iš eilės einančių išėjimo impulsų, kurių smailinė galia viršija 10 kW;

- išėjimo impulsų spektro plotis neviršija 10 cm^{-1} ;

- išėjimo spinduliuotės bangos ilgis yra tolygiai derinamas matomoje ir/arba artimojoje infraraudonojoje spektro srityje.

17. Šaltinis pagal 16 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad

- impulsų paketų formavimo ir stiprinimo modulio sudėtyje taip pat yra kietakūnis tiesinis stiprintuvas (37) ir harmonikų generavimo įrenginys (38);

- regeneracinio stiprintuvo (31) ir tiesinio stiprintuvo (38) bendras stiprinimo faktorius yra nemažesnis kaip 10^4 ;

- harmonikų generavimo įrenginio (38) efektyvumas viršija 25 %;

- išėjimo spinduliuotės bangos ilgis yra derinamas diapazone nuo 395 nm iki 2600 nm.

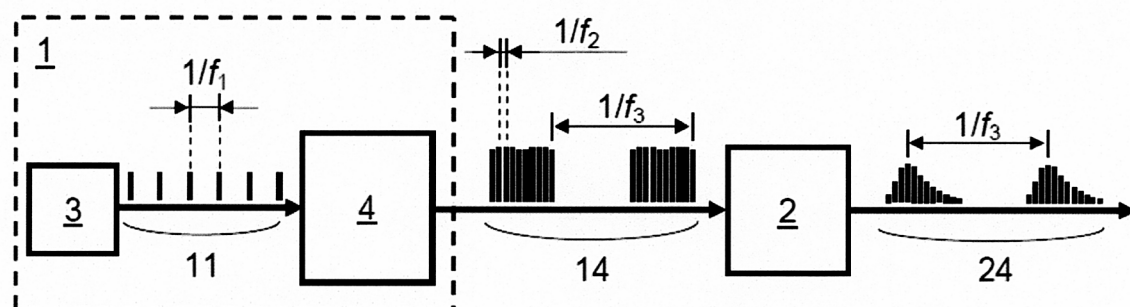


Fig.1A

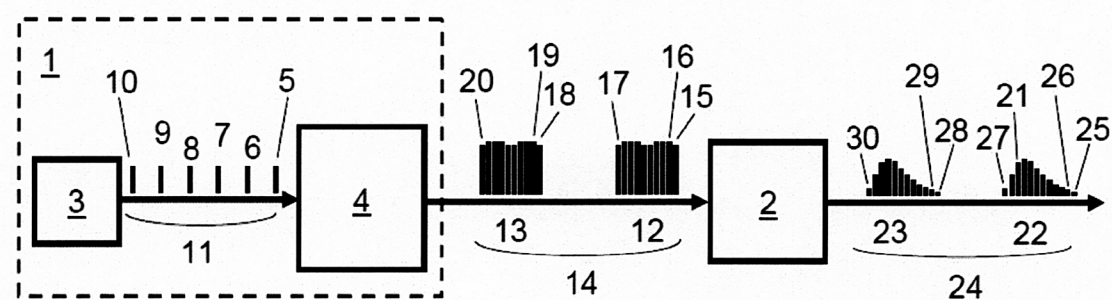


Fig.1B

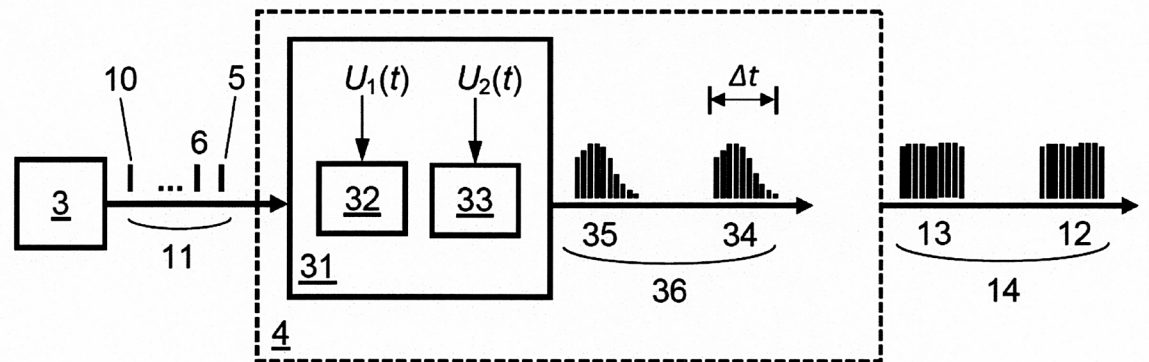


Fig.2

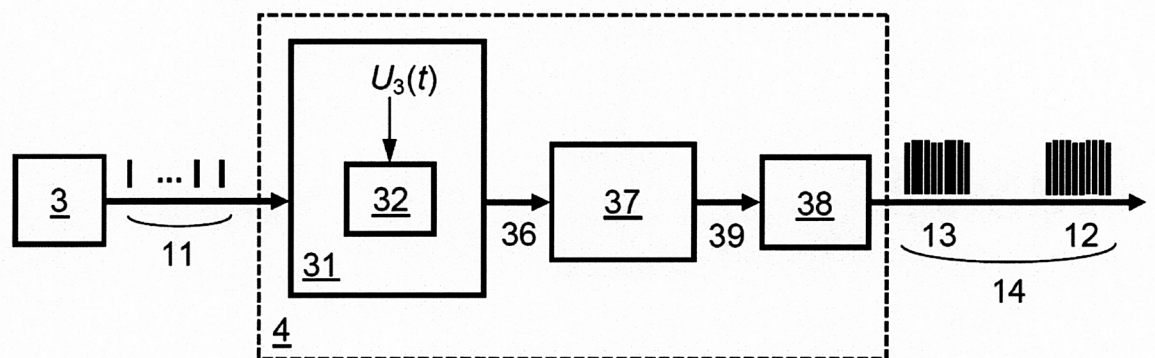


Fig.3

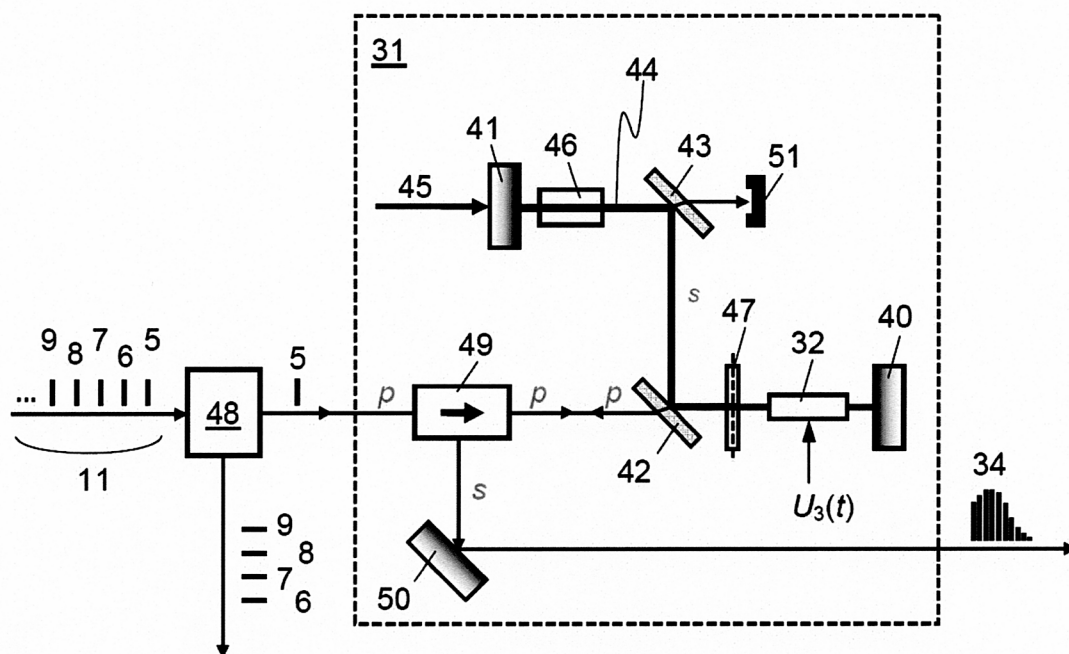


Fig.4

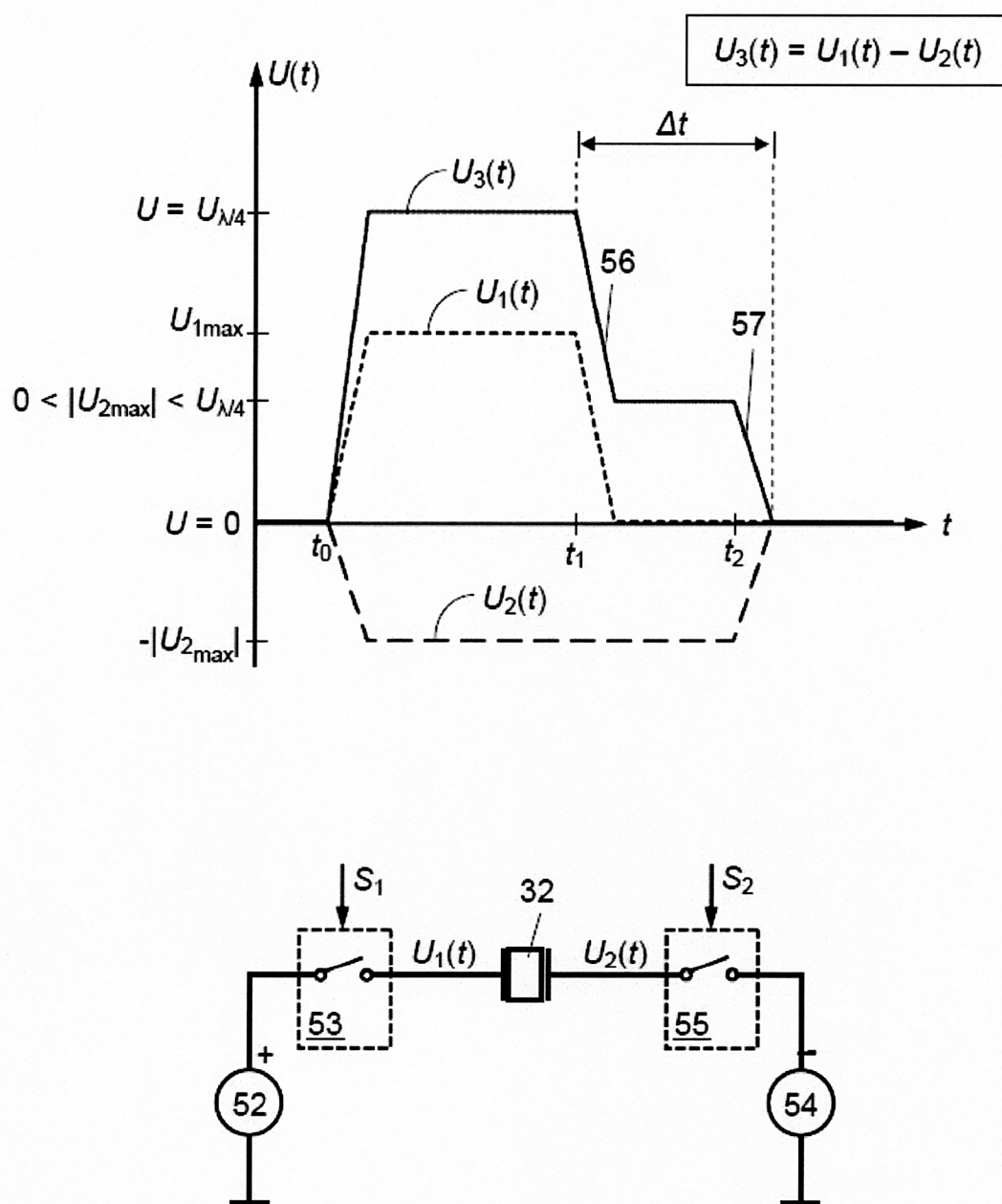


Fig.5

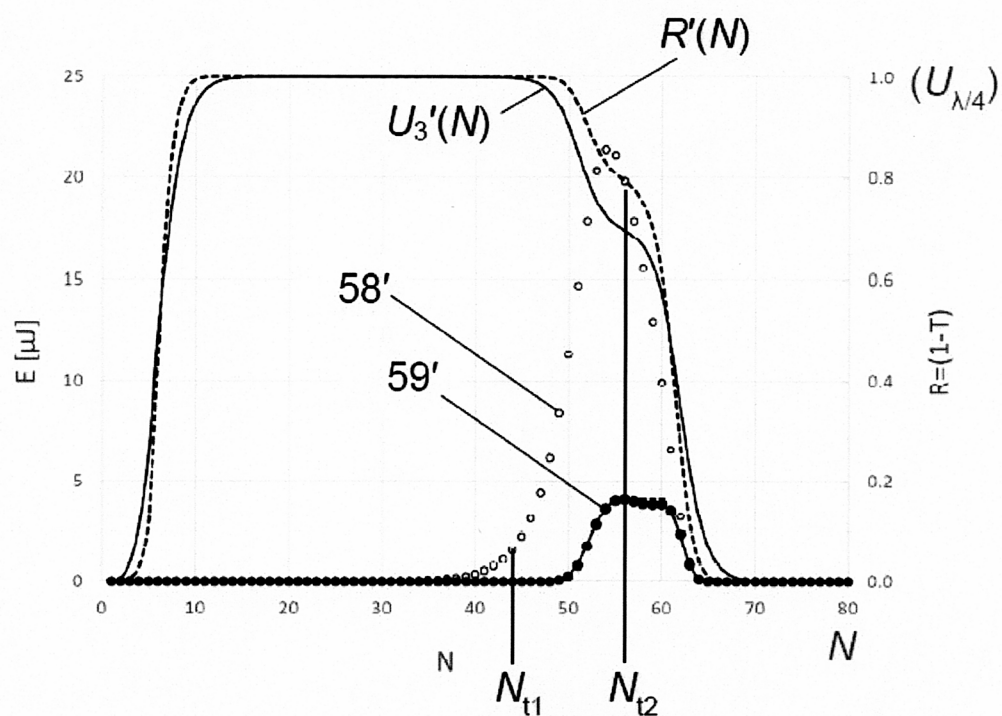


Fig. 6A

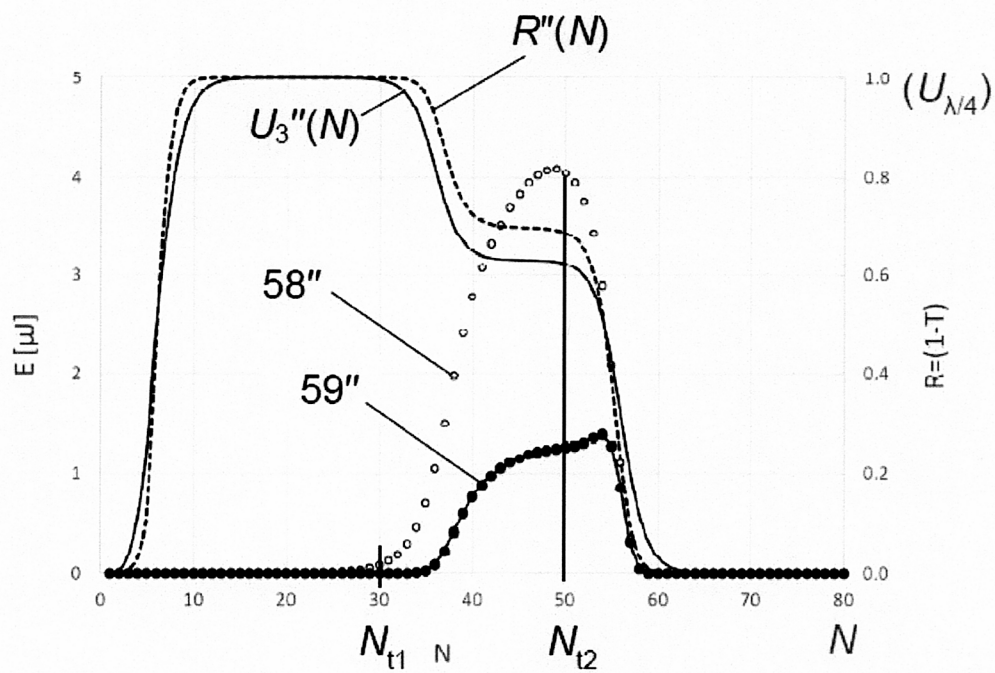


Fig. 6B

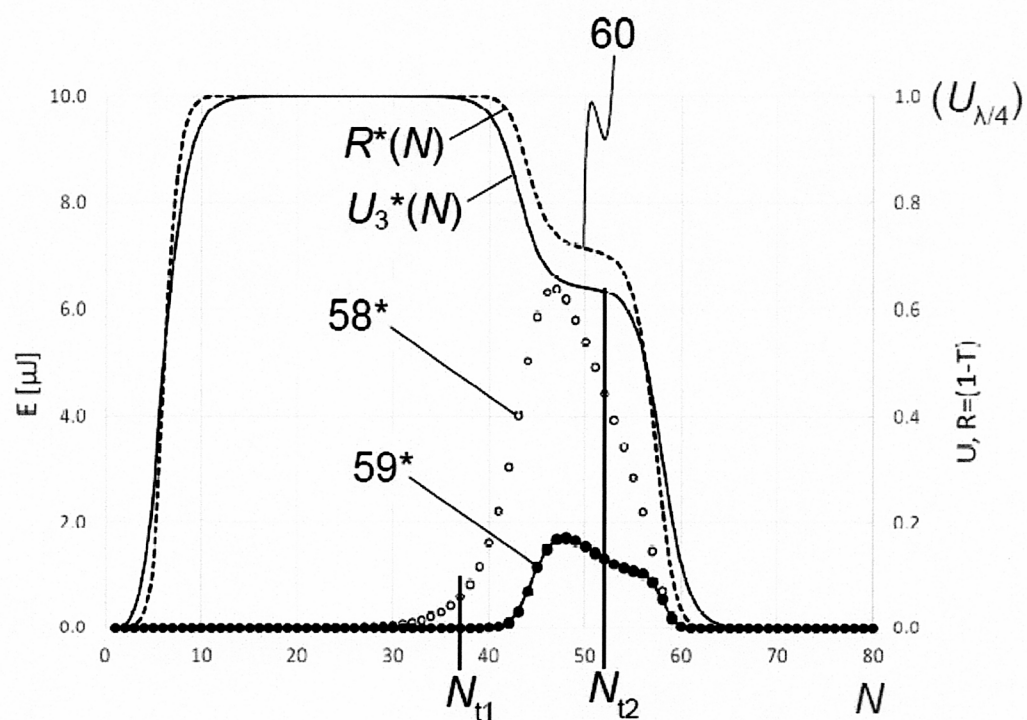


Fig.6C

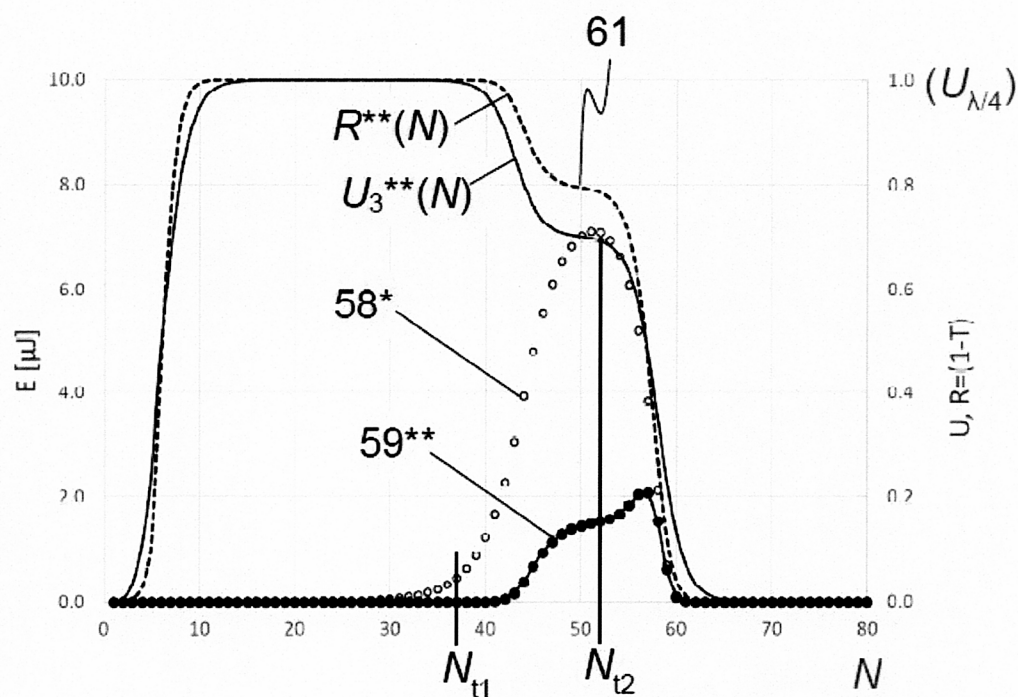


Fig.6D

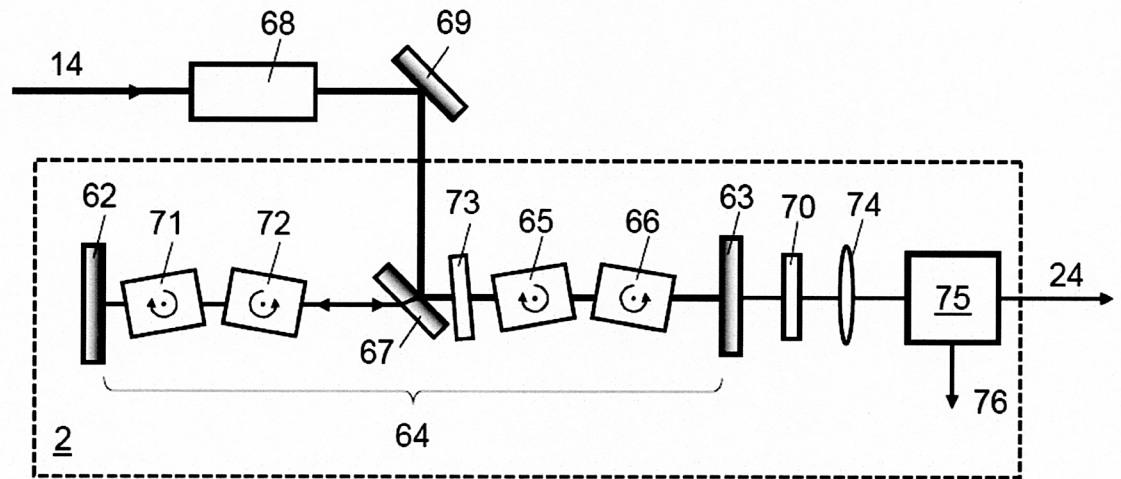


Fig.7A

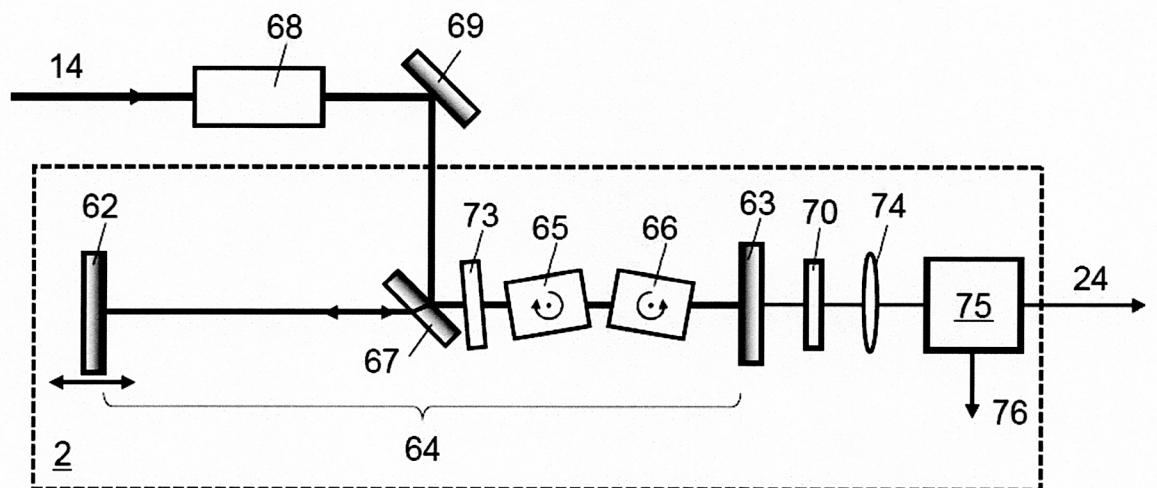


Fig.7B

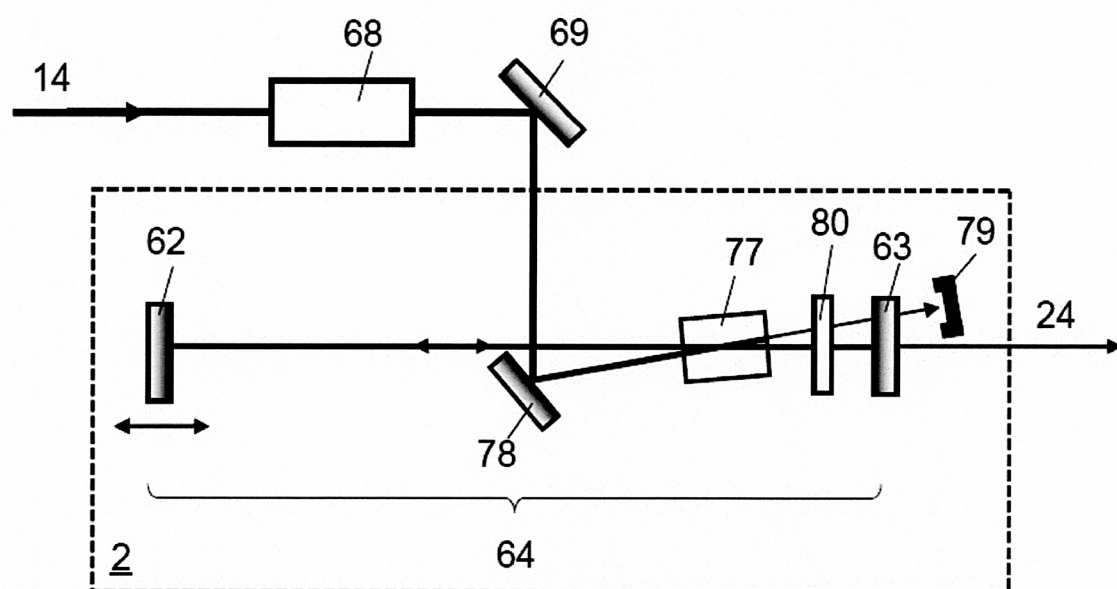


Fig.7C

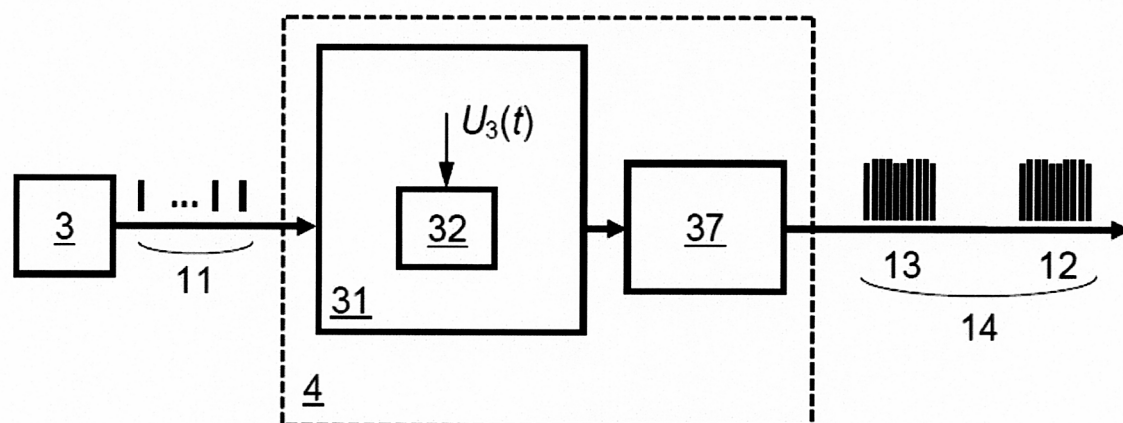


Fig.8

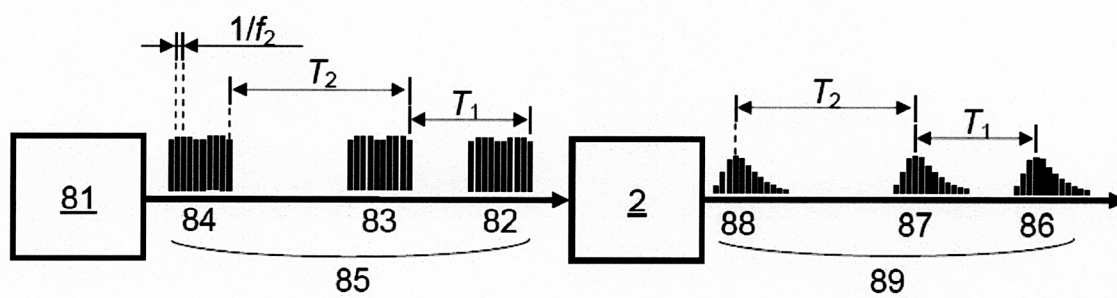


Fig.9