

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

(21) Paraiškos numeris: **2020 526**
(22) Paraiškos padavimo data: **2020-05-22**
(41) Paraiškos paskelbimo data: **2021-11-25**
(45) Patento paskelbimo data: **2021-12-10**

(73) Patento savininkas:
UAB „EKSPLA“, Savanorių pr. 237, LT-02300 Vilnius, LT
(72) Išradėjas:
Andrejus MICHAILOVAS, LT
Karolis MADEIKIS, LT
Tadas BARTULEVIČIUS, LT
(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:
Virgina Adolfina DRAUGELIENĖ, 8, UAB TARPINĖ, A.P.Kavoliuko g. 24-152, LT-04328 Vilnius, LT

LT 6875 B

(54) Pavadinimas:
Lazeris netiesinei mikroskopijai

(57) Referatas:

Išradimas yra susijęs su kompaktiškais ir patikimais lazeriniais įrenginiais, generuojančiais femtosekundinius impulsus infraraudonojoje spektrinėje srityje tarp 1,1 μm ir 1,5 μm. Netiesinei mikroskopijai skirtos lazerinės spinduliuotės generavimo įrenginys apima ultratrumpųjų kaupinimo impulsų voros šaltinį, optinį rezonatorių bei jame patalpintą kietakūnę netiesinę Ramano terpę. Didelio impulsų pasikartojimo dažnio ultratrumpųjų kaupinimo impulsų vora sinchroniškai kaupina trumpą optinį rezonatorių, ir Ramano terpėje sugeneruoja paslinkto bangos ilgio ultratrumpųjų impulsų vorą. Kaupinimo impulsų vora turi suformuotą gaubtinę: pirmasis kaupinimo impulsas yra didesnės energijos nei kiti kaupinimo impulsai. Pagrindiniame šio išradimo išpildyme pirmojo kaupinimo impulsų voros impulso energija yra didesnė, o antrojo ir po jo einančių kaupinimo impulsų energijos yra mažesnės už Ramano terpės kontinuumo generacijos slenkstį. Ramano terpė yra deimantas, KGW, KYW, YVO₃, GdVO₃ arba kiti kristalai, pasižymintys dideliu Ramano stiprinimu ir dideliu netiesiniu lūžio rodikliu. Yra generuojamas vienas arba keli paslinkti bangos ilgiai. Konversijos iš kaupinimo spinduliuotės į paslinkto bangos ilgio spinduliuotę efektyvumas yra ne mažesnis kaip 30 %, o prioritetiniame išpildyme – virš 50 %.

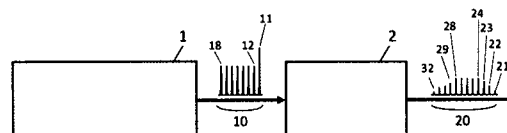


Fig.1

Technikos sritis

Išradimas yra susijęs su lazeriniais šaltiniais, ypač su netiesinei mikroskopijai skirtos lazerinės spinduliuotės šaltiniais. Labiausiai išradimas yra susijęs su kompaktiškais ir patikimais įrenginiais, priverstinės Ramano sklaidos pagalba generuojančiais ultratrumpuosius impulsus infraraudonojoje spektrinėje srityje tarp 1,1 μm ir 1,5 μm . Išradimas gali būti panaudotas netiesinės mikroskopijos prietaisuose biologinių audinių tyrimams.

Technikos lygis

Biologinių audinių netiesinei mikroskopijai yra reikalingi lazeriniai šaltiniai tarp 1,1 μm ir 1,5 μm , žiūr. L. van Huizen et al., "Second and third harmonic generation microscopy visualizes key structural components in fresh unprocessed healthy human breast tissue", J. Biophotonics 12, e201800297 (2019), M. Baluet al., "Effect of excitation wavelength on penetration depth in nonlinear optical microscopy of turbid media", J. Biomed. Opt. 14, 010508 (2009) ir D. Kobat et al., "In vivo two-photon microscopy to 1.6-mm depth in mouse cortex", J. Biomed. Opt. 16, 106014 (2011). Apšvietus artimosios infraraudonosios srities spinduliuote audiniuose sugeneruota antroji (IIH) arba trečioji (IIIH) harmonika yra audinių skaidrumo lange, todėl neturi destruktivaus poveikio ir yra lengvai registruojama.

Dėl riboto skaičiaus lazerinių šaltinių, kurie gali generuoti femtosekundinius impulsus šiame spektriniame diapazone, dažnai yra pasinaudojama netiesinė šviesos konversija. Viena iš technologijų - neelastinė šviesos sklaida dėl medžiagos, patekusios į elektromagnetinį lauką, molekulių ar jonų virpesių, dar vadinama Ramano sklaida. Yra kuriami Ramano lazeriai, kuriuose kaupinimo spinduliuotės bangos ilgis Ramano terpėje yra paslenkamas tam tikru, tai terpei būdingu, dydžiu. Generuojama didesnio bangos ilgio dedamoji, vadinama stoksine, ir mažesnio bangos ilgio dedamoji, vadinama antistoksine. Procesas vyksta pasiekus tam tikrą slenkstinę kaupinimo spinduliuotės intensyvumo vertę. Esant efektyviai šviesos konversijai, prasideda kaskadiniai reiškiniai: pirmos eilės stoksinė banga tampa nauju kaupinimu antros eilės stoksinei bangai generuoti, ir t. t. Pavyzdžiui, 1030 nm bangos ilgio kaupinimo spinduliuotė deimanto kristale gali sugeneruoti 1194 nm bangos ilgio pirmos eilės stoksinę bangą, o ši – 1420 nm antros eilės stoksinę bangą. 1064 nm bangos ilgio kaupinimo spinduliuotė atitinkamai gali sugeneruoti 1240 nm ir 1485 nm bangos ilgio

Ramano spinduliuotę. Procesas prasideda iš kvantinių triukšmų, ir vadinamas spontanine Ramano sklaida. Tačiau pirmieji sugeneruoti paslinkto bangos ilgio kvantai tampa užkratu, kurie efektyviai stiprinami kaupinančio lazerio spinduliuote, tad procesas virsta priverstine Ramano sklaida. Tai yra priverstinės Ramano sklaidos lazerių veikimo principas. Ramano lazeriai remiasi netiesiniu bangos ilgio keitimu, todėl turi turėti kaupinimo spinduliuotės šaltinį. Kartais keitimas į Ramano bangos ilgį yra realizuojamas, patalpinant netiesinį kristalą į kaupinančio lazerio rezonatorių. Turint dviejų bangos ilgių šaltinius, kurių bangos ilgių skirtumai atitinka Stokso poslinkį, realizuojamas Ramano stiprinimas, t.y. silpnesnė banga stiprinama stipresnės bangos sąskaita.

Tipinės Ramano terpės yra: optinės skaidulos, bangolaidinės struktūros bei įvairūs kristalai: deimantas, $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ (sutrumpintai - KGW), $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ (sutrumpintai - KYW), LiIO_3 , NaNO_3 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, GdVO_4 , YVO_3 , GdVO_3 , BaWO_4 , SrWO_4 , PbWO_4 ir kt. Minėtos medžiagos pasižymi aukštu priverstinės Ramano sklaidos efektyvumu. Priverstinė Ramano sklaida taip pat vyksta dujose ir skysčiuose, bet jie nelabai tinka didelės vidutinės galios, didelio pasikartojimo dažnio Ramano lazeriams dėl to, kad šiluminiai reiškiniai išdaro pluoštus iki visiško generacijos nutraukimo. Iš kristalinių terpių dažniausiai naudojami KGW ir $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$. Pastaruoju metu vis daugiau dėmesio kaip Ramano terpė sulaukia sintetinis deimantas. Efektyvumas ir Ramano poslinkis priklauso nuo kristalo sandaros ir kristalografinės krypties. Deimantas yra viena iš pirmųjų medžiagų, kurioje buvo pademonstruotas priverstinės Ramano sklaidos reiškinys, tačiau plačiai naudoti pradėtas tik neseniai - praktinių dydžių kristalai yra užauginami tik panaudojant cheminio garų nusodinimo technologiją. Deimantas pasižymi dideliu Ramano poslinkiu (1332 cm^{-1}), Ramano stiprinimo koeficientu ($\sim 10 \text{ cm/GW}$ ties $1 \mu\text{m}$, kaupinant ns impulsais) ir plačia skaidrumo sritimi. Geras šiluminis laidumas leidžia naudoti didelės vidutinės galios sistemose.

Yra žinomi tiek impulsine, tiek ir nuolatine spinduliuote kaupinami Ramano lazeriai. Pirmuosiuose Ramano lazeriuose Ramano terpė buvo patalpinta nanosekundinio moduluotosios kokybės laisvos erdvės lazerio rezonatoriaus viduje. Vėliau išvystyti skaiduliniai Ramano lazeriai, kurie dėl didelio sąveikos ilgio ir šviesolaidiniams elementams būdingos savybės išlaikyti kaupinimo spinduliuotę siauroje gijoje leido realizuoti nuolatinės veikos režimą. Taip pat yra žinomi sprendimai, kuriuose kaupinimo spinduliuotės lazerinis šaltinis yra atskiras, o Ramano terpė yra

patalpinama atskirame išoriniame optiniame rezonatoriuje. Impulsiniai kaupinimo šaltiniai pasižymi didesne smailine galia (didesniais momentiniais intensyvumais), tad užtikrinamos geresnės sąlygos netiesiniams efektams vykti. Siekiant gauti ultratrumpuosius Ramano spinduliuotės impulsus, kaupinimo impulsai taip pat turi būti ultratrumpieji. Dėl ypač didelės ultratrumpųjų impulsų smailinės galios Ramano sklaidos efekto momentinis efektyvumas yra geresnis, tačiau dėl itin trumpo sąveikos laiko netiesinės Ramano sklaidos efektyvumas smarkiai sumažėja, ir dažniausiai reikalingas sinchroninio kaupinimo sprendimas.

Dėl neelastinės sklaidos prigimties stoksinės (arba antistoksinės) bangos impulsas sugeneruojamas su užlaikymu kaupinimo impulso atžvilgiu. Todėl didžiausias konversijos efektyvumas sinchroninio kaupinimo schemeje yra pasiekiamas, kuomet yra nedidelis, nuo kelių iki kelių dešimčių mikrometrų eilės, išorinio Ramano rezonatoriaus ir kaupinimo šaltinio rezonatoriaus išderinimas - Ramano rezonatoriaus apėjimo laikas turi būti mažesnis už kaupinimo impulsų periodą. Didžiausia smailinė galia gaunama, kai išderinimo nėra arba Ramano rezonatoriaus apėjimo laikas yra netgi ilgesnis už kaupinimo impulsų periodą. Net jei fazinė savimoduliacija bei spektro platėjimas nepasireiškia, dėl stoksinės bangos impulso vėlavimo, grupinių greičių nesutapimo bei kaupinimo impulso išsekimo pasiekiamas impulso sutrumpėjimas (dažniausiai konversijos efektyvumo sąskaita, tačiau smailinė galia išlieka didelė). Priklausomai nuo siekiamų tikslų, yra pasirenkamas optimalus rezonatoriaus ilgis.

Kaupinant gerai išvystytą ties $1\ \mu\text{m}$ lazerių fundamentinę spinduliuotę, pasiekiami artimoji infraraudonoji spektrinė sritis virš $1,1\ \mu\text{m}$, kaupinant minėtų lazerių antra harmonika - užpildomas spektrinis langas matomos šviesos srityje tarp $590\ \text{nm}$ ir $750\ \text{nm}$. Netiesinei biologinių audinių mikroskopijai ypač reikalingi infraraudonosios spektrinės srities bangos ilgiai. Spektrinė sritis tarp $1,1\ \mu\text{m}$ ir $1,5\ \mu\text{m}$ yra optimaliausia sritis netiesinei spektroskopijai, nes jos bangos ilgių sugeneruota IIH ir/arba IIIH biologiniuose audiniuose vis dar yra audinių skaidrumo lange, o Ramano lazerio kaupinimo spinduliuotė gali būti sugeneruojama efektyviais Nd- arba Yb- jonų lazeriais. Kita idealaus lazerio netiesinei mikroskopijai savybė yra didelis impulsų smailinis intensyvumas, kurią suteikia ultratrumpieji - pageidautina femtosekundiniai - impulsai, generuojami dideliu pasikartojimo dažniu. Lazerių, generuojančių audinių skaidrumo lange, naudojimas leidžia patikimai registruoti netiesinius signalus neviršijant audinių

pažeidimo slenksčio.

Skaiduliniuose Ramano lazeriuose priverstinė Ramano sklaida vyksta toje pačioje aktyviojoje skaiduloje, kurioje sugeneruojamas kaupinimo bangos ilgis, arba atskiroje nuo kaupinimo šaltinio optinėje skaiduloje. Juose susiduriama su dispersijos suvaldymo uždaviniais. (žiūr., pavyzdžiui, E. A. Golovchenko et al., "Theoretical and experimental study of synchronously pumped dispersion-compensated femtosecond fiber Raman lasers", J. Opt. Soc. Am. B 7, 172-181 (1990) arba JAV patente nr. US4685107 (J. D. Kafka et al.). O jei dispersija nėra suvaldoma, tai trukmė neišlaikoma, krenta smailinė galia ir sumažėja priverstinės Ramano sklaidos proceso efektyvumas.

Didesnės smailinės galios pasiekiamos naudojant tūrines Ramano terpes - kristalus. O turint tokią kaupinimo spinduliuotės smailinę galią, su kuria jau pasireiškia fazinė savimoduliacija ir spektro platėjimas, bet dar neviršijamas kristalo pažeidimo slenkstis, galima pasiekti reikšmingą Ramano spinduliuotės impulso trukmės sumažėjimą - stoksinės (arba antistoksinės) bangos impulsai už kaupinimo impulsus bus trumpesni net kelis kartus.

M. Murtagh et al., "Efficient diamond Raman laser generating 65 fs pulses", Opt. Express 23, 15504-15513 (2015) aprašytas femtosekundinių impulsų sinchroniškai kaupinamas Ramano lazeris, apimantis:

- 796 nm kaupinimo spinduliuotės šaltinį, tiekiantį 194 fs trukmės kaupinimo impulsus,
- optinį rezonatorių su viduje patalpintu 8 mm ilgio deimanto kristalu; rezonatorius yra sudarytas iš 4-ių veidrodžių, suformuojančių žiedinę šviesos spinduliuotės trajektoriją,
- bei už rezonatoriaus ribų esančio impulsų spaustuvo.

Kaupinimui panaudotas sinchronizuotų modų titano-safyro osciliatorius, kurio maksimali išvadinė galia siekė 3,1 W (~38 nJ). Priverstinė Ramano sklaida prasidėdavo nuo 0,74 W kaupinimo galios, o paskui Ramano spinduliuotės (890 nm) galia augo tiesiškai iki 0,82 W ties maksimalia kaupinimo galia. Pasiektas konversijos iš kaupinimo į stoksinę bangą efektyvumas – 26 %. Po impulsų suspaudimo, gauta 65 fs impulsų trukmė, tad smailinė galia apie 157 kW. Ramano rezonatoriaus ilgis siekė ~3,75 m ilgį, kad būtų sinchroniškai kaupinamas 80 MHz pasikartojimo dažnio

kaupinimo impulsų nuolatine seka.

J. Lin and D. J. Spence, "Diamond Raman laser generating 25.5 fs pulses", Advanced Solid State Lasers, OSA Technical Digest, ATu4A.8 (2015) aprašytas panašus femtosekundinių impulsų sinchroniškai kaupinamas Ramano lazeris, apimantis:

- ~800 nm kaupinimo spinduliuotės šaltinį, tiekiantį 128 fs trukmės kaupinimo impulsus,

- optinį rezonatorių su viduje patalpintu 8 mm ilgio deimanto kristalu; rezonatorius yra sudarytas iš 6-ių veidrodžių, suformuojančių žiedinę šviesos spinduliuotės trajektoriją ir kontroliuojančių rezonatoriaus dispersiją (2 veidrodžiai yra čirpuoti, o rezonatoriaus viduje cirkuliuojantis impulsas į juos atsispindi nuo 6 iki 10 kartų kiekviename rezonatoriaus apėjime),

- bei už rezonatoriaus ribų esančio impulsų spaustuvo.

3 W galios, 80 MHz impulsų pasikartojimo dažnio titano-safyro kaupinimo šaltiniu gauta 0,38 W išvadinė galia (energija 4,75 nJ) ties 890 nm, t.y. konversijos į stoksinę bangą efektyvumas - 12,7 %. Ramano rezonatoriaus viduje realizuojant dispersijos kontrolę, išlaikyta itin didelė smailinė galia ir dėl fazinės savimoduliacijos pasiektas žymus spektro išplatėjimas. Rezultate gauti 134 fs trukmės impulsai tiesiai iš rezonatoriaus ir 25,5 fs po spaudimo išoriniu prizminiu impulsų spaustuvu. Tai atitinka didelę 186 kW smailinę galią. Tačiau, kadangi kaupinimo impulsai yra femtosekundiniai, išvadinė galia yra labai jautri Ramano rezonatoriaus ilgio išderinimui - pasirinktą ilgį reikia išlaikyti kelių mikrometrų tikslumu.

Galingesniais titano-safyro lazeriais kaupinami Ramano lazeriai pasiekia įspūdingą konversijos efektyvumą ir impulsų trukmės sumažėjimą. Deja, jie veikia ant audinių skaidrumo diapazono krašto. IIH, o juo labiau IIIH signalai patenka į audinių sugerties diapazoną. Tipinis 80 MHz impulsų pasikartojimo dažnis lemia gana didelius ir Ramano rezonatoriaus gabaritus. Brangus ir sudėtingas bei aptarnavimo reikalaujantis lazerinis šaltinis panaudotas netiesinės mikroskopijos sistemoje, padaro visą sistemą itin brangią. Netiesinei mikroskopijai tinkantys bangos ilgiai ties arba virš 1,1 μm su titano-safyro kaupinimo lazeriu yra generuojami tik kaskadiniame sprendime (žiūr. M. Murtagh et al., "Ultrafast second-Stokes diamond Raman laser", Opt. Express 24, 8149-8155 (2016)), tačiau konversijos efektyvumas yra ne didesnis nei 20 %, o

impulsas yra žymiai ilgesnis už kaupinimo impulsą, nes yra čirpuotas ir turi sudėtingą fazės profilį, dėl kurio yra sunkiai spaudžiamas.

Nesiekiant rekordiškai mažų impulso trukmių ir itin didelių smailinių galių, ieškoma paprastesnių bei pigesnių už titano-safyro lazerius kaupinimo šaltinių. A. M. Warrier et al., "Highly efficient picosecond diamond Raman laser at 1240 and 1485 nm", Opt. Express 22, 3325-3333 (2014) aprašytas pikosekundinių—impulsų sinchroniškai kaupinamas Ramano lazeris, apimantis:

- pikosekundinį (15 ps) 1064 nm kaupinimo spinduliuotės šaltinį,
- optinį rezonatorių, sudarytą iš 4-ių veidrodžių, suformuojančių žiedinę šviesos spinduliuotės trajektoriją,
- ir jo viduje patalpinto 8 mm ilgio deimanto kristalo.

Kaupinimui panaudotas Nd:YVO₄ sinchronizuotų modų 80 MHz lazeris, kurio vidutinė galia siekė 4,8 W (60 nJ). Parinkus Ramano rezonatoriaus ilgį tokį, kad priverstinės Ramano sklaidos slenkstis būtų mažiausias (kaupinimo galia 1,53 W), ties maksimalia kaupinimo galia Ramano spinduliuotės (1240 nm) vidutinė galia siekė 2,75 W. Gautas itin didelis konversijos į paslinko bangos ilgio spinduliuotę efektyvumas (59 %). 1240 nm bangos ilgio spinduliuotės impulso trukmė priklauso nuo rezonatoriaus ilgio: ties maksimalia išvadine galia – 12 ps, o pailginus rezonatorių – 9 ps (bet galia nukrenta iki ~1,8 W). Taigi galima gauti smailinę galią lygią 2,8 kW arba 2,5 kW ties 1240 nm. Kadangi fazinė savimoduliacija nepasireiškia, impulso trukmės sumažėjimo, kurį galima pasiekti su femtosekundiniais kaupinimo šaltiniais, realizuoti nepavyksta. Antra vertus, kaupinant pikosekundiniais impulsais, nereikia rūpintis dispersijos kontrole ir impulso spaudimu. Be to, Ramano spinduliuotės galia ir trukmė žymiai mažiau priklauso nuo rezonatoriaus ilgio suderinimo - rezonatoriaus ilgį reikia palaikyti dešimties mikrometrų tikslumu. Pagal antrąjį A. M. Warrier et al. sprendimo išpildymą, sudaromos sąlygos antros eilės stoksinės bangos generacijai. Tuomet išspinduliuojami 2 bangos ilgiai – 1240 nm ir 1485 nm. Antros eilės stoksinės bangos galia gali siekti iki 1 W ties maksimaliu 4,8 W kaupinimu, kas atitinka 21 % konversijos į 1485 nm efektyvumą, tačiau yra didesnis jautrumas rezonatoriaus ilgio pokyčiams. Impulso trukmė ties maksimalia išvadine galia – 10 ps, o mažiausia trukmė – 6 ps, tačiau smailinė galia sumažėja (galima turėti iki 1,25 kW smailinės galios ties 1485 nm). Taigi nors Ramano spinduliuotės impulsų trukmė yra mažesnė už kaupinimo

impulsų trukmę, smailinė galia krenta. Paprastesnis, pigesnis ir mažesnių gabaritų pikosekundinis kaupinimo šaltinis padaro paprastesnę bei pigesnę ir visą sistemą, tačiau netiesinės mikroskopijos taikymams labiau reikalingi femtosekundiniai impulsai.

Dirbti su nuolatinę seką generuojančiais sinchronizuotų modų kaupinimo lazeriais yra patogiau tuo, kad, nors procesas prasideda iš kvantinių triukšmų tik pačioje sekos pradžioje, vėliau procesas stabilizuojasi - priverstinė Ramano vyksta rezonatoriaus viduje cirkuliuojant pakankamo dydžio užkratui. Stiprinimas soties režime užtikrina aukštą konversijos efektyvumą ir didžiausią impulso sutrumpėjimą. Užtikrinus pastovų rezonatoriaus ilgį, galima gauti stabilią Ramano spinduliuotės seką. Tačiau, kaip jau minėta, tipinis nuo dešimčių MHz iki 100 MHz kaupinimo impulsų pasikartojimo dažnis lemia Ramano rezonatoriaus ilgį, lygų keliems metrams. Tokia sistema kelia didelių reikalavimų stabilizacijos sistemai, ir negali būti kompaktiška. Ilgas rezonatorius yra jautresnis mechaniniams ir šiluminiais poveikiams, o kompaktizuojant, jo opto- mechaninė schema darosi sudėtinga.

Siekiant turėti praktišką lazerinę sistemą netiesinei mikroskopijai, reikia, kad ir kaupinimo impulsų lazeris, ir sistemos dalis, kurioje vykdoma priverstinė Ramano sklaida, būtų kompaktiški.

E. P. Perillo et al., "Two-color multiphoton in vivo imaging with a femtosecond diamond Raman laser", Light Sci. Appl. 6, e17095-e17095 (2017) aprašyta kompaktiška ir nebrangi netiesinei mikroskopijai skirta lazerinė sistema, paremta sinchroniniu rezonatorium su viduje patalpinta Ramano terpe kaupinimu. Femtosekundinių impulsų sinchroniškai kaupinamas Ramano lazeris, apima:

- femtosekundinį Yb skaidulinį kaupinimo spinduliuotės šaltinį,
- optinį rezonatorių, sudarytą iš 6-ių veidrodžių, suformuojančių žiedinę šviesos spinduliuotės trajektoriją bei sutalpinantis ilgą rezonatorių į mažesnę erdvę,
- jo viduje patalpinto 8 mm ilgio deimanto kristalo
- bei dviejų prizmių impulsų spaustuvo.

3 W vidutinės galios skaidulinis kaupinimo šaltinis yra sudarytas iš sinchronizuotų modų osciliatoriaus (užduodančiojo generatoriaus) ir galios stiprintuvo. Stiprintuvo parametrai yra parenkami taip, kad netiesinis spektro plėtėjimas ir skaidulos dispersija būtų subalansuoti, ko pasekoje impulsai įgytų tik tiesinį čirpą, kurį

galima panaikinti gardelinį impulsų spaustuvą. Kaupinimo šaltinio išėjime gaunama 150 fs trukmės 80 MHz impulsų pasikartojimo dažnio nuolatinė seka. ~3,75 m Ramano rezonatoriaus optinis ilgis atitinka kaupinimo impulsų pasikartojimo periodą, tačiau dėl papildomų veidrodžių sutalpinamas į <1 m ilgio erdvę. Yra galimybė tiksliai rezonatoriaus ilgio paderinimui. Sugeneruota Ramano spinduliuotė kiekviename rezonatoriaus apėjime išmetama per 8 % pralaidumo veidrodį. Plataus spektro spinduliuotė dėl didelės deimanto kristalo dispersijos iš Ramano rezonatoriaus išeina šiek tiek čirpuota, dėl ko prireikė išorinio impulsų spaustuvo. Visos sistemos išėjime gaunama 300 mW vidutinė galia stoksinės bangos (1240 nm) 100 fs trukmės impulsų voroje, kas atitinka ~30 kW smailinę galią. Sistema gaunasi gana kompaktiška dėl dviejų priežasčių: dėl to, kad kaupinimo šaltinis yra skaidulinis, ir dėl įvestų papildomų veidrodžių Ramano rezonatoriuje. Nors bendra sistemos kaina gavosi bent dukart mažesnė už analogiškos sistemos su titano-safyro kaupinimo lazeriu kainą, žemas optinis efektyvumas - maždaug 10 % - indikuoja, kad parametrų rinkinys nebuvo optimaliai parinktas. Papildomi veidrodžiai didina rezonatoriaus nuostolius, o reikalavimai beveik 4 m optinio ilgio rezonatoriaus stabilizacijos sistemai praktiškai nesumažėja.

Kompaktiškas išorinio-rezonatoriaus konfigūracijos Ramano lazeris gali būti realizuotas, jei kaupinimo impulsų seka iš sinchronizuotų modų lazerio būtų itin didelio dažnio. Yra išvystyti skaiduliniai ir puslaidininkiniai šaltiniai, išduodantys nuolatinę GHz impulsų pasikartojimo dažnio seką, tačiau jų impulsų energija yra nepakankama priverstinei Ramano sklaidai sukelti.

Artimiausi pagal techninę esmę yra X. Gao et al. sprendimai, aprašyti šiuose straipsniuose: X. Gao et al., "Compact KGd(WO₄)₂ picosecond pulse-train synchronously pumped broadband Raman laser", Appl. Opt. 55, 6554-6558 (2016) ir X. Gao et al., "Study on picosecond collinear eight Stokes Raman laser generation", Appl. Opt. 56, 1383-1387 (2017). Kompaktiški ultratrumpųjų impulsų sinchroniškai kaupinami Ramano lazeriai apima:

- pikosekundinį (30 ps) kietakūnių Nd:YVO₄ ir Nd:YAG terpių pagrindu pagamintą kaupinimo spinduliuotės šaltinį,
- 2-jų veidrodžių optinį rezonatorių
- ir jo viduje patalpinto 50 mm ilgio KGW kristalo.

Kaupinimo spinduliuotės šaltinis dirba impulsų vorų režimu: sinchronizuotų modų Nd:YVO4 osciliatoriaus impulsas patenka į impulsų vorų formuotuvą, ir tuomet suformuota vora yra stiprinama regeneraciniame Nd:YAG stiprintuve, vėliau dar sugeneruojama antra harmonika.

X. Gao et al. (2016) straipsnyje kaupinimo šaltinis generuoja 532 nm bangos ilgio kaupinimo impulsų vorą, sudarytą iš 6 impulsų, kuri pasikartoja 1 kHz pasikartojimo dažniu, o impulsų pasikartojimo dažnis voros viduje lygus 1,25 GHz. Bendras voros ilgis lygus 4 ns, o pavienių impulsų trukmė – 30 ps. Kadangi impulsų periodas voros viduje yra tik 800 ps, sinchroniškai kaupinamas Ramano rezonatorius yra itin trumpas - tik ~70 nm geometrinio ilgio. Kadangi yra siekiama gauti bangos ilgio plačioje spektrinė srityje, vienas rezonatoriaus veidrodis yra pralaidus kaupinimo spinduliuotei ir didelio atspindžio koeficiento paslinkto bangos ilgio spinduliuotei, o kitas - turi 2 % pralaidumą spinduliuotei nuo 532 nm iki 650 nm. Šiame sinchroniškai kaupinamame Ramano lazeryje yra sugeneruojami keli paslinkti bangos ilgiai: 558 nm (1-mos eilės stoksinė banga), 588 nm (2-os eilės), 621 nm (3-ios eilės), 658 nm (4-os eilės) ir 699 nm (5-os eilės), kurie kartu su likutine kaupinimo spinduliuote yra dalinai išmetami per kiekvieną rezonatoriaus apėjimą. Kadangi panaudojamas didelės galios kaupinimo šaltinis, gauta 270 mW vidutinė galia (1 kHz). Tačiau bendras visos plačiajuostės išėjimo spinduliuotės galios naudingumas neviršija 8 %, o nuo tam tikros kaupinimo galios pradeda ir mažėti.

X. Gao et al. (2017) straipsnyje impulsų vora sumažinama iki 4 impulsų, o Ramano rezonatoriaus konfigūracija pakeista taip, kad sumažintų kaupinimo pluošto modos dydį. Išvadinio veidrodžio pralaidumas padidintas iki 5 % bangos ilgiams nuo 500 nm iki 750 nm, iki 20 % 800 nm bangos ilgiui ir net iki >90 % ilgesniems bangos ilgiams. Mažiau impulsų pasirinkta tik dėl to, kad sprendime panaudotas vorų formuotuvą negalėjo užtikrinti identiško impulsų periodo voros viduje, kas sukeldavo nestabilumą. Kaupinimo modos sumažinimas stipriai pagerino konversijos efektyvumą, ko pasekoje net ir su 4 kaupinimo impulsais voroje buvo gautas ~30 % konversijos į 8-ųjų stoksinių eilių Ramano spinduliuotę. Konversijos į pirmos eilės stoksinės bangos spinduliuotę efektyvumas lygus ~6 %.

Naujas kaupinimo metodas - impulsų voromis - leido sumažinti Ramano rezonatoriaus ilgį iki labai mažų matmenų, tačiau turi ir keletą trūkumų. Pirma, kiekvienos kaupinimo impulsų voros pradžioje priverstinės Ramano sklaidos procesas

prasideda iš kvantinių triukšmų. Turint didelės energijos kaupinimo impulsus, Ramano spinduliuotė išsivysto labai greitai, tačiau šį metodą būtų sunkiau pritaikyti mažesnės impulsų energijos kaupinimo šaltiniams. Antra, konversijos efektyvumas nesiekia 50 %. Trečia, pagal pasiūlytą metodą nėra galimybės suformuoti ilgesnį nei 6 impulsų vorą, arba, kas ypač aktualu, vienodo impulsų periodo vorą. Konversijos efektyvumo vertės rodo, kad soties režimas nebuvo pasiektas. Minėtas sprendimas negali pasiūlyti kompaktiško femtosekundinių impulsų generavimo įrenginio, tinkančio netiesinei mikroskopijai.

Išradimu siekiama sukurti lazerį, skirtą netiesinei mikroskopijai, kuris tenkintų šiuos reikalavimus:

- 1) būtų kompaktiškas, lengvai aptarnaujamas ir stabilus;
- 2) bangos ilgis būtų diapazone tarp $1,1\ \mu\text{m}$ ir $1,5\ \mu\text{m}$;
- 3) paslinkto bangos ilgio spinduliuotės impulsų trukmė būtų ($15\ \text{fs} - 1\ \text{ps}$) intervale;
- 4) pageidautina, kad smailinė galia būtų ne mažesnė kaip $1\ \text{MW}$;
- 5) impulsų voros pasikartojimo dažnis nemažesnis kaip $100\ \text{kHz}$;
- 6) konversijos iš kaupinimo spinduliuotės į Ramano spinduliuotę efektyvumas būtų bent 30 %, geriau 50 %;
- 7) užtikrintų gerą lazerinio pluošto kokybę.

Išradimo esmė

Pagal pasiūlytą išradimą lazeryje, skirtame netiesinei mikroskopijai, apimančiame pirmojo bangos ilgio λ_1 ultratrumpųjų kaupinimo impulsų voros šaltinį, optinį rezonatorių, sudarytą iš bent dviejų veidrodžių, ir minėtame optiniame rezonatoriuje patalpintą kietakūnę netiesinę Ramano terpę, kur ultratrumpųjų kaupinimo impulsų vora patenka į optinį rezonatorių, kurio optiniame kelyje yra patalpinta Ramano terpė, ir generuoja antrojo bangos ilgio λ_2 ultratrumpųjų impulsų vorą, o optinio rezonatoriaus ilgis yra parinktas taip, kad antrasis ir po jo einantys kaupinimo impulsai bent dalinai persikloja laike su minėto rezonatoriaus viduje cirkuliuojančiu antrojo bangos ilgio λ_2 spinduliuotės impulsu, kai jis sklinda per Ramano terpę, kuriame pirmasis kaupinimo impulsų voros impulsas yra didesnės energijos nei kiti kaupinimo impulsų voros impulsai, minėtas pirmasis kaupinimo impulsų voros

impulsas Ramano terpėje sugeneruoja plačiajuostę spinduliuotę, kurios spektrinė juosta perdengia antrą bangos ilgį λ_2 , ultratrumpųjų kaupinimo impulsų vorą sudaro nuo trijų iki keliasdešimties impulsų; kaupinimo impulsai yra nuo 30 fs iki 1 ps trukmės.

Pagal prioritetinius kitus šio išradimo išpildymus:

Pirmojo ultratrumpųjų kaupinimo impulsų voros impulso energija viršija Ramano terpės kontinuumo generacijos slenkstį, o antrojo ir po jo einančių kaupinimo impulsų energija yra mažesnė už Ramano terpės kontinuumo generacijos slenkstį.

Ramano terpė yra deimantas, KGW, KYW, YVO₃, GdVO₃ arba kiti kristalai, pasižymintys dideliu Ramano stiprinimu ir dideliu netiesiniu lūžio rodikliu, leidžiančiu pirmuoju kaupinimo impulsu gauti savifokusavimąsi ir kontinuumo generaciją.

Ultratrumpųjų kaupinimo impulsų vora pasikartoja ne mažesniu kaip 100 kHz dažniu.

Likutinė kaupinimo spinduliuotė po vieno praėjimo per Ramano terpę yra išvedama iš minėto optinio rezonatoriaus.

Optinis rezonatorius, kurio optiniame kelyje yra patalpinta Ramano terpė, yra žiedinis rezonatorius, sudarytas iš bent trijų veidrodžių, minėto rezonatoriaus optinis ilgis yra nuo 10 cm iki 60 cm, o ultratrumpųjų kaupinimo impulsų pasikartojimo dažnis voros viduje yra intervale nuo 0,5 GHz iki 3 GHz.

Optinis rezonatorius apima du veidrodžius, kurie yra suformuoti ant Ramano terpės galų užgarinant optines dangas, o ultratrumpųjų kaupinimo impulsų pasikartojimo dažnis voros viduje yra intervale nuo 10 GHz iki 50 GHz.

Antrojo bangos ilgio λ_2 spinduliuotės impulsų trukmė yra intervale nuo 15 fs iki 1 ps, o smailinė galia yra ne mažesnė kaip 1 MW.

Kaupinimo impulsų voros suminė energija yra tokia, kad energijos konversijos iš kaupinimo spinduliuotės į paslinkto bangos ilgio spinduliuotę efektyvumas yra ne mažesnis kaip 30 %.

Vienas iš optinio rezonatoriaus veidrodžių yra pritvirtintas ant pjezo-transliatoriaus, kurio padėtis grįžtamuoju ryšiu yra valdoma, siekiant stabilizuoti minėto rezonatoriaus ilgį.

Kaupinimo impulsų pasikartojimo dažnis voros viduje yra valdomas realiu

laiku.

Ultratrumpųjų kaupinimo impulsų voros energija yra nuo 3 μJ iki 30 μJ

Ultratrumpųjų kaupinimo impulsų voros energija yra nuo 30 μJ iki 300 μJ .

Optinio rezonatoriaus veidrodžiai yra tokie, kad iš rezonatoriaus yra išvedama ne mažesnė kaip 10 % dalis antrojo bangos ilgio λ_2 spinduliuotės energijos, o kita antrojo bangos ilgio λ_2 spinduliuotės energijos dalis lieka cirkuliuoti minėtame rezonatoriuje.

Ramano terpėje yra sugeneruojami daugiau negu vienas paslinktas bangos ilgis: antrojo bangos ilgio λ_2 spinduliuotė sukelia trečiojo bangos ilgio λ_3 spinduliuotės generaciją.

Ramano terpėje yra sugeneruojami daugiau negu du paslinkti bangos ilgiai: antrojo bangos ilgio λ_2 spinduliuotė sukelia trečiojo bangos ilgio λ_3 spinduliuotės generaciją, o trečiojo bangos ilgio λ_3 spinduliuotė sukelia ketvirtojo bangos ilgio λ_4 spinduliuotės generaciją ir t. t.

Trečiojo ar daugiau bangos ilgių spinduliuotė iš optinio rezonatoriaus yra išvedama per tą patį išėjimo veidrodį, kaip ir antrojo bangos ilgio λ_2 spinduliuotė, o už rezonatoriaus yra atskiriama spektriniais filtrais.

Visi optinio rezonatoriaus veidrodžiai turi didesnį nei 99,9 % atspindžio koeficientą antrojo bangos ilgio λ_2 spinduliuotei.

Minėtas ultratrumpųjų kaupinimo impulsų voros šaltinis yra lazerinė sistema, sudaryta iš skaidulinio osciliatoriaus, skaidulinio impulsų plėstuvo, skaidulinio impulsų vorų formuotuvo, skaidulinio stiprintuvo ir impulsų spaustuvo.

Apibendrinant, galima išskirti kelis šio išradimo privalumus. Kaupinimas aukšto dažnio impulsų voromis leidžia užtikrinti mažus Ramano rezonatoriaus gabaritus. Prioritetiniame išradimo išpildyme kaupinimo šaltinis yra paremtas skaiduliniais lazeriniais elementais. Taigi tiek kaupinimo šaltinis, tiek ir išorinis Ramano rezonatorius yra labai kompaktiški. Dėl to lazerinė sistema yra atspari mechaniniams trikdžiams bei aplinkos temperatūros netolygumams. Panaudotas impulsų vorų formavimo būdas leidžia pasiekti ne mažesnę kaip 100 kHz vorų pasikartojimo dažnį, kas ypač aktualu greito skanavimo sprendimams. Antra, panaudotas impulsų vorų formavimo metodas leidžia suformuoti norimo ilgio ir vienodo impulsų intervalo kaupinimo impulsų seką.

Impulsų skaičius voroje yra toks, kokio reikia, kad būtų užtikrinama, kad priverstinės Ramano sklaidos procesas pasieks sotį, o konversijos į paslinkto bangos ilgio spinduliuotę efektyvumas viršys 30 %, bet dažnu atveju gali pasiekti ir virš 50 %. Antra vertus, naudojant suformuotos gaubtinės kaupinimo impulsų vorą, labai ilgos kaupinimo impulsų voros nereikės, nes kontinuumo generavimas pirmuoju kaupinimo impulsu užtikrina greitą proceso išsivystymą. Sugeneruojama stabili ir atsikartojanti Ramano spinduliuotės impulsų vora. Didžiausios amplitudės stoksinių impulsų smailinė galia yra ne mažesnė kaip 1 MW. Pasiūlytas parametrų derinys leidžia pasiūlyti rinkai ultratrumpųjų impulsų lazerinį šaltinį spektrinėje srityje virš 1,1 μm netiesinės mikroskopijos taikymams.

Toliau išradimas detaliau paaiškinamas brėžiniais, kur:

Fig.1 - Ramano lazerio ir jo kaupinimo būdo pagal šį išradimą principinė blokinė schema.

Fig.2 - prioritetinis šio išradimo išpildymas.

Tinkamiausi išradimo realizavimo pavyzdžiai

Principinė Ramano lazerio schema yra pavaizduota Fig.1. Sistema yra sudaryta iš kaupinimo spinduliuotės šaltinio 1 ir optinio rezonatoriaus 2, kur pluošto optiniame kelyje yra patalpinta kietakūnė Ramano terpė. Kaupinimo spinduliuotės šaltinis 1 generuoja ultratrumpųjų kaupinimo impulsų vorą 10, o optinio rezonatoriaus 2 su Ramano terpe (toliau bus vadinamas Ramano rezonatoriumi) išėjime yra gaunama ultratrumpųjų paslinkto bangos ilgio impulsų vora 20.

Kaupinimo spinduliuotės centrinis bangos ilgis λ_1 , o spektro plotis atitinka ultratrumpą impulsų trukmę nuo 30 fs iki 1 ps. Ultratrumpųjų kaupinimo impulsų vorą 10 sudaro nuo kelių iki keliasdešimties impulsų, pasikartojančių itin aukštu dažniu (nuo kelių šimtų megahercų iki 50 GHz, prioritetiškai nuo 500 MHz iki 3 GHz). Vora 10 kartojasi dažniu, kuris priklauso nuo impulsų voros suformavimo būdo, tačiau yra ne mažesnis nei 100 kHz.

Minėta Ramano terpė yra netiesinė terpė, pasižyminti Ramano stiprinimu bei turinti aukštą netiesinį lūžio rodiklį n_2 . Rezonatoriaus 2 ilgis yra parinktas taip, kad būtų realizuotos sinchroninio kaupinimo sąlygos: rezonatoriaus 2 apėjimo laikas gali būti lygus impulsų periodui kaupinimo impulsų voroje 10, arba gali būti nežymiai išderintas, kad su nedideliu vėlinimu išspinduliuotas paslinkto bangos ilgio impulsas laike sutaptų

su sekančiu kaupinimo impulsu. Ramano rezonatorius 2 yra sudarytas iš bent dviejų veidrodžių. Siekiant realizuoti žiedinę spinduliuotės trajektoriją, rezonatorius 2 gali būti sudarytas iš trijų ar daugiau veidrodžių.

Ultratrumpųjų kaupinimo impulsų vora 10 patenka į Ramano rezonatorių 2 ir generuoja paslinkto bangos ilgio λ_2 vorą 20. Jei rezonatorius yra suderinamas stoksinei dedamajai, tai voros 20 bangos ilgis λ_2 yra didesnis už kaupinimo impulsų bangos ilgį λ_1 . Bangos ilgių sąryšis yra aprašomas tokia formule: $1/\lambda_2 = 1/\lambda_1 - v_R/c$, kur v_R - Ramano terpės vibracinis dažnis, išreikštas hercais (Hz), c - šviesos greitis. Jei rezonatoriaus parametrai yra parinkti antistoksinei dedamajai generuoti, tai voros 20 bangos ilgis λ_2 yra mažesnis už kaupinimo impulsų bangos ilgį λ_1 . Bangos ilgių sąryšis yra aprašomas tokia formule: $1/\lambda_2 = 1/\lambda_1 + v_R/c$. Stoksinės bangos generacija yra didesnio efektyvumo nei antistoksinės bangos, sklinda kolineariai su kaupinimo spinduliuote ir yra labiau reikalinga norint paslinkti bangos ilgį į ilgesnių bangų pusę. Prioritetiniuose šio išradimo išpildymuose yra realizuojamas stoksinės dedamosios stiprinimas. Naudojant Yb jonais legiruočių aktyviųjų terpių kaupinimo spinduliuotės šaltinį (kaupinimo centrinis bangos ilgis λ_1 yra ties ~ 1030 nm), ir sintetinio deimanto kristalą kaip Ramano terpę, galima gauti 1194 nm bangos ilgio vorą 20. Realizuojant kaskadinę priverstinę Ramano sklaidą, galima gauti dar ilgesnio bangos ilgio (1420 nm) arba kelių bangos ilgių spinduliavimą vienu metu.

Kaupinimo impulsų voros 10 pirmasis impulsas 11 yra didesnės energijos nei likusieji kaupinimo impulsai 12-18. Pirmojo kaupinimo impulso 11 energija viršija kristalinės Ramano terpės superkontinuumo generacijos slenkstį. Yra siekiama sugeneruoti tokio spektro pločio kontinuumą, kad perdengtų stoksinės arba anti stoksinės bangos ilgį λ_2 . Tai užtikrina, kad Ramano sklaidos spinduliuotės generacija prasideda ne iš kvantinių triukšmų, ir kiekviena kaupinimo impulsų vora 10 sugeneruoja atsikartojančią stabilią paslinkto bangos ilgio vorą 20.

Minėto Ramano rezonatoriaus veidrodžiai yra tokie, kad iš rezonatoriaus yra išmetama maža antrojo bangos ilgio λ_2 spinduliuotės energijos dalis, o didžioji energijos dalis lieka cirkuliuoti rezonatoriuje 2. Kaupinimo spinduliuotė po vieno praėjimo per Ramano terpę yra išvedama iš rezonatoriaus 2. Pirmasis paslinkto bangos ilgio λ_2 impulsas 21 yra gaunamas iš kontinuumo generacijos metu atsiradusios λ_2 komponentės. Dalis sustiprintos stoksinės bangos spinduliuotės išeina iš rezonatoriaus kaip impulsas 21, likusioji vėl grąžinama į rezonatorių sekančiam

stiprinimo ciklui. Antrojo ir po jo einančių kaupinimo impulsų 12-18 energija yra mažesnė už kristalinės Ramano terpės superkontinuumo generacijos slenkstį. Kuomet į Ramano terpę patenka antrasis kaupinimo impulsas 12, rezonatoriaus 2 viduje cirkuliuojantis λ_2 bangos ilgio impulsas būna apėjęs rezonatorių ir tampa užkratu Ramano stiprinimui. Vėl dalis spinduliuotės išeina iš rezonatoriaus, o kita dalis gražinama į rezonatorių, ir t.t. Kai pirmos eilės stoksinės bangos impulso energija pasiekia tam tikrą lygį, ji savo ruožtu pradeda konvertuotis į antros eilės stoksinę spinduliuotę. Siūlomas rezonatorius 2 gali būti pilnai nepalaikantis antros eilės stoksinės bangos generacijos, ir tokiu būdu antros eilės stoksinę spinduliuotę bus tik nuostolių šaltinis. Nusistovėjus stiprinimo ir nuostolių balansui, sustiprintos pirmos eilės stoksinės spinduliuotės stiprinimas pradeda sotintis. Dėl to impulsų 23-24 amplitudžių augimas sulėtėja. Nutraukus kaupinimo vorą 10, Ramano spinduliuotės impulsai dar kurį laiką cirkuliuoja rezonatoriuje eksponentiškai gėsdami. Voros 20 gesimas priklauso nuo nuostolių rezonatoriuje, kurie yra apspręsti veidrodžių atspindžio koeficientais ir antros eilės stoksinės bangos stiprinimu.

Rezonatoriaus išėjime λ_2 bangos ilgis nuo kitų bangos ilgių yra atskiriamas spektriniais filtrais.

Nestacionaraus Ramano stiprinimo metu du faktoriai įtakoja stoksinės spinduliuotės impulso trukmę: Ramano sklaidos proceso vėlavimas ir antros eilės stoksinės bangos stiprinimas su analogišku vėlavimu kaupinančio impulso (šiuo atveju, pirmos eilės stoksinės bangos impulso) atžvilgiu. Rezultate priekinio fronto trukmę ir formą apsprendžia kaupinimo impulsas, o galinio fronto trukmę ir formą - energijos konversija į antros eilės stoksinę bangą. Jei stiprinamas pirmuoju kaupinimo impulsu 11 sugeneruotas superkontinuumo užkratas, priekinio fronto formavimuisi tas turi mažesnę įtaką. Galinio fronto energijos nuvalgymas trumpina stoksinės spinduliuotės impulsą bet kokių atveju. Rezultate pirmos eilės stoksinės bangos impulsai 21-32 yra trumpesni už kaupinimo impulsų 11-18 trukmę. Stiprinamo superkontinuumo spektras yra platesnis nei spektriškai ribotas stoksinės bangos impulsas ir dėl netiesinio kristalo medžiaginės dispersijos yra silpnai čirpuotas. Suvaldžius tą čirpą, stoksinio impulso trukmę būtų galima dar sumažinti, panaudojant išorinį impulsų spaustuvą. Tipinis Ramano spinduliuotės impulso trukmės sutrumpėjimas yra nuo 2 iki 5 kartų.

Fig.2 vaizduoja prioritetinį šio išradimo išpildymą. Kaupinimo spinduliuotės šaltinis yra sistema 1', sudaryta iš: skaidulinio osciliatoriaus 100, skaidulinio impulsų

plėstuvo 101, skaidulinio impulsų voros formuotuvo 102, skaidulinio stiprintuvo 103 ir impulsų spaustuvo 104. Osciliatorius 100, kurio aktyvusis elementas yra Yb jonais legiruota vienamodė optinė skaidula, generuoja plačiajuostę spinduliuotę ties 1030 nm. Spekto plotis atitinka ultratrumpą impulsų trukmę nuo 30 fs iki 1 ps. Sinchronizuotų modų osciliatorius 100, kuriame modų sinchronizacija pasiekama puslaidininkiniu įsisotinančiu veidrodžiu, impulsą išduoda dešimčių MHz pasikartojimo dažniu. Energija nuo kelių iki šimto pikodžaulių. Toliau impulsai yra plečiami laike. Paprasčiausias skaidulinio impulsų plėstuvo 101 pavyzdys yra čirpuota skaidulinė Brego gardelė, kuri veikia atspindyje. Tada yra formuojama gigahercinio (GHz) dažnio impulsų vora.

Galima pasinaudoti vienu iš žinomų būdų suformuoti itin didelio dažnio nuolatinės impulsų sekas arba baigtinio ilgio impulsų voras, pavyzdžiui, kurių formavimas yra aprašytas šiose publikacijose: 1) Tarptautinėje patentinėje paraiškoje nr. WO2009042024 "Pulse repetition frequency-multiplier for fiber laser" (A. Starodoumov et al.); 2) C. Kerse et al., "3.5-GHz intra-burst repetition rate ultrafast Yb-doped fiber laser", Opt. Commun. 366, 404-409 (2016); 3) Vokietijos patente DE102016124087 "Erzeugung von Laserpulsen in einem Burstbetrieb" (T. Eidam et al.); 4) K.-H. Wei et al., "Fiber laser pumped burst-mode operated picosecond mid-infrared laser", Chin. Phys. B 24(2), 024217 (2015); 5) T. Bartulevičius et al., "Compact high-power GHz intra-burst repetition rate all-in-fiber CPA system with LMA fiber power amplifier", Proc. SPIE 11260, Fiber Lasers XVII: Technology and Systems, 112602F (21 February 2020); 6) Tarptautinėje patentinėje paraiškoje nr. PCT/IB2019/058167 "Method for generating gigahertz bursts of pulses and laser apparatus thereof" (A. Michailovas ir T. Bartulevičius); 7) T. Bartulevičius et al., "Active fiber loop for synthesizing GHz bursts of equidistant ultrashort pulses", Opt. Express 28, 13059-13067 (2020). T. Bartulevičius et al. darbuose aprašytas ir impulsų voros amplitudės bei dispersijos valdymas. Taigi skaiduliniu impulsų voros formuotuvu 102 iš vieno įėjimo impulso galima suformuoti norimo impulsų kiekio ir pasikartojimo dažnio bei pasirinkto amplitudės profilio impulsų vorą. Impulsai voroje pasikartoja ~1 GHz dažniu, taigi impulsų periodas T_1 lygus ~1 ns. Panaudojant Bartulevičius et al. (2020) sprendimą su aktyvia skaiduline kilpa, galima gauti identišką atstumą tarp voros impulsų, kas yra ypač aktualu sinchroninio kaupinimo schemai. Pasitelkus dispersijos kontrolę, gaunama vora, sudaryta iš vienodos trukmės impulsų, o impulsų skaičius voroje yra nuo 3 iki 20. Didesnė pirmojo impulso amplitudė gali būti padaroma impulsų

voros formavimo stadijoje, kaip pavaizduota iliustracijoje. Didžiausias pasiekiamas vorų pasikartojimo dažnis priklauso nuo impulsų voros formavimo būdo; tai aprašyta minėtose publikacijose (kinta 100 kHz - kelių MHz ribose).

Stiprintuvas 103 yra bet koks didelio stiprinimo skaidulinis stiprintuvas: didelio modos ploto optinė skaidula, fotoninių kristalų skaidula, chiralinio tipo ar teiperiuotas skaidulinis stiprintuvas. Jais galima gauti iki 40 dB stiprinimą. Norime pasiekti dešimčių vatų vidutinę galią ir sąlyginai didelę impulsų energiją - mikrodžaulių eilės. Impulsams suspausti galima panaudoti tūrinę Brego gardelę, kuri labai gerai sukompensuoja skaidulinio impulsų plėstuvo dispersiją (kaip aprašyta T. Bartulevicius et al., "Compact fiber CPA system based on a CFBG stretcher and CVBG compressor with matched dispersion profile", Opt. Express 25, 19856-19862 (2017)). Siekiant aukštos pluošto kokybės ir kad būtų išvengta erdvinio čirpo, prioritetinėje sistemos 1' konfigūracijoje pasirinkome laisvos erdvės gardelinį impulsų spaustuvą 104. Visi elementai iki impulsų spaustuvo 104 yra skaiduliniai, kurie yra suvirinti tarpusavyje, todėl šaltinis 1' yra itin kompaktiškas ir stabilus mechaniniams trikdžiams. Vienos gardelės-dviejų praėjimų impulsų spaustuvai taip pat gali būti labai kompaktiški ir stabilūs.

Prioritetiniame šio išradimo išpildyme kaupinimo impulsų vora 10 yra nukreipiama į žiedinį bent trijų veidrodžių rezonatorių 2', kurio viduje pluošto kelyje tarp pirmojo veidrodžio 201 ir antrojo veidrodžio 202 yra patalpinta Ramano terpė 200. Pasirinktas ne trumpesnis kaip 5 mm ilgio deimanto kristalas. Kristalas tvirtinamas ant temperatūrą palaikančio staliuko. Žiedinė trajektorija yra gera tuo, kad nereikia izoliatoriaus kaupinimo šaltinio apsaugojimui. Be to, Ramano spinduliuotės impulsas per Ramano terpę rezonatoriaus apėjime sklinda tik vieną kartą - tik tuo metu, kai jame yra ir kaupinimo impulsas, taip išvengiama papildomų tiesinių bei netiesinių nuostolių.

Veidrodžių 201 ir 203 paviršiai yra padengti dangomis, kurios gerai praleidžia (1000-1100) nm kaupinimo spinduliuotę, o paviršius, nukreiptas į rezonatoriaus vidų, yra padengtas aukštu atspindžio koeficientu 1194 nm pirmos eilės stoksinės bangos spinduliuotei. Veidrodis 202 yra pilnai pralaidus kaupinimo spinduliuotei P ir dalinai pralaidus pirmos eilės stoksinės bangos spinduliuotei S1. Kad būtų sudaromos geriausios sąlygos pirmos eilės stoksinės bangos stiprinimui rezonatoriuje, veidrodis 202 arba visi veidrodžiai yra visiškai pralaidūs antros eilės stoksinės bangos spinduliuotei S2. Iš rezonatoriaus 2' yra išmetama ne didesnė nei 20 % pirmos eilės stoksinės bangos ($\lambda_2 = 1194$ nm) spinduliuotės energijos dalis, o kita energijos dalis

lieka cirkuliuoti rezonatoriuje 2'. Kaupinimo spinduliuotė P po vieno praėjimo per Ramano terpę 200 yra išmetama iš rezonatoriaus. Veidrodžiai 201 ir 202 gali būti įgaubti, kad suformuotų Ramano spinduliuotės kaustiką deimanto kristale. Kaupinimo pluoštas sufokusuojamas (lęšis Fig.2 nepavaizduotas) į panašaus dydžio dėmę. Selektiviu veidrodžiu 204 pirmos eilės stoksinės bangos spinduliuotė $S1$ yra atskiriama nuo likutinės kaupinimo spinduliuotės P ir, jeigu reikia, antros eilės stoksinės bangos spinduliuotės $S2$. Nereikalinga spinduliuotė yra nukreipiama į gaudyklę 205.

Rezonatoriaus 2' apėjimo laikas $T2$ yra artimas kaupinimo impulsų periodui $T1$, kad būtų tenkinamos sinchroninio kaupinimo sąlygos, leidžiančios pasiekti didesnį efektyvumą. Efektyvumas taip pat priklauso nuo kaupinimo impulsų smailinės galios ir periodo $T1$. Stoksinės bangos galia priklauso nuo to, kiek antrasis ir paskesni kaupinimo impulsai 12-18 persikloja laike su rezonatoriaus 2' viduje cirkuliuojančiu stoksinės bangos impulsu, kai jis sklinda per Ramano terpę 200. Jei Ramano rezonatoriaus 2 apėjimo laikas $T2$ yra tiksliai lygus kaupinimo impulsų periodui $T1$, rezonatoriaus viduje cirkuliuojantis impulsas Ramano terpę pasiekia vėliau negu sekantis kaupinimo impulsas. Jie persikloja tik dalinai, ir stiprinimui panaudojamas tik kaupinimo impulso galas. Kad būtų pasiekta maksimali galia, Ramano rezonatorius 2' turi būti šiek tiek trumpesnis. Koks išderinimas duoda didžiausią stoksinės bangos galią, dar priklauso ir nuo kaupinimo impulsų trukmės. Ties didžiausia stoksinės bangos galia impulso trukmė nėra mažiausia.

Yra numatyti keli variantai:

- 1) rezonatoriaus 2 apėjimo laikas $T2$ yra lygus kaupinimo impulsų periodui $T1$ voroje 10;
- 2) rezonatoriaus 2 apėjimo laikas $T2$ yra iki 10 % mažesnis už kaupinimo impulsų periodą $T1$;
- 3) rezonatoriaus 2 apėjimo laikas $T2$ yra iki 5 % didesnis už kaupinimo impulsų periodą $T1$.

Rezonatorius gali turėti ir daugiau veidrodžių, pavyzdžiui, X-formos 4-ių veidrodžių rezonatorius, jei tik pavyksta suformuoti reikiamą ilgį. Turint didelio impulsų pasikartojimo dažnio kaupinimo impulsų vorą 10, rezonatoriaus ilgis turi būti mažas. Jei kaupinimo impulsų pasikartojimo dažnis voros viduje lygus 500 MHz, tai optinis

rezonatoriaus ilgis lygus 60 cm. Jei kaupinimo impulsų pasikartojimo dažnis – 1 GHz, reikalingas 30 cm optinis rezonatoriaus ilgis, ir t. t. (0,5-3) GHz kaupinimo impulsų pasikartojimo dažnis voroje 10 ir trijų veidrodžių rezonatorius 2' yra geriausias šio išradimo išpildymo variantas.

Ultratrumpųjų kaupinimo impulsų 11-18 energija turi būti parinkta tenkinant tokias sąlygas:

- pirmasis impulsas 11 suformuoja gražų filamentą (giją dėl savifokusavimosi), kuriame vyksta spektrinių komponentių daugėjimas ir superkontinuumo generacija. Reikalingas toks spektro išplatėjimas, kad būtų perdengtas pirmos eilės stoksinės bangos ilgis 1194 nm; šios spektrinės komponentės intensyvumas turi būti stabilus ir 1000 kartų didesnis už kvantinį triukšmą;

- impulso 11 energija neviršija Ramano terpės 200 pažeidimo slenksčio;

- kitų kaupinimo impulsų voros 10 impulsų energija yra mažesnė už filamentacijos slenkstį deimante;

- kaupinimo impulsų voros 10 suminė energija yra tokia, kad energijos konversijos iš kaupinimo impulsų voros 10 į stoksinės bangos impulsų vorą 20 efektyvumas yra ne mažesnis kaip 30 %, geriau (40-50) %;

- jei prasideda antros eilės stoksinės bangos generacija, pirmos eilės stoksinės bangos generacijos efektyvumas yra bent 30 %.

Deimantas - gera terpė ne tik dėl didelio Ramano poslinkio, bet ir dėl labai gero šiluminio laidumo. Tai apsaugo nuo termolėšio susiformavimo ir rezonatoriaus išsiderinimo iš stabilumo zonos, leidžia pasiekti gerą pluošto kokybę ir ryškį. Mūsų eksperimentuose kontinuumo generacijos slenkstis deimante siekė (0,6-0,7) μJ , esant pasirinktai kaupinimo spinduliuotės pluošto dėmei. Turint kaupinimo impulsų voros 10 suminę energiją $\sim(3-6)$ μJ ribose, suminė pirmos eilės stoksinės bangos voros 20 energija yra (0,9-3) μJ ribose.

Yra du būdai palaikyti sinchroninio kaupinimo sąlygas ir stabilizuoti sistemą. Galima paderinti Ramano rezonatoriaus ilgį: vienas iš rezonatoriaus veidrodžių 201, 202 ar 203 pritvirtinamas ant pjezo-transliatoriaus, kurio padėtis valdoma grįžtamuoju ryšiu, priklausomai nuo dėl mechaninių trikdžių ar temperatūros pakitusio kaupinimo impulsų periodo T1 ar rezonatoriaus ilgio. Kai kurie impulsų vorų formavimo būdai

leidžia jautriai keisti impulsų periodą. Taigi kaip alternatyva rezonatoriaus ilgio paderinimui, galima grįžtamuoju ryšiu valdyti kaupinimo impulsų periodą T_1 .

Kitos realizacijos:

- Fabry-Perot dviejų-veidrodžių optinis rezonatorius arba ant Ramano terpės galų užgarinamos reikiamos dangos. Turint itin didelio impulsų pasikartojimo dažnio kaupinimo impulsų vorą 10 (iki 50 GHz), realizuojama ypatingai kompaktiška sistema.

- Ramano terpė 200 yra bet kokia kietakūnė medžiaga, pavyzdžiui KGW, KYW, YVO₃, GdVO₃ kristalai, pasižymintys priverstine Ramano sklaida ir dideliu netiesiniu lūžio rodikliu, leidžiančiu pasiekti savifokusavimąsi ir filamentaciją. Aštriai fokusuojant kontinuumo generacijos slenkstis yra (0,03-0,60) μJ diapazone skirtingiems kristalams. Todėl gali užtekti ir 1 μJ kaupinimo voros 10 energijos.

- Pagrindinėje šio išradimo realizacijoje rezonatoriaus 2' veidrodžiai yra tokie, kad iš rezonatoriaus yra išvedama ne mažesnė kaip 10 % dalis antrojo bangos ilgio λ_2 spinduliuotės energijos. Kitose realizacijose - iš rezonatoriaus išvedama tik labai maža, mažesnė nei 5 %, spinduliuotės energijos dalis.

- Pagal dar vieną šio išradimo realizaciją, yra sugeneruojami daugiau negu vienas paslinktas bangos ilgis: pirmos eilės stoksinė banga (λ_2) sukelia antros eilės stoksinės bangos (trečiojo bangos ilgio λ_3) generaciją. Jei veidrodis 202 dalinai atspindi antros eilės stoksinę bangą (λ_3) atgal į rezonatorių, skatinamas λ_3 stiprinimas. Taip pasiekiamas dviejų bangos ilgių stiprinimas. Jei kaupinimo bangos ilgis $\lambda_1 = 1030 \text{ nm}$, deimante sugeneruojami $\lambda_2 = 194 \text{ nm}$ ir $\lambda_3 = 1420 \text{ nm}$ bangos ilgiai. Už rezonatoriaus pirmos ir antros eilės stoksinės spinduliuotės yra atskiriamos spektriniais filtrais. Pagal dar kitą realizaciją - visi optinio rezonatoriaus 2' veidrodžiai yra pilnai atspindintys (turi didesnį nei 99,9 % atspindžio koeficientą) pirmos eilės stoksinę bangą (λ_2). Tokiu atveju išėjime bus tik antros eilės stoksinė bangos (λ_3) impulsų vora.

- Pagal dar vieną šio išradimo realizaciją yra sugeneruojami daugiau negu du paslinkti bangos ilgiai. Galimi įvairūs parametų rinkiniai, kurie optimizuoja kelių paslinktų bangos ilgių generaciją vienu metu arba priešingai - palaiko vieno pasirinkto bangos ilgio generaciją.

- Skaiduliniais kaupinimo šaltiniais dažniausiai galima generuoti kaupinimo impulsų voras iki 30 μJ Panaudojant hibridinius arba kietakūnius kaupinimo šaltinius galima turėti iki 300 μJ energijos kaupinimo impulsų voras.

Superkontinuumo generacijai dažnai naudoja kristalus, pasižyminčius Ramano aktyvumu, pvz., YVO_4 , GdVO_4 , KGW ir kt. Generuojant superkontinuumą, (1,1-1,5) μm spektrinis diapazonas pasiekiamas gana nesudėtingai, bet bendras konversijos efektyvumas būna tik kelių procentų eilės. T.y. kaupinant kelių vatų femtosekundiniu lazeriu, spinduliuojančiu (20-500) fs trukmės impulsus reikiamame spektriniame diapazone generuojama keliasdešimt milivatų vidutinės galios spinduliuotė per visą (1,1-1,5) μm spektrinį diapazoną. Bendras spektrinis ryškis tokio šaltinio netiesinės mikroskopijos taikymams yra per mažas. Kaupinimo galios padidinimas problemos neišsprendžia, nes superkontinuumo kristalai turi tendenciją degraduoti, veikiant juos labai didelio intensyvumo fs impulsais. Tad, norint užtikrinti ilgalaikį lazerinės sistemos funkcionavimą, patartina superkontinuumo generacijos slenksčio neviršyti daugiau kaip du kartus. Rezultate - generuojamos spinduliuotės galia minėtame spektriniame diapazone yra ribota. Siūlomas išradimas sprendžia šią problemą, realizuodamas sugeneruoto superkontinuumo stiprinimą sinchroniškai kaupinamame Ramano rezonatoriuje, kurį šiuo atveju galima vadinti Ramano stiprintuvu. Pirmasis kaupinimo voros impulsas sugeneruoja platų spektrą - užkratą Ramano stiprinimui. Iš paskos einantys kaupinimo impulsai stiprina užkratą, bet neturi pakankamai energijos, kad susifokusuotų ir sugeneruotų superkontinuumą. Kadangi išvengiama susifokusavimo, mažėja rizika pažeisti kristalą, ir jis tarnaus ilgai. O kadangi yra užkratas, tai Ramano stiprintuvas efektyviai konvertuoja kaupinimo impulsų energiją į Ramano spinduliuotės impulsus. Realizuojamas saugus režimas pažaidos atžvilgiu ir tuo pačiu labai efektyviai generuojami spektriškai pastumti impulsai (pasiekiamas keliasdešimties procentų energijos konversijos efektyvumas).

Stiprinimo įsisotinimui tarnauja du efektai. Pirmas, tai kaupinančio impulso energijos išsikvojimas stiprinimo metu. Antras, antrojo stokso efektyvi generacija, kuri apriboja pirmojo stokso augimo greitį. Be to, abiejų efektų bendras poveikis duoda trumpesnę už kaupinimo generuojamo stokso impulso trukmę. Pagal pirmąjį šio išradimo išpildymą, kad būtų minimizuota antros eilės stoksinės bangos generacijos įtaka pirmos eilės stoksinės bangos generacijai, Ramano rezonatoriaus veidrodžiai turi maksimalų pralaidumą antros eilės stokso bangos ilgiui. Tokiu būdu išvengiama grįžtamojo ryšio antros eilės stokso bangos ilgiui ir mažinamas jo poveikis pirmos eilės stokso impulso išėjimo energijai. Tam, kad dar labiau sumažintume grįžtamąjį ryšį antros eilės stoksinei bangai, Ramano rezonatorius išpildomas naudojant daugiau kaip

du veidrodžius ir tokiu būdu išvengiant paviršių, statmenų rezonatoriuje sklindančiam pluoštui.

Iš modeliavimo žinome, kad, jei kaupinimo impulsų amplitudės būtų vienodos, tai kaupinimas impulsų voromis neleistų pasiekti aukšto konversijos efektyvumo, nes pirmieji kaupinimo impulsai stiprina labai neefektyviai, prireikia daug ciklų, kol Ramano stiprinimas pasiekia sotį. O tai reiškia, kad iki pusės ir daugiau kaupinimo voros impulsų perduoda savo energiją stoksinei bangai labai neefektyviai. Be superkontinuumo užkrato toks Ramano bangos ilgio keitimo įrenginys reikalautų labai ilgų kaupinimo sekų (ilgesnių kaip 20) geram energijos konvertavimo efektyvumui pasiekti. Tai lemtų, kad stokso impulsų spektrinės ir laikinės savybės labai smarkiai varijuotų voros viduje. Mūsų siūlomame sprendime efektyvus stiprinimas prasideda jau kaupinimo impulsų voros pradžioje, pradedant nuo antrojo kaupinimo impulso. Tai leidžia pasiekti ne tik iki kelių kartų geresnį konversijos efektyvumą ir greičiau pasiekti stiprinimo sotį, bet ir sugeneruoti sutrumpėjusius impulsus beveik per visą stokso bangos ilgio impulsų seką. Superkontinuumo užkratas padeda suvienodinti stokso impulsų parametrus.

Stokso impulsų spektrinės ir laikinės savybės yra veikiamos ir fazinės savimoduliacijos. Tačiau kiekvieno sustiprinto stokso impulsų voros impulso fazinė moduliacija yra skirtinga dėl skirtingo nueito kelio netiesiniame kristale ir dėl skirtingo impulsų smailinio intensyvumo. Faziškai moduluotus impulsus galima bandyti spausti išoriniame impulsų spaustuve, tačiau pagrindinis stokso impulsų trumpėjimas, palyginus su kaupinimo impulsais, įvyksta dėl Ramano stiprinimo; labiausiai - kai Ramano stiprinimas pradeda sotintis.

Taigi kaupinimas impulsų voromis leidžia kompaktizuoti Ramano rezonatorių. O kaupinimas suformuotos gaubtinės impulsų voromis leidžia užtikrinti greitą proceso išsivystymą iki soties režimo, kuris užtikrina aukštą energinį efektyvumą, stoksinių impulsų parametrų atsikartojamumą ir maksimalią smailinę galią.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Lazeris netiesinei mikroskopijai, apimantis:

- pirmojo bangos ilgio λ_1 ultratrumpųjų kaupinimo impulsų voros (10) šaltinį (1),
- optinį rezonatorių (2), sudarytą iš bent dviejų veidrodžių,
- minėtame optiniame rezonatoriuje (2) patalpintą kietakūnę netiesinę Ramano terpę (200), kur
- ultratrumpųjų kaupinimo impulsų vora (10) patenka į optinį rezonatorių (2), kurio optiniame kelyje yra patalpinta Ramano terpė (200), ir generuoja antrojo bangos ilgio λ_2 ultratrumpųjų impulsų vorą (20),
- optinio rezonatoriaus (2) ilgis yra parinktas taip, kad antrasis ir po jo einantys kaupinimo impulsai (12-18) bent dalinai persikloja laike su rezonatoriaus (2) viduje cirkuliuojančiu antrojo bangos ilgio λ_2 spinduliuotės impulsu, kai jis sklinda per Ramano terpę (200),

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

- pirmasis kaupinimo impulsų voros (10) impulsas (11) yra didesnės energijos nei kiti kaupinimo impulsų voros (10) impulsai (12-18);
- minėtas impulsas (11) Ramano terpėje (200) sugeneruoja plačiajuostę spinduliuotę, kurios spektrinė juosta perdengia antrąjį bangos ilgį λ_2 ;
- ultratrumpųjų kaupinimo impulsų vorą (10) sudaro nuo trijų iki keliasdešimties impulsų;
- kaupinimo impulsai (11-18) yra nuo 30 fs iki 1 ps trukmės.

2. Lazeris pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad pirmojo ultratrumpųjų kaupinimo impulsų voros (10) impulso (11) energija viršija Ramano terpės (200) kontinuumo generacijos slenkstį, o antrojo ir po jo einančių minėtos voros (10) impulsų (12-18) energija yra mažesnė už Ramano terpės (200) kontinuumo generacijos slenkstį.

3. Lazeris pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad Ramano terpė (200) yra deimantas, KGW, KYW, YVO₃, GdVO₃ arba kiti kristalai, pasižymintys dideliu Ramano stiprinimu ir dideliu netiesiniu lūžio rodikliu, leidžiančiu pirmuoju kaupinimo impulsu (11) gauti savifokusavimąsi ir kontinuumo generaciją.

4. Lazeris pagal bet kurį iš ankstesnių punktų b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad ultratrumpųjų kaupinimo impulsų vora (10) pasikartoja ne mažesniu kaip 100 kHz dažniu.

5. Lazeris pagal bet kurį iš ankstesnių punktų b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad likutinė kaupinimo spinduliuotė po vieno praėjimo per Ramano terpę (200) yra išvedama iš minėto optinio rezonatoriaus (2).

6. Lazeris pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad optinis rezonatorius (2), kuriame pluošto kelyje yra patalpinta Ramano terpė (200), yra žiedinis rezonatorius (2'), sudarytas iš bent trijų veidrodžių (201, 202, 203), minėto rezonatoriaus (2') optinis ilgis yra nuo 10 cm iki 60 cm, o ultratrumpųjų kaupinimo impulsų (11-18) pasikartojimo dažnis voros (10) viduje yra intervale nuo 0,5 GHz iki 3 GHz.

7. Lazeris pagal bet kurį iš 1-5 punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad optinis rezonatorius (2) apima du veidrodžius, kurie yra suformuoti ant Ramano terpės (200) galų užgarinant optines dangas, o ultratrumpųjų kaupinimo impulsų (11-18) pasikartojimo dažnis voros (10) viduje yra intervale nuo 10 GHz iki 50 GHz.

8. Lazeris pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad antrojo bangos ilgio λ_2 spinduliuotės impulsų trukmė yra intervale nuo 15 fs iki 1 ps, o smailinė galia yra ne mažesnė kaip 1 MW.

9. Lazeris pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad kaupinimo impulsų voros (10) suminė energija yra tokia, kad energijos konversijos iš kaupinimo spinduliuotės į paslinkto bangos ilgio spinduliuotę efektyvumas yra ne mažesnis kaip 30 %.

10. Lazeris pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad vienas iš optinio rezonatoriaus (2) veidrodžių yra pritvirtintas ant pjezo-transliatoriaus, kurio padėtis grįžtamuoju ryšiu yra valdoma, siekiant stabilizuoti minėto rezonatoriaus (2) ilgį.

11. Lazeris pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad kaupinimo impulsų pasikartojimo dažnis voros (10) viduje yra valdomas realiu laiku.

12. Lazeris pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad ultratrumpųjų kaupinimo impulsų voros (10) energija yra nuo 3 μ J iki 30 μ J.

13. Lazeris pagal bet kurį iš 1-11 punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad ultratrumpųjų kaupinimo impulsų voros (10) energija yra nuo 30 μJ iki 300 μJ .

14. Lazeris pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad optinio rezonatoriaus (2) veidrodžiai yra tokie, kad iš rezonatoriaus yra išvedama ne mažesnė kaip 10 % dalis antrojo bangos ilgio λ_2 spinduliuotės energijos, o kita antrojo bangos ilgio λ_2 spinduliuotės energijos dalis lieka cirkuliuoti minėtame rezonatoriuje (2).

15. Lazeris pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad Ramano terpėje (200) yra sugeneruojami daugiau negu vienas paslinktas bangos ilgis: antrojo bangos ilgio λ_2 spinduliuotė sukelia trečiojo bangos ilgio λ_3 spinduliuotės generaciją.

16. Lazeris pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad Ramano terpėje (200) yra sugeneruojami daugiau negu du paslinkti bangos ilgiai: antrojo bangos ilgio λ_2 spinduliuotė sukelia trečiojo bangos ilgio λ_3 spinduliuotės generaciją, o trečiojo bangos ilgio λ_3 spinduliuotė sukelia ketvirtojo bangos ilgio λ_4 spinduliuotės generaciją ir t. t.

17. Lazeris pagal 15-16 punktus, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad trečiojo ar daugiau bangos ilgių spinduliuotė iš optinio rezonatoriaus (2) yra išvedama per tą patį išėjimo veidrodį, kaip ir antrojo bangos ilgio λ_2 spinduliuotė, o už rezonatoriaus yra atskiriama spektriniais filtrais.

18. Lazeris pagal 15-16 punktus, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad visi optinio rezonatoriaus (2) veidrodžiai turi didesnę nei 99,9 % atspindžio koeficientą antrojo bangos ilgio λ_2 spinduliuotei.

19. Lazeris pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad minėtas ultratrumpųjų kaupinimo impulsų voros (10) šaltinis (1) yra lazerinė sistema (1'), sudaryta iš skaidulinio osciliatoriaus (100), skaidulinio impulsų plėstuvo (101), skaidulinio impulsų vorų formuotuvo (102), skaidulinio stiprintuvo (103) ir impulsų spaustuvo (104).

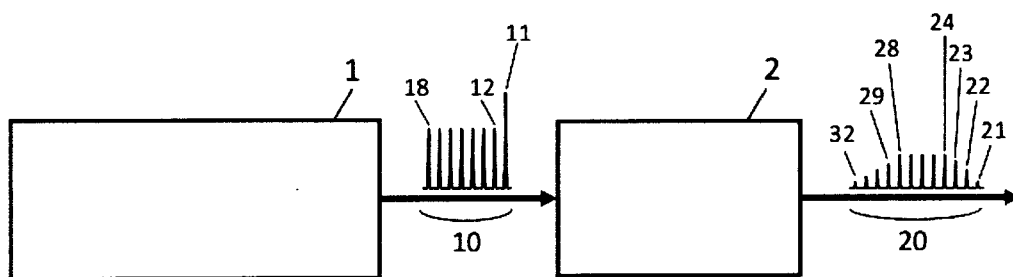


Fig.1

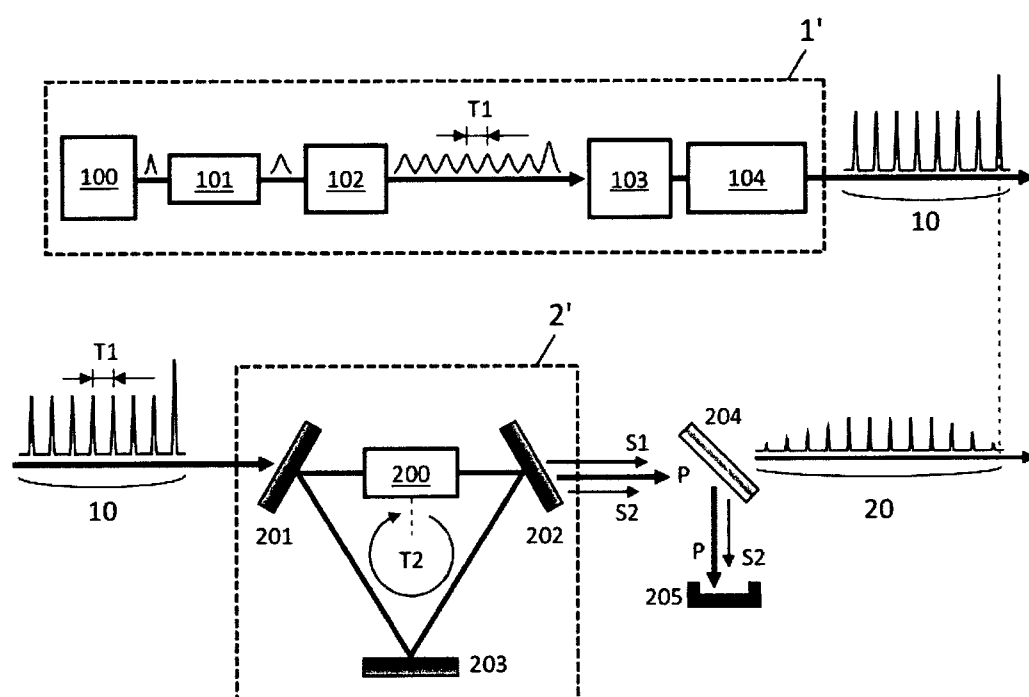


Fig.2