

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

(21) Paraiškos numeris: **2021 529**  
(22) Paraiškos padavimo data: **2021-06-08**  
(41) Paraiškos paskelbimo data: **2022-12-12**  
(45) Patento paskelbimo data: **2023-01-10**

(73) Patento savininkas:  
**Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras, Savanorių pr. 231, LT-02300 Vilnius, LT**  
(72) Išradėjas:  
**Kęstutis REGELSKIS, LT**  
(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:  
**Virgina Adolfina DRAUGELIENĖ, 8, UAB TARPINĖ, A.P.Kavoliuko g. 24-152, LT-04328 Vilnius, LT**

**LT 6971 B**

(54) Pavadinimas:  
**Šviesos impulso formavimo būdas ir įrenginys**

(57) Referatas:

Išradimas priklauso lazerinių technologijų sričiai ir yra skirtas regeneratyviam šviesos impulso formavimo būdai ir įrenginiui, skirtiems iš pradinio šviesos impulso suformuoti regeneruojančios grandinės parametrais apibrėžtą (RGPA) šviesos impulsą. Pradinį šviesos impulsą įveda į regeneruojančią grandinę, kurioje suformuoja RGPA šviesos impulsą užduotu tikslumu ir jį išveda. Siekiant padidinti suformuoto šviesos impulso tikslumą užduotiems parametrams tuo pačiu supaprastinant įrenginį šviesos impulsas formuojamas pakartotinai jį regeneruojant toje pačioje regeneruojančioje grandinėje, kuri valdomu optiniu jungikliu yra uždarai sujungta tol, kol suformuojamas RGPA šviesos impulsas užduotu tikslumu, arba kol formuojamas šviesos impulsas regeneruojamas toje pačioje regeneruojančioje grandinėje iki iš anksto užduoto skaičiaus kartų arba iš anksto numatytą laiko tarpą per kurį iš pradinio šviesos impulso susiformuojamas RGPA šviesos impulsas užduotu tikslumu, kuris išvedamas iš minėtos grandinės, o regeneruojanti grandinė nutraukiama iki kito pradinio šviesos impulso įvedimo.

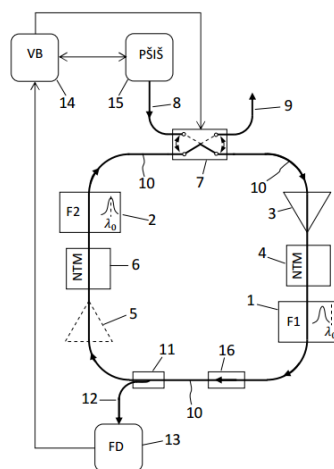


Fig. 1

## TECHNIKOS SRITIS

Išradimas priklauso lazerinių technologijų sričiai ir yra skirtas regeneratyviam šviesos impulso formavimo būdui ir įrenginiui, skirtiems iš pradinio šviesos impulso suformuoti regeneruojančios grandinės parametrais apibrėžtą (RGPA) šviesos impulsą.

## TECHNIKOS LYGIS

Šviesos impulsų generavimui lazerinėse technologijose dažniausiai yra naudojami sinchronizuotų modų lazeriai, kurie generuoja periodiškai pasikartojančius šviesos impulsus (angl. pulse train). Šviesos impulsų pasikartojimo dažnis yra užduodamas lazerio rezonatoriaus ilgiu ir jis nėra laisvai valdomas. Tačiau daugybėje taikymų reikia generuoti pavienius šviesos impulsus arba impulsų pliūpsnius laisvai pasirenkamais laiko momentais, taip pat pageidautina tolygiai valdyti šviesos impulsų pasikartojimo dažnį arba derinti vėlinimą tarp gretimų šviesos impulsų. Šviesos impulsų generavimui pageidaujamais laiko momentais (angl. pulse on demand) yra naudojami diodiniai lazeriai veikiantys stiprinimo perjungimo (angl. gain switching) režimu. Šiuo būdu galima generuoti dešimčių pikosekundžių trukmės šviesos impulsus pageidaujamais laiko momentais, tačiau sugeneruoti šviesos impulsai dažnai yra mažos energijos, triukšmingi, prastų spektrinių bei laikinių charakteristikų ir tokie šviesos impulsai nėra tinkami praktiniam naudojimui.

Vienas iš būdų siekiant pagerinti diodiniu lazeriu generuojamų šviesos impulsų charakteristikas, yra šviesos impulsų performavimas naudojant Mamyševo tipo regeneratorių. Mamyševo regeneratorių naudojamas telekomunikacijų technologijose iškraipytų šviesos impulsų optiniam regeneravimui. Diodiniu lazeriu generuojamus šviesos impulsus įvedus į Mamyševo regeneratorių, yra suformuojami kokybiškesni, mažiau triukšmingi šviesos impulsai. Ir kuo daugiau kartų pradinis šviesos impulsas regeneruojamas nuosekliai sujungtuose Mamyševo regeneratoriuose, tuo suformotas šviesos impulsas yra artimesnis regeneruojančios grandinės parametrais apibrėžtam (RGPA) šviesos impulsui, nepriklausomai nuo pradinio šviesos impulso parametrų. Šis būdas aprašytas moksliniame straipsnyje: Fu, Walter et al. "High-power femtosecond pulses without a modelocked laser." Optica vol. 4, 7 p. 831-834 (2017).

Žinomo būdo trūkumas yra tas, kad norint suformuoti RGPA šviesos impulsą,

pradinį šviesos impulsą reikia daug kartų regeneruoti, dėl to turi būti naudojamas didelis skaičius nuosekliai apjungtų regeneratorių, ko pasekoje sistema tampa brangi, sudėtinga ir nepraktiška.

Yra žinomas ultra trumpų šviesos impulsų generavimo įrenginys ir būdas kuriame impulsai sklindantys uždara grandine formuojami periodiškai juos stiprinant, išplečiant impulsų spektrą dėl Kero efekto optiškai skaidrioje terpėje ir pakaitomis filtruojant impulsų spektrus, taip, kad pirmą ir antrą kartą nufiltruotų impulsų spektrai yra paslinkti vienas kito atžvilgiu. Tai įgalina generuoti fiksuoto pasikartojimo dažnio itin stabilių ultra trumpų šviesos impulsų seką, kurioje periodas tarp impulsų yra užduodamas įrenginio uždaros grandinės ilgiu. Žinomas būdas ir įrenginys yra aprašytas JAV patente US10038297B2, 2018.

Žinomo būdo ir įrenginio trūkumas yra tas, kad ultra trumpų šviesos impulsų generavimo įrenginys generuoja impulsus fiksuotu pasikartojimo dažniu, kuris yra užduotas impulsų generavimo įrenginio uždaros grandinės ilgiu ir dėl to nėra galimybės generuoti impulsus pageidaujamais laiko momentais. Be to, nėra galimybės tolygiai valdyti impulsų pasikartojimo dažnį, galima generuoti tik kartotinio dažnio impulsus, iš impulsų sekos išrenkant kas antra, arba kas trečia, arba kas ketvirta ir t.t. impulsus. Be to, žinomus įrenginius sudėtinga sinchronizuoti tarpusavyje, ar su kitais ultra trumpų impulsų lazeriais.

Yra žinomas šviesos impulsų regeneravimo būdas ir įrenginys kuriame pradinis iškraipytas impulsas, jei reikia, yra sustiprinamas stiprintuve, po to neteisinėje terpėje dėl fazinės savimoduliacijos išplečiamas impulso spektras ir išplėsto spektro impulsas yra filtruojamas juostiniu filtru kurio centrinis optinis dažnis yra paslinktas atžvilgiu pradinio impulso centrinio optinio dažnio, taip, kad pradinio ir išvedamo impulsų spektrai yra vienas nuo kito atskirti. Šiuo būdu suformuojami beveik vienodo intensyvumo ir trukmės impulsai nepriklausomai nuo pradinio impulso intensyvumo, su sąlyga jei pradinio impulso intensyvumas yra didesnis už iš anksto nustatytą kritinį intensyvumą. Triukšmai ir mažesnio intensyvumo, nei kritinis intensyvumas, pradiniai impulsai yra visiškai nuslopinami. Žinomas įrenginys suformuoja paslinkto centrinio optinio dažnio impulsus atžvilgiu pradinių impulsų centrinio optinio dažnio. Nuosekliai sujungus du, ar daugiau šio tipo įrenginių, galima suformuoti impulsus kurių centrinis optinis dažnis sutampa su pradinių impulsų centriniu optiniu dažniu, taip pat, kuo daugiau nuosekliai yra sujungta šių įrenginių,

tuo suformuoti impulsai yra vienodesni nepriklausimai nuo pradinių impulsų parametrų. Žinomas būdas ir įrenginys yra aprašytas JAV patente US6141129A, 2000.

Žinomo būdo ir įrenginio trūkumas yra tas, kad suformuotų išvedamų impulsų parametrai nors ir nežymiai, tačiau priklauso nuo pradinių įvedamų impulsų parametrų. Be to, suformuotų išvedamų impulsų centrinis optinis dažnis yra paslinktas atžvilgiu pradinių impulsų centrinio optinio dažnio, kas ne visada yra pageidaujama. Siekiant suformuoti atsikartojančius šviesos impulsus, nepriklausomai nuo pradinių šviesos impulsų parametrų, būtina nuosekliai apjungti daugybę šių žinomų įrenginių, dėl to visas apjungtas įrenginys tampa sudėtingesnis ir jo kaina didėja proporcingai nuosekliai apjungiamų įrenginių skaičiui.

#### SPRENDŽIAMA TECHININĖ PROBLEMA

Išradimu siekiama pagerinti laisvai pasirenkamais laiko momentais generuojamų šviesos impulsų kokybę, padidinti šviesos impulsų energiją ir išvalyti juos nuo triukšmų, padidinti formuojamų RGPA šviesos impulsų atsikartojamumą. Taip pat išradimu siekiama supaprastinti impulsų formavimo įrenginio konstrukciją, sumažinti įrenginio savikainą, padidinti įrenginio patikimumą, supaprastinti būdo ir įrenginio pritaikomumą lazerinėse sistemose generuojančiose impulsus pageidaujamais laiko momentais.

#### IŠRADIMO ESMĖS ATSKLEIDIMAS

Uždavinio sprendimo esmė yra ta, kad šviesos impulso formavimo būde, skirtame iš pradinio šviesos impulso suformuoti regeneruojančios grandinės parametrais apibrėžtą (RGPA) šviesos impulsą, apimančiame:

- pradinio šviesos impulso įvedimą į regeneruojančią grandinę,
- šviesos impulso formavimą jį regeneruojant regeneruojančioje grandinėje,
- suformuoto RGPA šviesos impulso išvedimą iš regeneruojančios grandinės,

kur šviesos impulsas formuojamas pakartotinai jį regeneruojant toje pačioje regeneruojančioje grandinėje, kuri valdomu optiniu jungikliu yra uždarai sujungta tol, kol išpildoma viena iš šių sąlygų:

a) formuojamas šviesos impulsas regeneruojamas toje pačioje regeneruojančioje grandinėje iki suformuojamas RGPA šviesos impulsas užduotu

tikslumu, arba

b) formuojamas šviesos impulsas regeneruojamas toje pačioje regeneruojančioje grandinėje iki iš anksto užduoto skaičiaus kartų arba iš anksto numatytą laiko tarpą per kurį iš pradinio šviesos impulso susiformuojamas RGPA šviesos impulsas užduotu tikslumu,

išpildžius pasirinktinai bet kurią iš minėtų a) ar b) sąlygų, suformuotas RGPA šviesos impulsas yra išvedamas iš regeneruojančios grandinės ir uždarai sujungta regeneruojanti grandinė minėtu valdomu optiniu jungikliu yra pertraukiama taip, kad regeneruojančioje grandinėje nebūtų toliau regeneruojamas šviesos impulsas iki kol į regeneruojančią grandinę bus įvestas kitas pradinis šviesos impulsas.

Konstruiniame, privalumų turinčiame pasiūlyto išradimo išpildyme, būtent šviesos impulso formavimo įrenginyje, skirtame iš pradinio šviesos impulso suformuoti regeneruojančios grandinės parametrais apibrėžtą (RGPA) šviesos impulsą, apimančiame regeneruojančią grandinę, turinčią pradinio šviesos impulso įvedimo į regeneruojančią grandinę priemonę ir suformuoto RGPA šviesos impulso išvedimo iš regeneruojančios grandinės priemonę,

kur pradinio šviesos impulso įvedimo į regeneruojančią grandinę priemonė ir suformuoto RGPA šviesos impulso išvedimo iš regeneruojančios grandinės priemonė yra sukonfigūruotos kaip į regeneruojančią grandinę įjungta bent viena valdoma optinė perjungimo priemonė, kuri pagal valdymo bloko signalą

iš šviesos impulso šaltinio per įvedimo šaką įveda pradinį šviesos impulsą į minėtą regeneruojančią grandinę, ir tuo metu uždarai sujungia regeneruojančią grandinę ne vėliau kol įvestas šviesos impulsas pirmą kartą sklisdamas regeneruojančia grandine sugrįžta iki valdomos optinės perjungimo priemonės, ir įvestas šviesos impulsas toliau uždarai sujungtoje regeneruojančioje grandinėje yra pakartotinai-cikliškai regeneruojamas iki tol, kol

a) suformuojamas RGPA šviesos impulsas užduotu tikslumu

arba

b) suformuojamas šviesos impulsas jį regeneruojant iš anksto užduotą skaičių kartų arba iš anksto numatytą laiko tarpą, per kurį iš pradinio šviesos impulso susiformuoja RGPA šviesos impulsas užduotu tikslumu,

išpildžius pasirinktinai bet kurią iš minėtų a) ar b) sąlygų, suformuotas RGPA šviesos impulsas užduotu tikslumu išvedamas iš regeneruojančios grandinės ir uždarai sujungta regeneruojanti grandinė nutraukiama iki kol bus įvestas kitas pradinis šviesos impulsas.

Į regeneruojančią grandinę yra įjungtas optinis šakotuvas, nukreipiantis dalį šviesos impulso energijos į fotodektorių, skirtą regeneruojamo šviesos impulso dinamikos regeneruojančioje grandinėje detektavimui, suformuojant signalą valdymo blokui.

Minėta valdoma optinė perjungimo priemonė yra keturių šakų valdomas optinis jungiklis, įjungtas į regeneruojančią grandinę ir sukonstruotas taip, kad priklausomai nuo signalo, gauto iš valdymo bloko, gali įvesti pradinį impulsą į regeneruojančią grandinę ir uždarai ją sujungti, bei suformuotą RGPA šviesos impulsą išvesti iš regeneruojančios grandinės ir ją nutraukti.

Minėta valdoma optinė perjungimo priemonė yra sudaryta iš optinio šakotuvo, turinčio ne mažiau trijų šakų pradiniam šviesos impulsui iš įėjimo šakos įvesti į regeneruojančią grandinę ir valdomo trijų šakų optinio jungiklio, skirto iš regeneruojančios grandinės suformuotam RGPA šviesos impulsui nukreipti į išėjimo šaką ir nutraukti regeneruojančią grandinę.

Minėta valdoma optinė perjungimo priemonė yra sudaryta iš optinio šakotuvo, turinčio ne mažiau trijų šakų pradiniam šviesos impulsui iš įėjimo šakos įvesti į regeneruojančią grandinę, optinio šakotuvo, turinčio ne mažiau trijų šakų, suformuotam šviesos impulsui iš regeneruojančios grandinės išvesti ir valdomo dviejų šakų optinio jungiklio, skirto regeneruojančiai grandinei uždarai sujungti arba ją nutraukti.

Minėta regeneruojanti grandinė yra žiedinė grandinė, kurioje yra išdėstyta:

bent vienas stiprintuvas ir dvi netiesinės medžiagos, pasižyminčios optiniu Kerro efektu, pakaitomis su atitinkamais filtrais.

Minėta įrenginio regeneruojanti grandinė yra tiesinė, kurioje yra išdėstyta bent vienas stiprintuvas ir

du filtrai tarp kurių išdėstyta bent viena minėta netiesinė medžiaga, pasižyminti optiniu Kerro efektu.

Šviesos impulso formavimo įrenginys yra surinktas iš skaidulinių komponentų ir optinių skaidulų.

Pradinį šviesos impulso šaltinis (15) yra diodinio lazeris veikiantis stiprinimo perjungimo režimu.

Pradinis šviesos impulsas yra paties įrenginio suformuotas šviesos impulsas, kuris perduodamas įrenginio išėjimo šaką optiškai sujungiant su įrenginio pradinių impulsų įvedimo šaka.

### **IŠRADIMO NAUDINGUMAS**

Vienas svarbiausių šio būdo ir įrenginio pritaikymo privalumų yra atsikartojančių šviesos impulsų suformavimas iš pradinių impulsų, generuojamų laisvai pasirenkamais laiko momentais. Regeneratyviniu būdu suformuotas šviesos impulsas daugeliu atveju yra tiesiškai čirpuotas, šviesos impulso spektras ir gaubtinė neturi moduliacijų bei triukšmų, šviesos impulsas neturi pjedestalo ir papildomų nepageidaujamų satelitinių šviesos impulsų. Toks šviesos impulsas gali būti stiprinamas ir suspaudžiamas iki spektriškai ribotos trukmės, išgaunant didelio kontrasto ultra trumpą šviesos impulsą. Nepriklausomai nuo pradinių šviesos impulsų parametrų, suformuoti šviesos impulsai yra vienodi ir atsikartojantys, jų parametrai yra tiksliai apibrėžti įrenginio regeneruojančios grandinės parametrais (filtrų juostos plokščiui ir filtrų persiklojimu, netiesinės terpės netiesiškumu, stiprintuvo stiprinimu). Pradiniai šviesos impulsai vienas nuo kito pagal energiją ir trukmę gali skirtis eilėmis, tačiau suformuoti šviesos impulsai bus vienodi.

Pradiniai šviesos impulsai gali būti generuojami diodiniu lazeriu veikiančiu stiprinimo perjungimo režimu. Pradinių šviesos impulsų energija ir trukmė gali skirtis šimtus ir daugiau kartų lyginant su suformuotais šviesos impulsais.

Be to, siūlomas šviesos impulsų formavimo įrenginys gali būti pagamintas iš optinių skaidulų ir skaidulinių komponentų, tiek iš poliarizaciją išlaikančių, tiek ir iš neišlaikančių poliarizacijos, bei yra itin stabilus ir nejautrus išoriniams aplinkos trikdymams, aplinkos temperatūros svyravimams. Galimas labai platus praktinis suformuotų šviesos impulsų parametrų pasirinkimas (trukmė, energija, pasikartojimo dažnis, centrinis bangos ilgis, laikinės charakteristikos, spektrinės charakteristikos ir t.t.), priklausomai nuo įrenginio konstrukcijos (pasyvių ir aktyvių optinių skaidulų ilgių, skaidulų šerdies diametrų, filtrų spektrinės charakteristikos, stiprintuvo stiprinimo

charakteristikos). Tipiškai skaidulinis regeneratyvinis šviesos impulsų formavimo įrenginys gali suformuoti nanodžaulių (nJ) energijos ir apie 1 ps trukmės šviesos impulsus. Dažnu atveju, priklausomai nuo įrenginio konstrukcijos, suformuoti šviesos impulsai yra čirpuoti, todėl juos, išoriniame impulsų kompresoriuje galima suspausti į keletą dešimčių femtosekundžių trukmės šviesos impulsus.

Kitas privalumas, kad siūlomas šviesos impulsų formavimo būdas veikia nepriklausomai nuo visos regeneruojančios grandinės dispersijos, regeneruojančios grandinės dispersija gali būti lygi nuliui, gali būti normali arba anomali.

Kitas privalumas, kad įrenginys nesunkiai pagaminamas veikti bet kokiam bangos ilgiui kuris patenka į stiprintuvo stiprinimo juostą, nes regeneruojančią grandinę sudarantys optiniai elementai yra stiprintuvai, filtrai, netiesinės medžiagos, optiniai jungikliai ir optiniai šakotuvai.

Be to, įrenginio savikaina lyginant su analogiškais, tokių pačių parametrų, įrenginiais yra mažesnė, nes kiekvienas pakartotinis šviesos impulso regeneravimas realizuojamas toje pačioje regeneruojančioje grandinėje.

Kitas privalumas, kad įrenginys yra itin paprastos konstrukcijos ir nereikalauja didelės priežiūros. Įrenginys gali būti pagamintas iš standartinių, komerciškai prieinamų optinių komponentų.

Kitas privalumas, kad šviesos impulsų formavimo įrenginys gali veikti autogeneravimo režimu, kai suformuotas šviesos impulsas yra panaudojamas kaip pradinis impulsas, per vėlinimo liniją optiškai sujungiant suformuoto impulso išvedimo šaką su pradinio šviesos impulso įvedimo šaka.

Be to, šviesos impulsų formavimo įrenginys veikiantis autogeneravimo režimu gali būti savaime sužadintas iš spontaninių triukšmų.

Kitas privalumas, kad įrenginiu galima generuoti šviesos impulsus derinamu pasikartojimo dažniu ir derinamu vėlinimu tarp gretimų šviesos impulsų.

Išradimas detaliau paaiškinamas brėžiniais, kurie neapriboja išradimo apimties ir kuriuose pavaizduota:

Fig. 1 – pasiūlyto šviesos impulsų formavimo įrenginio optinė schema, kurioje visos optinės priemonės išdėstytos nuosekliai šviesos impulso sklidimo kelyje, sudarant žiedinę regeneravimo grandinę, kurioje pradinių šviesos impulsų įvedimo į

regeneruojančią grandinę, suformuotų šviesos impulsų išvedimo iš regeneruojančios grandinės ir regeneruojančios grandinės sujungimo/pertraukimo funkciją atlieka keturių šakų optinis jungiklis.

Fig. 2 – pasiūlyto regeneratyvinio šviesos impulsų formavimo įrenginio optinė schema, kurioje visos optinės priemonės išdėstytos nuosekliai šviesos impulso sklaidimo kelyje, sudarant žiedinę regeneruojančią grandinę, kurioje pradinių šviesos impulsų įvedimui į regeneruojančią grandinę panaudotas optinis šakotuvas, o suformuotų šviesos impulsų išvedimui iš regeneruojančios grandinės ir regeneruojančios grandinės sujungimo/pertraukimo funkciją atlieka trijų šakų optinis jungiklis.

Fig. 3 – pasiūlyto regeneratyvinio šviesos impulsų formavimo įrenginio optinė schema, kurioje visos optinės priemonės išdėstytos nuosekliai šviesos impulso sklaidimo kelyje, sudarant žiedinę regeneruojančią grandinę, kurioje pradinių šviesos impulsų įvedimo į regeneruojančią grandinę ir suformuotų šviesos impulsų išvedimo iš regeneruojančios grandinės funkciją atlieka optiniai šakotuvai, o regeneruojančios grandinės sujungimo/pertraukimo funkciją atlieka dviejų šakų optinis jungiklis.

Fig. 4 – pasiūlyto regeneratyvinio šviesos impulsų formavimo įrenginio optinė schema, kurioje visos optinės priemonės išdėstytos nuosekliai šviesos impulso sklaidimo kelyje, sudarant tiesinę regeneruojančią grandinę, kurioje šviesos impulsai pirmyn ir atgal sklinda ta pačia persiklojančia trajektorija ir kurioje pradinių šviesos impulsų įvedimo į regeneruojančią grandinę, suformuotų šviesos impulsų išvedimo iš regeneruojančios grandinės ir regeneruojančios grandinės sujungimo/pertraukimo funkciją atlieka keturių šakų optinis jungiklis.

Fig. 5 – pavaizduota keturių šakų akustooptinio jungiklio schema.

Fig. 6a – Fig. 6b – pavaizduoti pirmojo ir antrojo filtrų pralaidumai priklausomai nuo bangos ilgio pavyzdžiai.

Fig. 7. – Pradinių ir suformuotų impulsų laikinių profilių pavyzdžiai.

Fig. 8. – Impulso santykinio energijos pokyčio priklausomai nuo apėjimų skaičiaus regeneruojančia grandine pavyzdys.

Brėžiniuose naudojami sutrumpinimai:

NTM – netiesinė medžiaga;

F1, F2 – filtras 1, filtras 2;

FD – fotodetektorius;

VB – valdymo blokas;

PŠIŠ – pradinio šviesos impulso šaltinis.

### **IŠRADIMO REALIZAVIMO PAVYZDŽIAI**

Tekste minimas „impulsas“ suprantamas kaip „šviesos impulsas“. Siūlomas regeneratyvinis šviesos impulsų formavimo būdas apima pradinio šviesos impulso įvedimą į regeneruojančią grandinę, regeneruojančios grandinės sujungimą sudarant uždara regeneruojančią grandinę, pakartotinį-ciklišką šviesos impulso regeneravimą sujungtoje uždaroje regeneruojančioje grandinėje kol suformuoja regeneruojančios grandinės parametrais apibrėžtą (RGPA) šviesos impulsą užduotu tikslumu ir suformuoto šviesos impulso išvedimą iš regeneruojančios grandinės bei regeneruojančios grandinės pertraukimą taip, kad nebūtų toliau regeneruojamas šviesos impulsas, kur vienas pilnas šviesos impulso regeneravimo ciklas apima šią operacijų seką: šviesos impulso sustiprinimą stiprintuve, sustiprinto šviesos impulso spektro išplėtimą dėl Kerro efekto netiesinėje medžiagoje, spektriškai išplėsto šviesos impulso spektrinį atskyrimą pirmuoju filtru, kuris atskiria iš anksto pasirinktų bangos ilgių šviesos impulso spektro komponentus, kitų bangos ilgių šviesos impulso spektro komponentus pašalina iš regeneruojančios grandinės, pirmajame filtre spektriškai atskirto šviesos impulso, jeigu reikia sustiprinimą stiprintuve bei sustiprinto šviesos impulso spektro išplėtimą dėl Kerro efekto netiesinėje medžiagoje, spektriškai išplėsto šviesos impulso spektrinį atskyrimą antruoju filtru, kuris atskiria iš anksto pasirinktų bangos ilgių šviesos impulso spektro komponentus, tačiau paslinktus atžvilgiu bangos ilgių, kuriuos atskiria pirmasis filtras, o kitų bangos ilgių šviesos impulso spektro komponentus pašalina iš regeneruojančios grandinės. Pirmu ir antru filtrais atskiriamų šviesos impulso spektro komponentų bangos ilgiai yra paslinkti vieni kitų atžvilgiu tiek, kad jie nepersikloja, arba persikloja tik tiek, kad sujungtoje uždaroje regeneruojančioje grandinėje nedominuotų nuolatinės spinduliuotės (CW), triukšmų bei pulsuojančios spinduliuotės generacija, kuri nuslopina regeneruojamą šviesos impulsą. Be to, pradinis šviesos impulsas gali būti įvedamas bet kurioje regeneruojančios grandinės vietoje ir suformuotas šviesos

impulsas gali būti išvedamas bet kurioje regeneruojančios grandinės vietoje. Šviesos impulsų įvedimui ir išvedimui gali būti naudojami optiniai šakotuvai. Taip pat šviesos impulsas gali būti įvedamas ir išvedamas pro filtrus.

Siūlomas regeneratyvinis šviesos impulsų formavimo įrenginys apima šias optines priemones:

1-pirmasis filtras; 2- antrasis filtras; 3 – pirmasis stiprintuvas; 4 - pirmoji netiesinė medžiaga, pasižyminti optiniu Kerro efektu, 5 – antrasis stiprintuvas; 6 – antroji netiesinė medžiaga, pasižyminti optiniu Kerro efektu; 7, 7' ir 7'' – valdomi optiniai jungikliai, kur Fig. 1 ir Fig. 4 yra valdomas keturių šakų optinis jungiklis 7, Fig. 2 – valdomas trijų šakų optinis jungiklis 7' ir Fig. 3- valdomas dviejų šakų jungiklis 7''; 8-įvedimo šaka, 9- išvedimo šaka, 10 - regeneruojanti grandinė, kuri apima paminėtas optines priemones (3, 4, 1, 5, 6, 2), kurios pagal šviesos impulso sklaidimo trajektoriją Fig. 1 - Fig. 3 sujungtos nuosekliai, sudarant žiedinę regeneruojančią grandinę; 11- optinis šakotuvai, 12- šaka, išvedanti dalį šviesos impulsų energijos, 13- fotodetektorius, 14- valdymo blokas, 15- pradinio šviesos impulso šaltinis, 16- optinis izoliatorius, kuris, jeigu reikia, užtikrina vienakryptį spinduliuotės sklaidimą. Optinis šakotuvai 11 nukreipia tam tikrą dalį spinduliuotės galios, tame tarpe ir dalį šviesos impulsų energijos į šaką 12. Šaka 12 yra sujungta su fotodetektoriumi 13, kuris detektuoja šviesos impulsus ir perduoda signalą į valdymo bloką 14, sujungta su pradiniu šviesos impulsų šaltiniu 15 ir valdomu optiniu jungikliu 7. Pradžioje pradinis šviesos impulsų šaltinis 15 sugeneruoja pradinį šviesos impulsą, kuris per įvedimo šaką 8 nukreipiamas į valdomą optinį jungiklį 7 ir patenka į regeneruojančią grandinę 10, tuo metu kai pradinis šviesos impulsas patenka į regeneruojančią grandinę 10, valdymo blokas 14 perduoda valdymo signalą į valdomą optinį jungiklį 7 ir valdomas optinis jungiklis 7 sujungia bei uždaro regeneruojančią grandinę 10, regeneruojančioje grandinėje šviesos impulsas sklinda uždara žiedine trajektorija ir yra pakartotinai regeneruojamas. Fotodetektorius 13 detektuoja regeneruojamą šviesos impulsą ir perduoda signalą į valdymo bloką 14 ir kai suformuojamas atsikartojantis šviesos impulsas užduotu tikslumu arba yra detektuojamas iš anksto užduotas šviesos impulsų apėjimų skaičius regeneruojančia grandine, arba praėjus iš anksto užduotam laiko tarpui, per kuri yra žinoma, kad susiformuoja šviesos impulsas užduotu tikslumu, valdymo blokas 14 perduoda valdymo signalą į valdomą optinį jungiklį 7 ir valdomas optinis jungiklis 7 perjungiamas pertraukiant uždara

regeneruojančią grandinę 10 ir nukreipiant suformuotą šviesos impulsą į išėjimo šaką 9. Vienas šviesos impulso regeneravimo ciklas sujungtoje uždaroje regeneruojančioje grandinėje vyksta tokia tvarka: Stiprintuve 3 sustiprintas šviesos impulsas spektriškai išplečiamas netiesinėje medžiagoje 4, spektriškai išplėstas šviesos impulsas sklinda pro pirmą filtrą 1, kuris atskiria-praleidžia tik tam tikrų bangos ilgių šviesos impulso spektrinius komponentus, kitų bangos ilgių šviesos impulso spektrinius komponentus pašalina iš regeneruojančios grandinės 10. Pro pirmąjį filtrą 1 prasklidęs spektriškai atskirtas šviesos impulsas prasklinda pro optinį izoliatorių 16 bei optinį šakotuvą 11 ir nukreipiamas į stiprintuvą 5. Stiprintuve 5 sustiprintas (bet nebūtinai) šviesos impulsas vėl spektriškai išplečiamas netiesinėje medžiagoje 6 ir patenka į antrą filtrą 2, kuris atskiria-praleidžia tik tam tikrų bangos ilgių impulso spektrinius komponentus, o kitų bangos ilgių šviesos impulso spektrinius komponentus pašalina iš regeneruojančios grandinės 10. Pirmas filtras 1 ir antras filtras 2 atskiria-praleidžia vienas kitų atžvilgiu paslinktas bangos ilgių sritis kurios nepersikloja arba persikloja iki tiek, kad sujungtoje uždaroje regeneruojančioje grandinėje 10 nepradėtų dominuoti nuolatinės spinduliuotės (CW), triukšmų bei pulsuojančios spinduliuotės generacija, kuri nuslopina regeneruojamą šviesos impulsą. Pro antrąjį filtrą 2 prasklidę spektriškai atskirti šviesos impulsai per valdomą keturių šakų optinį jungiklį 7 vėl nukreipiami į stiprintuvą 3. Po to operacijų seka cikliška vėl kartojama kol suformuojamas atsikartojantis šviesos impulsas užduotu tikslumu, suformuotas šviesos impulsas, perjungus valdomą keturių šakų optinį jungiklį 7, iš regeneruojančios grandinės 10 nukreipiamas į išėjimo šaką 9 ir tuo pačiu yra pertraukiama uždara regeneruojanti grandinė 10. Be to, stiprintuvas 5 nėra būtinas, jei pirmu filtru 1 spektriškai atskirto-praėjusio impulso smailinė galia yra pakankama, kad jo spektras išplistų netiesinėje medžiagoje 6. Optinis izoliatorius 16 yra naudojamas sklindančios spinduliuotės kryptingumui užtikrinti sujungtoje uždaroje regeneruojančioje grandinėje, taip pat optinis izoliatorius slopina spontanią spinduliuotės emisiją. Fig. 1 pavaizduotas regeneratyvinis šviesos impulsų formavimo įrenginys kurį sudaro žiedu sujungta regeneruojanti grandinė 10, kurioje patalpintas valdomas keturių šakų optinis jungiklis 7 regeneruojančios grandinės sujungimui/pertraukimui, pradinio šviesos impulso įvedimui į regeneruojančią grandinę 10 per įvedimo šaką 8 ir suformuoto šviesos impulso išvedimui per išėjimo šaką 9 iš regeneruojančios grandinės 10. Fotodetektorius 13 detektuoja regeneruojamą šviesos impulsą ir perduoda signalą į valdymo bloką 14 ir kai

suformuojamas atsikartojantis impulsas užduotu tikslumu arba yra detektuojamas iš anksto užduotas šviesos impulsų apėjimų skaičius regeneruojančia grandine, arba praėjus iš anksto užduotam laiko tarpui, per kuri yra žinoma, kad iš pradinio šviesos impulso susiformuoja šviesos impulsas užduotu tikslumu (pastaruoju atveju fotodetektorius 13 nereikalingas), valdymo blokas 14 perduoda valdymo signalą į optinį jungiklį 7 ir optinis jungiklis 7 perjungiamas pertraukiant uždarą regeneruojančią grandinę 10 ir nukreipiant suformuotą šviesos impulsą į išėjimo šaką 9. Regeneruojančią grandinę sudaro šie elementai: 1 – pirmasis filtras; 2 – antrasis filtras; 4, 6 – netiesinės medžiagos, kuriuose dėl optinio Kerro efekto (fazinės savimoduliacijos, arba kryžminės moduliacijos, arba keturbangio maišymo) išplinta šviesos impulso spektras; 3, 5 – stiprintuvai, kuriuose šviesos impulsas yra sustiprinamas; 7 – valdomas keturių šakų optinis jungiklis regeneruojančios grandinės 10 sujungimui/pertraukimui, pradinio šviesos impulso įvedimui į regeneruojančią grandinę 10 per įvedimo šaką 8 ir suformuoto šviesos impulso išvedimui iš regeneruojančios grandinės per išėjimo šaką 9; 16 – optinis izoliatorius praleidžiantis spinduliuotę (tame tarpe ir šviesos impulsus) tik viena kryptimi, o priešinga kryptimi blokuoja, 11 – optinis šakotuvus nukreipiantis dalį šviesos impulso energijos į šaką 12, kuri sujungta su fotodetektoriumi 13, skirtu regeneruojamo šviesos impulso dinamikos regeneruojančioje grandinėje detektavimui; 10 – žiedinė regeneruojanti grandinė, kuri sujungiama/pertraukiama valdomu keturių šakų optiniu jungikliu 7. Valdomo keturių šakų akustooptinio jungiklio 7 schema pavaizduota Fig. 5. Valdomas keturių šakų optinis jungiklis 7 taip pat gali būti elektrooptinis arba MEMS tipo jungiklis.

Fig. 2 pavaizduotas kitas regeneratyvinis šviesos impulsų formavimo įrenginys, kuris panašus į įrenginį pavaizduotą Fig. 1, tačiau skiriasi tuo, kad pradinio šviesos impulso įvedimui per įvedimo šaką 8 į regeneruojančią grandinę 10 panaudotas optinis šakotuvus 17, o suformuoto šviesos impulso išvedimui iš regeneruojančios grandinės funkciją ir regeneruojančios grandinės pertraukimą/sujungimą atlieka valdomas trijų šakų optinis jungiklis 7'. Optinis šakotuvus 17 gali būti, pavyzdžiui, 50/50 dalinimo santykio, tai reiškia, kad tik pusę pradinio šviesos impulso energijos pateks į regeneruojančią grandinę 10 ir atitinkamai pro optinį šakotuvą 17 praeis tik pusė regeneruoto šviesos impulso energijos, dėl to atitinkamai turi būti numatytas dvigubai aukštesnis stiprintuvo 3

stiprinimas, kad būtų kompensuojami patirti nuostoliai optiniame šakotuve 17. Be to, pradinio šviesos impulso įvedimo ir suformuoto šviesos impulso išvedimo šakos gali būti sukeistos vietomis. Tada pradinis šviesos impulsas bus įvedamas į regeneruojančią grandinę 10 per valdomą trijų šakų optinį jungiklį 7', o suformuotas šviesos impulsas bus išvedamas per optinį šakotuvą 17.

Fig. 3 pavaizduotas kitas regeneratyvinis šviesos impulsų formavimo įrenginys, kuris panašus į įrenginį pavaizduotą Fig.1, kurį sudaro panaši žiedu sujungta regeneruojanti grandinė 10, tačiau skiriasi tuo, kad į regeneruojančią grandinę 10 pradinis šviesos impulsas įvedamas per optinio šakotuvo 17 įvedimo šaką 8 ir iš regeneruojančios grandinės 10 išvedamas šviesos impulsas per optinio šakotuvo 18 išėjimo šaką 9, o regeneruojančios grandinės 10 pertraukimą/sujungimą atlieka valdomas dviejų šakų optinis jungiklis 7". Iš pradžių valdomas dviejų šakų optinis jungiklis 7" sujungia ir uždaro regeneruojančią grandinę, tada pradinis šviesos impulsas, sugeneruotas pradinių šviesos impulsų šaltinio 15, per įvedimo šaką 8 ir optinį šakotuvą 17 patenka į sujungtą uždarą regeneruojančią grandinę 10. Regeneruojančioje grandinėje 10 yra pakartotinai regeneruojamas šviesos impulsas tol kol susiformuoja atsikartojantis šviesos impulsas iš anksto užduotu tikslumu arba susiformuoja šviesos impulsas regeneruojant jį iš anksto numatytą pakartojimų skaičių, arba šviesos impulsas regeneruojamas tam tikrą iš anksto užduotą laiko tarpą, per kurį iš pradinio šviesos impulso susiformuoja šviesos impulsas užduotu tikslumu ir kai šviesos impulsas susiformuoja, valdymo blokas 14 perduoda valdymo signalą į valdomą dviejų šakų optinį jungiklį 7", kuris pertraukia uždarą regeneruojančią grandinę 10 ir regeneruojamas impulsas regeneruojančioje grandinėje 10 išnyksta. Kas kiekvieną apėjimą regeneruojančią grandinę 10 dalis regeneruojamo šviesos impulso energijos yra atidalinama optiniu šakotuvu 18 ir nukreipiama į išėjimo šaką 9 kuri optiškai sujungta su impulsų išrinkimo įtaisu 19, kuris iš atidalintų regeneruojamų šviesos impulsų sekos išrenką suformuotą šviesos impulsą, o kitus atidalintus dar nesusiformavusius užduotu tikslumu šviesos impulsus užblokuoja. Valdomas dviejų šakų optinis jungiklis 7" gali būti pakankamai lėtas, nes jo pagrindinė funkcija yra pertraukti uždarą regeneruojančią grandinę taip, kad regeneruojančioje grandinėje išnyktų regeneruojamas šviesos impulsas iki kol į regeneruojančią grandinę bus įvestas naujas pradinis šviesos impulsas. Nėra būtina, kad regeneruojamas šviesos impulsas išnyktų per vieną apėjimą regeneruojančia

grandine, nes suformuotas šviesos impulsas yra išrenkamas iš atidalintų šviesos impulsų sekos impulsų išrinkimo įtaisų 19.

Fig. 4 pavaizduotas kitas, regeneratyvinis šviesos impulsų formavimo įrenginys, kai visos optinės priemonės (2, 6, 3, 4, 1) išdėstytos nuosekliai ir šviesos impulso sklaidimo trajektorijos pirmyn ir atgal sutampa ir sudaro tiesinę regeneruojančią grandinę 10, o pradinis šviesos impulsas į regeneruojančią grandinę 10 įvedamas ir suformuotas šviesos impulsas iš regeneruojančios grandinės 10 išvedamas per valdomą keturių šakų optinį jungiklį 7. Optiniu šakotuviu 11 atskirti regeneruojami šviesos impulsai per šaką nukreipiami 12 į fotodetektorius 13, kuris detektuoja regeneruojamą šviesos impulsą ir perduoda signalą į valdymo bloką 14 ir kai suformuojamas atsikartojantis šviesos impulsas užduotu tikslumu arba yra detektuojamas iš anksto užduotas šviesos impulsų apėjimų skaičius regeneruojančia grandine 10, arba praėjus iš anksto užduotam laiko tarpui, per kuri yra žinoma, kad iš pradinio šviesos impulso susiformuoja šviesos impulsas užduotu tikslumu, valdymo blokas 14 perduoda valdymo signalą į valdomą keturių šakų optinį jungiklį 7 ir valdomas keturių šakų optinis jungiklis 7 perjungiamas pertraukiant uždara regeneruojančią grandinę 10 ir nukreipiant suformuotą šviesos impulsą į išėjimo šaką 9. Formuojamo šviesos impulso vienas regeneravimo ciklas regeneruojančioje grandinėje 10 vyksta tokia eilės tvarka: Stiprintuve 3 sustiprintas šviesos impulsas spektriškai išplečiamas netiesinėje medžiagoje 4, spektriškai išplėstas šviesos impulsas patenka į pirmą filtrą 1, kuris atskiria ir grąžina tik tam tikrų bangos ilgių šviesos impulso spektrinius komponentus, kitų bangos ilgių šviesos impulso spektriniai komponentai yra pašalinami iš regeneruojančios grandinės 10. Pirmu filtru 1 spektriškai atskirtas ir grąžintas šviesos impulsas vėl patenka į netiesinę medžiagą 4, sklindant šviesos impulsui netiesine medžiaga 3 atgaline kryptimi, šviesos impulso spektras gali nežymiai plisti, nes spektriškai atskirto ir grąžinto šviesos impulso smailinė galia gali būti nepakankama, po to šviesos impulsas vėl patenka į stiprintuvą 3, stiprintuve 3 sustiprintas šviesos impulsas prasklinda pro valdomą keturių šakų optinį jungiklį 7 ir spektriškai išplečiamas kitoje netiesinėje medžiagoje 6 (bet nebūtinai) ir patenka į antrą filtrą 2, kuris atskiria-grąžina tik tam tikrų bangos ilgių šviesos impulso spektrinius komponentus, o kitų bangos ilgių šviesos impulso spektrinius komponentus pašalina iš regeneruojančios grandinės 10. Kartu pirmas filtras 1 ir antras filtras 2 atskiria ir grąžina paslinktus vienus kitų atžvilgiu pagal

bangos ilgus šviesos impulso spektrinius komponentus kurie nepersikloja arba persikloja iki tiek, kad valdomu keturių šakų optinių jungikliu 7 sujungtoje regeneruojančioje grandinėje nepradėtų dominuoti nuolatinės spinduliuotės (CW), triukšmų bei pulsuojančios spinduliuotės generacija, kuri nuslopina regeneruojamą šviesos impulsą. Antru filtru 2 spektriškai atskirtas ir grąžintas šviesos impulsas vėl įvedamas atgal į netiesinę medžiagą 6 (bet nebūtinai), sklindant šviesos impulsui netiesine medžiaga 6 atgaline kryptimi, spektras gali nežymiai plisti, nes spektriškai atskirto ir grąžinto šviesos impulso smailinė galia gali būti nepakankama. Po to šviesos impulsas vėl patenka į stiprintuvą 3 ir operacijų seka cikliška kartojama iki tol kol suformuojamas atsikartojantis šviesos impulsas užduotu tikslumu arba šviesos impulsas regeneruojamas iš anksto numatytą pakartojimų skaičių, arba iš anksto numatytą laiko tarpą per kurį iš pradinio šviesos impulso susiformuoja šviesos impulsas užduotu tikslumu. Tiesinėje regeneruojančioje grandinėje, kad būtų regeneruojamas šviesos impulsas, turi būti nemažiau kaip vienas stiprintuvas, viena netiesinė medžiaga ir du filtrai kurių atskirti-grąžinti šviesos impulso spektriniai komponentai pagal bangos ilgus nepersikloja arba persikloja iki tiek, kad nepradėtų dominuoti nuolatinės spinduliuotės (CW), triukšmų bei pulsuojančios spinduliuotės generacija, kuri nuslopina regeneruojamą impulsą. Valdomas keturių šakų optinis jungiklis 7 turi būti pakankamai greitas, kad spėtų persijungti iš vienos padėties į kitą tol kol pradinis šviesos impulsas pradedant nuo valdomo keturių šakų optinio jungiklio 7 prasklinda pro stiprintuvą 3, netiesinę medžiagą 4 ir grįžta nuo filtro 1 pro netiesinę medžiagą 4 ir stiprintuvą 3 iki valdomo keturių šakų optinio jungiklio 7.

Fig. 5 pavaizduota valdomo keturių šakų akustooptinio jungiklio 7 schema, kurioje optinis perjungimas įvyksta dėl šviesos pluošto Brego difrakcijos, kurią sukelia optine medžiaga bėganti akustinė banga 20. Šviesos impulsas sklindantis pradinio šviesos impulso įvedimo šaka 8 yra nukreipiamas optiniu keliu 21 ir jei nėra akustinės bangos 20, šviesos impulsas toliau sklinda keliu 22 ir patenka į regeneruojančią grandinę 10. Regeneruojančia grandine 10 atsklindantis šviesos impulsas nukreipiamas optiniu keliu 23 ir akustinės bangos 20 optinėje medžiagoje sužadintoje lūžio rodiklio gardelėje difraguodamas šviesos impulsas yra nukreipiamas optiniu keliu 22 ir vėl patenka į regeneruojančią grandinę 10. Tačiau jei akustinės bangos 20 nėra, šviesos impulsas sklisdamas keliu 23 ne difraguoja, o toliau sklinda optiniu keliu 24 ir patenka į suformuoto šviesos impulso išėjimo šaką 9. Bendru atveju,

nesant akustinei bangai 20, šviesos impulsas sklinda optiniai keliais 21 ir 22, arba šviesos impulsas sklinda optiniai keliais 23 ir 24, o esant akustinei bangai 20, šviesos impulsas difraguoja ir sklinda keliais 21 ir 24, arba sklinda keliais 23 ir 22. Taip pat akustootptinis jungiklis 7 gali būti jungimas taip, kad regeneruojanti grandinė 10 būtų sujungta per optinius kelius 23 ir 24, o pradinio impulso įvedimo šaka 8 su regeneruojančia grandine 10 būtų sujungta per optinius kelius 21 ir 24, ir suformuotas šviesos impulsas būtų išvedamas iš regeneruojančios grandinės 10 į išvedimo šaka 9 per optinius kelius 23 ir 22. Pastaruoju atveju pradinis šviesos impulsas būtų įvedamas ir atitinkamai suformuotas šviesos impulsas būtų išvedamas pertraukiant regeneruojančią grandinę esant sužadintai akustinei bangai 20, tokių būdų naudojant akustootptinį jungiklį išvedamas suformuotas šviesos impulsas yra didesnio kontrasto.

Fig. 6 pavaizduoti pirmojo 1 ir antrojo 2 filtrų, šiuo atveju juostinių (angl. band-pass) filtrų, pralaidumo charakteristikų priklausomai nuo bangos ilgio, pavyzdžiai. Fig. 6a pavaizduotos pirmojo 1 ir antrojo 2 juostinių filtrų pralaidumo juostos dalinai persikloja. Juostinių filtrų (1, 2) pralaidumo juostos gali nežymiai persikloti, iki kol sujungtoje uždaroje regeneruojančioje grandinėje 10 nepradedą dominuoti nuolatinės spinduliuotės (CW), triukšmų bei pulsuojančios spinduliuotės generacija, kuri nuslopina regeneruojamą šviesos impulsą. Fig. 6b pavaizduotos pirmojo 1 ir antrojo 2 juostinių filtrų pralaidumo juostos yra visiškai atskirtos.

Fig. 7 pavaizduoti pradinių 25, 26 ir suformuotų 27 šviesos impulsų laikinių profilių pavyzdžiai, pirmu atveju – kai pradinio šviesos impulso 25 amplitudė mažesnė ir trukmė didesnė daugiau nei šimtą kartų, atitinkamai, lyginant su suformuoto šviesos impulso 27 amplitude ir trukme, atitinkamai, antru atveju – kai pradinio šviesos impulso 26 energija yra daugiau nei šimtą kartų mažesnė nei suformuoto šviesos impulso 27 energija. Nepriklausomai nuo pradinių šviesos impulsų 25, 26 energijos ir trukmės, suformuoti šviesos impulsai 27 yra identiški.

Fig. 8 pavaizduotas santykinis impulso energijos pokytis priklausomai nuo apėjimų skaičiaus sujungta uždara regeneruojančia grandine 10. Santykinis energijos pokytis parodo kiek santykinai pakito šviesos impulso energija pakartotinai šviesos impulsui apėjus regeneruojančia grandine 10. Santykinis šviesos impulso energijos pokytis apibūdinamas taip:  $|E_n - E_{n-1}| / (E_n + E_{n-1}) \times 100\%$ , kur  $E_n$  yra šviesos impulso energija po  $n$  apėjimų,  $E_{n-1}$  yra šviesos impulso energija po  $n - 1$  apėjimų ir

$n$  yra apėjimų skaičius regeneruojančia grandine 10. Kai šviesos impulsas yra galutinai suformuotas, santykinis šviesos impulso energijos pokytis artėja prie nykstamai mažos vertės arba svyruoja apie tam tikra santykinai mažą vertę, šiuo konkrečiu atveju galutinai suformuoto šviesos impulso santykinis energijos pokytis yra mažesnis nei  $10^{-6}$  procentų. Po pirmųjų apėjimų regeneruojančia grandine, šviesos impulso energija santykinai pakinta virš 100%, t. y. po kiekvieno regeneravimo ciklo šviesos impulso energija pakinta kelis kartus. Ir tik po ketvirto apėjimo regeneruojančia grandine santykinis šviesos impulso energijos pokytis yra mažesnis nei 1%. Toliau didinant apėjimų skaičių regeneruojančia grandine, šviesos impulso energija kinta vis mažiau ir mažiau. Kaip matyti iš šio pavyzdžio, reikalingas pakankamai didelis šviesos impulso apėjimų skaičius regeneruojančia grandine, kad būtų suformuotas pakankamai tikslai atsikartojantis šviesos impulsas.

Be to, šviesos impulsų formavimo įrenginiu vienu metu gali būti suformuojamas šviesos impulsų pliūpsnis kurį sudaro kelių vienodų šviesos impulsų grupė, tik svarbu, kad tarp pirmo ir paskutinio šviesos impulsų atstumas nebūtų didesnis nei pilnas apėjimas regeneruojančia grandine 10. Priklausomai nuo regeneruojančioje grandinėje esančių stiprintuvų 3, 5 galios, vienu metu uždaroje regeneruojančioje grandinėje 10 gali cirkuliuoti tik tam tikras šviesos impulsų skaičius, kuris proporcingas stiprintuvų 3, 5 galiai. Kiekvienu apėjimu uždara regeneruojančia grandine 10 šviesos impulsas dėl pakaitinio spektrinio filtravimo praranda didžiąją dalį savo energijos, kuri turi būti atstatyta stiprintuvuose 3, 5, tačiau jei stiprintuvų galios pakanka atstatyti tik vienam šviesos impulsui, tai iš šviesos impulsų grupės išliks tik vienas suformuotas impulsas, o kiti šviesos impulsai išnyks.

Regeneratyviniame šviesos impulsų formavimo būde ir įrenginyje šviesos impulsas yra suformuotas tada, kai pakartotinai šviesos impulsui apėjus regeneruojančia grandine regeneruoto šviesos impulso parametrai nepakinta ir yra lygiai tokie patys kaip ir prieš tai buvusio šviesos impulso parametrai, arba pakinta mažiau nei iš anksto užduotu tikslumu. Pavyzdžiui, jei matuosime impulso energiją, tai šviesos impulsas yra suformuotas kai tenkinama sąlyga  $|E_n - E_{n-1}| < \varepsilon$ , kur  $E_n$  yra šviesos impulso energija po  $n$  apėjimų,  $E_{n-1}$  yra šviesos impulso energija po  $n - 1$  apėjimų,  $\varepsilon$  yra iš anksto užduotas šviesos impulso energijos pokytis ir  $n$  yra apėjimų skaičius regeneruojančia grandine. Kitais atvejais, ypač kai pradinis šviesos impulsas yra atsikartojantis, galima laikyti, kad šviesos impulsas suformuojamas po  $n$

apėjimų regeneruojančia grandine, kur  $n > 1$ . Kitaip tariant šviesos impulsas suformuojamas per iš anksto užduotą apėjimų skaičių,  $n$ , regeneruojančia grandine, nepriklausomai nuo to koku tikslumu atsikartoja suformuotas šviesos impulsas po kiekvieno sekančio apėjimo. Regeneratyvinis šviesos impulsų formavimo būdas ir įrenginys turi tenkinti sąlygą, kad impulsas uždara regeneruojančia grandine apeina daugia nei vieną kartą, pavyzdžiui 2 kartus, 100 kartų arba  $3/2$  kartų.

Kai kuriais atvejais, priklausomai nuo regeneruojančios grandinės parametrų, šviesos impulsas gali atsikartoti tik kas antrą apėjimą uždarai sujungta regeneruojančia grandine, tuomet šviesos impulsas pilnai regeneruojamas per du apėjimus. Lygiai taip pat galimas atvejis kai šviesos impulsas pilnai regeneruojamas per tris, ar daugiau apėjimų uždarai sujungta regeneruojančia grandine. Bendru atveju šviesos impulsas gali būti pilnai regeneruojamas per  $k$  apėjimų uždara regeneruojančia grandine, kur  $k = 1, 2, 3, 4 \dots$

Pradinis šviesos impulsas gali būti generuojamas: diodiniu lazeriu veikiančiu stiprinimo perjungimo režimu; nuolatinės veikos DFB diodinio lazerio spinduliuotę moduluojant elektrooptiniu intensyvumo modulatoriumi; per vėlinimo liniją sujungiant regeneratyvinio šviesos impulsų formavimo įrenginio suformuotų impulsų išėjimo šaką 9 su įrenginio pradinių impulsų įvedimo šaka 8.

Filtrai gali būti: dielektrinis filtras, interferencinis filtras, dichroinis veidrodis, skaidulinė Brego gardelė, tūrinė Brego gardelė, difrakcinė gardelė, prizmė, Lyot filtras, akustooptinis derinamas filtras, FabryPerot interferometras, stiprintuvas su atitinkama stiprinimo ir sugerties juosta ir t.t. Pagal spektrinį atsaką filtras gali būti juostinis, ilgąsias arba trumpaisiais bangas praleidžiantis, Gauso formos, Lorencio formos, parabolės formos, stačiakampės formos, trikampio formos ir bet kokios kitos formos. Vienas iš pavyzdžių gali būti Gauso filtras sudarytas iš optinės skaidulos prie kurios privirintas endcaps'as, už optinės skaidulos židinio nuotolyje patalpintas gradientinis lęšis, o kitoje lęšio pusėje, taip pat židinio nuotolyje, patalpinta atspindinti difrakcinė gardelė, kuri orientuota Littrow difrakcijos kampu.

Pirmasis ir antrasis filtrai, spektriškai atskiriantys skirtingų bangos ilgių šviesos impulsus, yra parinkti taip, kad jais atskirti spektrai nepersikloja iki kol impulsų spektras išplečiamas bent vienoje minėtoje netiesinėje medžiagoje, arba jais atskirti spektrai persikloja dalinai. Dėl spektrų persiklojimo regeneruojančioje

grandinėje prasideda savaiminė spinduliuotės generacija, ji stiprėja iki kol įsisotina regeneruojančios grandinės stiprintuvai ir jų stiprinimas susilygina su visais nuostoliais esančiais regeneruojančioje grandinėje. Kuo filtrais atskirti spektrai labiau persikloja pagal amplitudę, tuo mažesni nuostoliai regeneruojančioje grandinėje atitinkamų bangos ilgių generuojamai spinduliuotei, tuo labiau dėl stiprintuvų įsisotinimo sumažėja stiprintuvų stiprinimas ir galiausiai savaime generuojama spinduliuotė nukonkuruoja regeneruojamus šviesos impulsus ir jie išnyksta. Tipiškai filtrais atskirti spektrai gali persikloti iki 30% ir netgi daugiau atžvilgiu jų amplitudžių.

Impulsas spektriškai išplečiamas gali būti dėl bet kurių netiesinių reiškinių, kurie susiję su optinio Kerro efektu, t.y. fazinė savimoduliacija, kryžminė fazinė moduliacija, keturbangis maišymas. Bendru atveju spektrinis impulsų plėtimas gali būti realizuojamas bet kokioje optiškai skaidrioje netiesinėje medžiagoje, tai gali būti: optinė skaidula, fotoninių kristalų skaidula, fotoninis kristalas, stiklas, skystis, stiprinimo skaidula arba bet kokia kita optiškai skaidri medžiaga kurios kubinis optinis netiesiškumas nelygus nuliui. Taip pat netiesinė medžiaga gali būti kvadratinio jautrio netiesinė medžiaga kurioje dėl faziškai išderinto kaskadinio kvadratinio netiesinio proceso sukuriamas panašus Kero efektui netiesiškumas ko pasėkoje išplinta šviesos impulso spektras. Pavyzdžiui, kvadratinio jautrio netiesinė medžiaga, kurioje sukuriamas panašus Kero efektui netiesiškumas, gali būti periodiškai orientuotas ličio neobato (PPLN) bangolaidis. Šis būdas aprašytas moksliniame straipsnyje: Mingming Nie, Jiarong Wang, and Shu-Wei Huang, "Solid-state Mamyshev oscillator," *Photonics Research* 7, 1175-1181 (2019).

Optinis šakotuvas gali būti nuo poliarizacijos ir spektro nepriklausantis pluošto daliklis kuris atskiria/prijungia tam tikrą dalį šviesos impulso energijos, taip pat optinis šakotuvas gali būti bet koks bangos ilgiui jautrus optinis elementas kuris atskiria tik tam tikrą šviesos impulso spektro dalį, arba optinis šakotuvas gali būti poliarizacijai jautrus elementas kuris atskiria tam tikrą šviesos impulso poliarizacijos komponentą.

## IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Šviesos impulso formavimo būdas, skirtas iš pradinio šviesos impulso suformuoti regeneruojančios grandinės parametrais apibrėžtą (RGPA) šviesos impulsą, apimantis:

- pradinio šviesos impulso įvedimą į regeneruojančią grandinę,
- šviesos impulso formavimą jį regeneruojant regeneruojančioje grandinėje,
- suformuoto RGPA šviesos impulso išvedimą iš regeneruojančios grandinės,

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

šviesos impulsas formuojamas pakartotinai jį regeneruojant toje pačioje regeneruojančioje grandinėje, kuri valdomu optiniu jungikliu yra uždarai sujungta tol, kol išpildoma viena iš šių sąlygų:

a) formuojamas šviesos impulsas regeneruojamas toje pačioje regeneruojančioje grandinėje iki suformuojamas RGPA šviesos impulsas užduotu tikslumu,

arba

b) formuojamas šviesos impulsas regeneruojamas toje pačioje regeneruojančioje grandinėje iki iš anksto užduoto skaičiaus kartų arba iš anksto numatytą laiko tarpą per kurį iš pradinio šviesos impulso suformuojamas RGPA šviesos impulsas užduotu tikslumu

išpildžius pasirinktinai bet kurią iš minėtų a) ar b) sąlygų, suformuotas RGPA šviesos impulsas yra išvedamas iš regeneruojančios grandinės ir uždarai sujungta regeneruojanti grandinė minėtu valdomu optiniu jungikliu yra pertraukiama taip, kad regeneruojančioje grandinėje nebūtų toliau regeneruojamas šviesos impulsas iki kol į regeneruojančią grandinę bus įvestas kitas pradinis šviesos impulsas.

2. Šviesos impulso formavimo įrenginys, skirtas iš pradinio šviesos impulso suformuoti regeneruojančios grandinės parametrais apibrėžtą (RGPA) šviesos impulsą, apimantis regeneruojančią grandinę, turinčią pradinio šviesos impulso įvedimo į regeneruojančią grandinę priemonę ir suformuoto RGPA šviesos impulso išvedimo iš regeneruojančios grandinės priemonę,

b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad pradinio šviesos impulso įvedimo į regeneruojančią grandinę (10) priemonė ir suformuoto RGPA šviesos impulso išvedimo iš regeneruojančios grandinės (10) priemonė yra sukonfigūruotos kaip į regeneruojančią grandinę (10) įjungta bent viena valdoma optinė perjungimo priemonė, kuri pagal valdymo bloko (14) signalą

iš šviesos impulso šaltinio (15) per įvedimo šaką (8) įveda pradinį šviesos impulsą į minėtą regeneruojančią grandinę (10), ir tuo metu uždarai sujungia regeneruojančią grandinę (10) ne vėliau kol įvestas šviesos impulsas pirmą kartą sklisdamas regeneruojančia grandine (10) sugrįžta iki valdomos optinės perjungimo priemonės, ir įvestas šviesos impulsas toliau uždarai sujungtoje regeneruojančioje grandinėje (10) yra pakartotinai-cikliškai regeneruojamas iki tol, kol

suformuojamas RGPA šviesos impulsas užduotu tikslumu

arba

suformuojamas šviesos impulsas jį regeneruojant iš anksto užduotą skaičių kartų arba iš anksto numatytą laiko tarpą, per kurį iš pradinio šviesos impulso susiformuoja RGPA šviesos impulsas užduotu tikslumu,

išpildžius pasirinktinai bet kurią iš minėtų a) ar b) sąlygų, suformuotas RGPA šviesos impulsas užduotu tikslumu išvedamas iš regeneruojančios grandinės ir uždarai sujungta regeneruojanti grandinė nutraukiama iki kol bus įvestas kitas pradinis šviesos impulsas.

3. Įrenginys pagal 2 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad į regeneruojančią grandinę yra įjungtas optinis šakotuvas (11), nukreipiantis dalį šviesos impulso energijos į fotodetektorių (13), skirtą regeneruojamo šviesos impulso dinamikos regeneruojančioje grandinėje detektavimui, suformuojant signalą valdymo blokui (14).

4. Įrenginys pagal bet kurį iš 2–3 punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad valdoma minėta optinė perjungimo priemonė yra keturių šakų valdomas optinis jungiklis (7), įjungtas į regeneruojančią grandinę (10) ir sukonstruotas taip, kad priklausomai nuo signalo, gauto iš valdymo bloko (14), gali įvesti pradinį impulsą į

regeneruojančią grandinę (10) ir uždarai ją sujungti, bei suformuotą RGPA šviesos impulsą išvesti iš regeneruojančios grandinės (10) ir ją nutraukti.

5. Įrenginys pagal bet kurį iš 2–3 punktų, **b e s i s k i r i a n t i s** tuo, kad minėta valdoma optinė perjungimo priemonė yra sudaryta iš optinio šakotuvo (17), turinčio ne mažiau trijų šakų pradiniam šviesos impulsui iš įėjimo šakos (8) įvesti į regeneruojančią grandinę (10) ir valdomo trijų šakų optinio jungiklio (7'), skirto iš regeneruojančios grandinės (10) suformuotam RGPA šviesos impulsui nukreipti į išėjimo šaką (9) ir nutraukti regeneruojančią grandinę.

6. Įrenginys pagal bet kurį iš 2–3 punktų, **b e s i s k i r i a n t i s** tuo, kad minėta valdoma optinė perjungimo priemonė yra sudaryta iš optinio šakotuvo (17), turinčio ne mažiau trijų šakų pradiniam šviesos impulsui iš įėjimo šakos (8) įvesti į regeneruojančią grandinę (10), optinio šakotuvo (18), turinčio ne mažiau trijų šakų, suformuotam šviesos impulsui iš regeneruojančios grandinės (10) išvesti ir valdomo dviejų šakų optinio jungiklio (7''), skirto regeneruojančiai grandinei (10) uždarai sujungti arba ją nutraukti.

7. Įrenginys pagal bet kurį iš 2-6 punktų, **b e s i s k i r i a n t i s** tuo, kad minėta regeneruojanti grandinė (10) yra žiedinė grandinė, kurioje yra išdėstyta:

- bent vienas stiprintuvas (3, 5);
- dvi netiesinės medžiagos (4) ir (6), pasižyminčios optiniu Kerro efektu, pakaitomis su atitinkamais filtrais (1) ir (2).

8. Įrenginys pagal 2–6 punktą, **b e s i s k i r i a n t i s** tuo, kad minėta įrenginio regeneruojanti grandinė (10) yra tiesinė, kurioje yra išdėstyta:

- bent vienas stiprintuvas (3, 5);
- du filtrai (1) ir (2) tarp kurių išdėstyta bent viena minėta netiesinė medžiaga (4, 6), pasižyminti optiniu Kerro efektu.

9. Įrenginys pagal bet kurį iš punktų 2–8, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad šviesos impulso formavimo įrenginys yra surinktas iš skaidulinių komponentų ir optinių skaidulų.

10. Įrenginys pagal bet kurį iš 2–9 punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad pradinis šviesos impulso šaltinis (15) yra diodinio lazeris veikiantis stiprinimo perjungimo režimu.

11. Įrenginys pagal bet kurį iš 2–9 punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad pradinis šviesos impulsas yra paties įrenginio suformuotas šviesos impulsas, kuris perduodamas įrenginio išėjimo šaką (9) optiškai sujungiant su įrenginio pradinių impulsų įvedimo šaka (8).

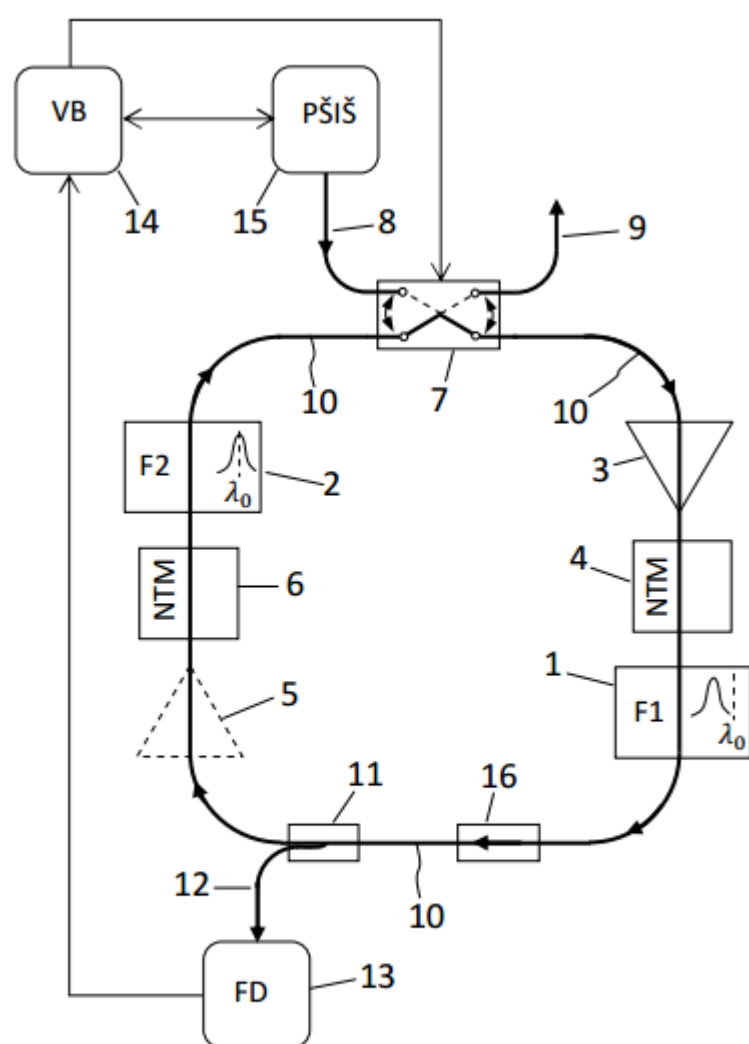


Fig. 1

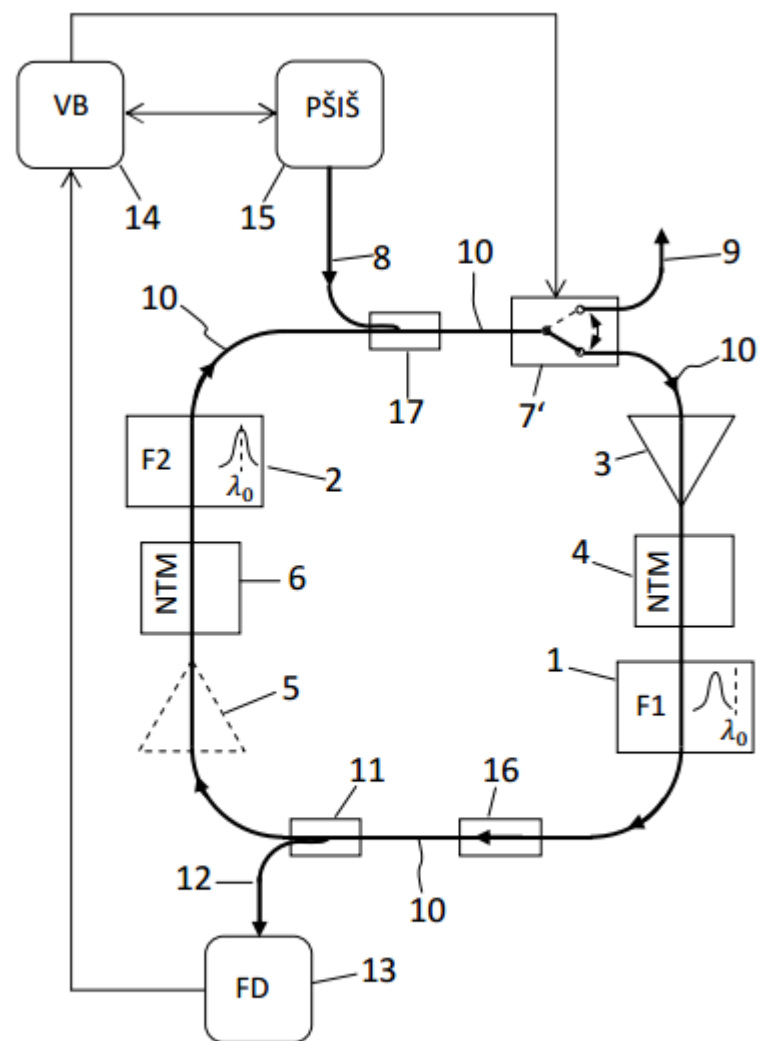


Fig. 2

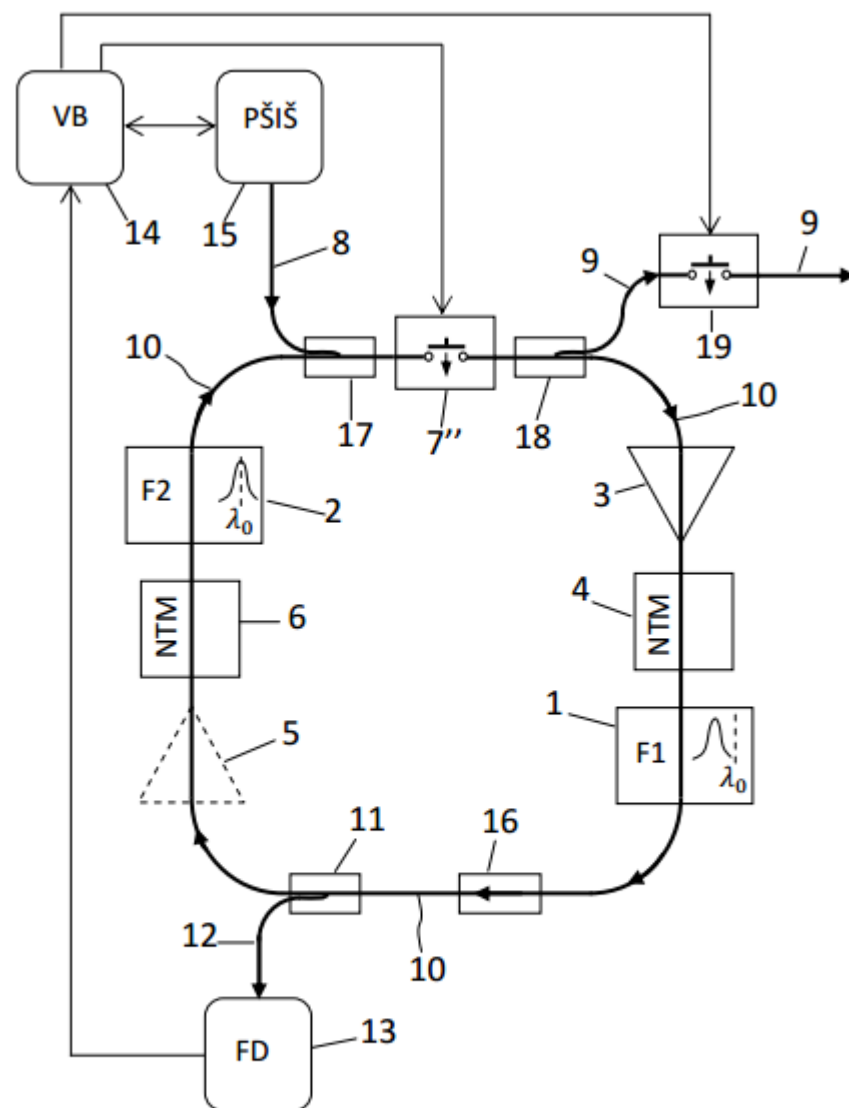


Fig. 3



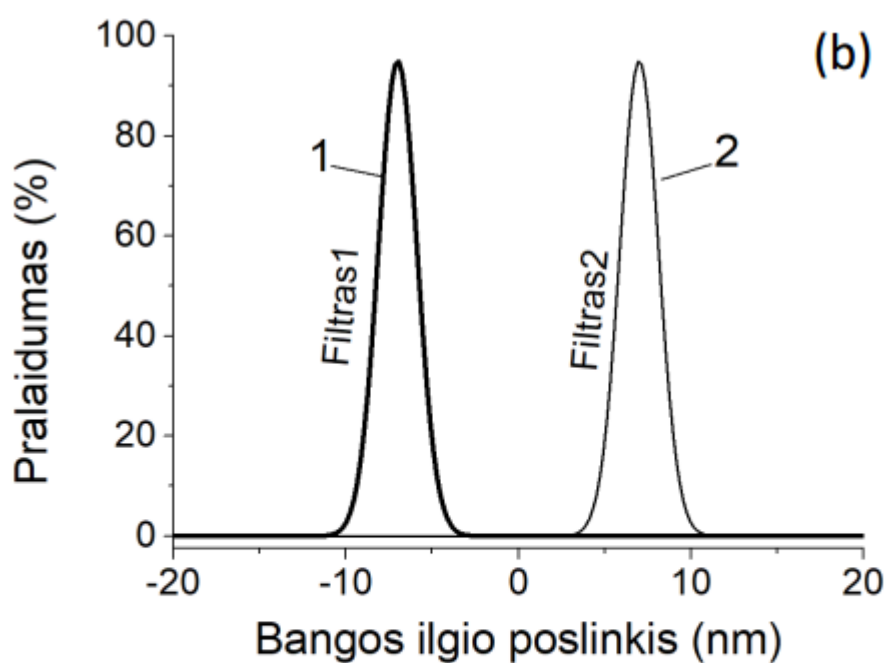
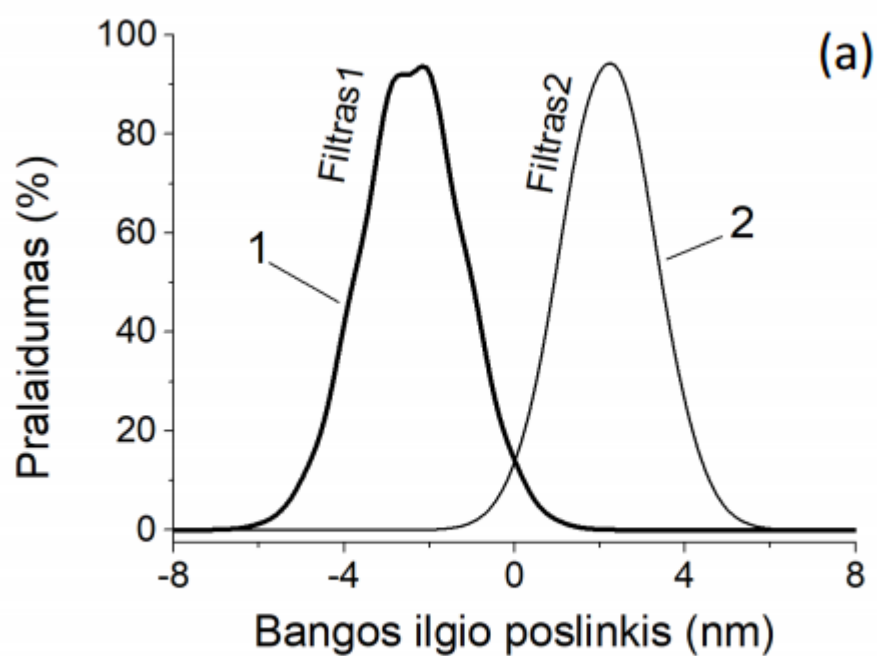


Fig. 6

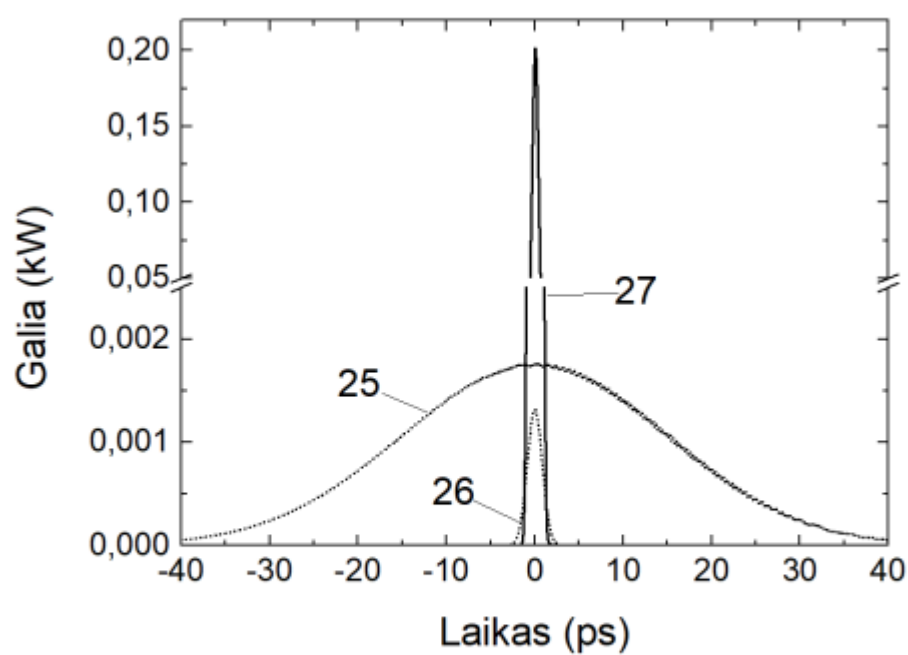


Fig. 7

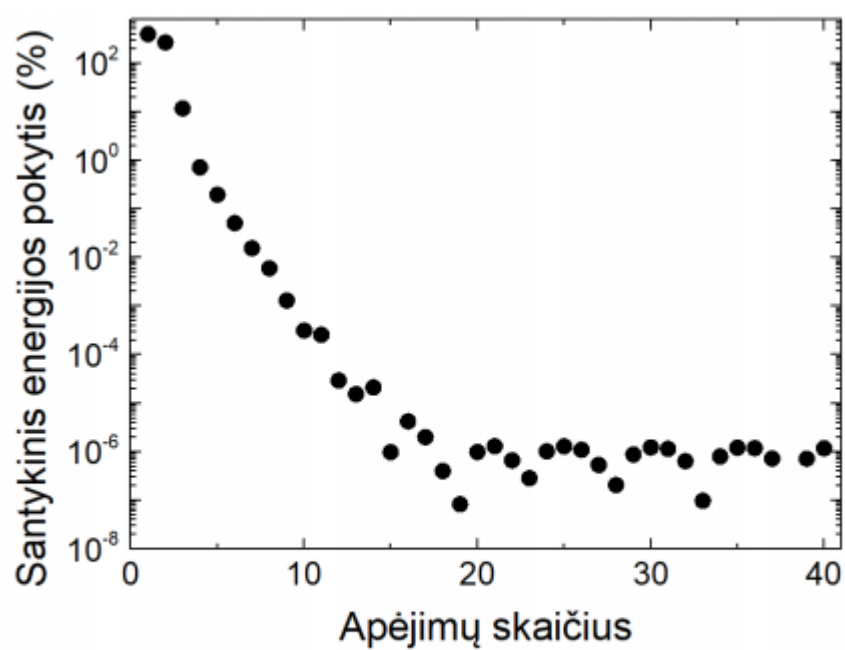


Fig. 8