

(10) **LT 6425 B**

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

(11) Patento numeris: **6425** (51) Int. Cl. (2017.01): **H01S 3/00**

(21) Paraiškos numeris: **2015 512**

(22) Paraiškos padavimo data: **2015-12-14**

(41) Paraiškos paskelbimo data: **2017-06-26**

(45) Patento paskelbimo data: **2017-07-10**

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

(86) Tarptautinės paraiškos numeris: —

(86) Tarptautinės paraiškos padavimo data: —

(85) Nacionalinio PCT lygio procedūros pradžios data: —

(30) Prioritetas: —

(72) Išradėjas:

**Andrejus MICHAILOVAS, LT**  
**Audrius ZAUKEVIČIUS, LT**

(73) Patento savininkas:

**UAB "EKSPLA", Savanorių pr. 237, LT-02300 Vilnius, LT**

(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:

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

(54) Pavadinimas:

**Ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būdas ir lazerinis šaltinis**

(57) Referatas:

Išradimas priklauso lazerių sričiai ir yra susijęs su ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būdais ir lazeriniais šaltiniais. Ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būdas apima šiuos etapus: a) pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto impulsų išplėtimą laike, b) antros harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto suformavimą, c) suformuoto minėto antros harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto impulsų suspaudimą, suformuojant galutinį ultratrumpųjų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštą. Siekiama sutrumpinti didelės energijos ultratrumpuosius šviesos impulsus etape (a) suformuotus impulsus sustiprina lazeriniame stiprintuve, o sustiprintus impulsus nukreipia į minėtą kvadratinio netiesiškumo terpę, skirtą etapui (b) vykdyti, kur stiprinimo koeficientą parenka tokį, kad, derinyje su šiame būde vykdomų etapų kitais optiniais parametrais, užtikrintų ne mažesnę kaip 50% antros harmonikos generacijos efektyvumą etape (b).

**LT 6425 B**

### Technikos sritis

Išradimas priklauso lazerių sričiai ir yra susijęs su ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būdais ir lazeriniais šaltiniais. Labiausiai išradimas yra susijęs su lazeriniais šaltiniais ultratrumpiesiems šviesos impulsams generuoti matomoje spektro srityje. Išradimas gali būti panaudotas faziškai moduluotų impulsų parametrinio šviesos stiprinimo sistemose, kuriomis galima gauti ypač aukšto intensyvumo šviesos impulsus reikalingus naujausiems moksliniams tyrimams, medicininiais bei pramoniniams taikymams.

Parametrinis šviesos stiprinimas yra būdas gauti derinamo bangos ilgio lazerinę spinduliuotę. Be to, parametrinio šviesos stiprinimo prietaisai turi keletą išskirtinių savybių, dėl kurių yra tinkami ultratrumpųjų šviesos impulsų stiprinimui. Ypač trumpų, trumpesnių nei 1 ps, impulsų efektyvus stiprinimas reikalauja faziškai moduluotų impulsų parametrinio šviesos stiprinimo (FMIPŠS) technologijos.

### Technikos lygis ir jo įvertinimas

Neodimio jonais (Nd) legiruotos aktyviosios medžiagos pasižymi ypač dideliu stiprinimo koeficientu, yra termiškai ir mechaniškai stabilios, dėl ko gali dirbti didelio impulsų pasikartojimo dažnio ir didelės išvadinės galios režime. Dėl šių savybių, didžiausios FMIPŠS sistemų išėjimo impulsų energijos yra pasiektos naudojant lempomis kaupinamus Nd:YAG stiprintuvus, žiūr. pavyzdžiui, *J.Adamonis et al.*, "High-energy Nd:YAG-amplification system for OPCPA pumping", *Quantum Electronics* 42, no. 7, p.567 (2012). Diodais kaupinamais kietakūniais stiprintuvais, pvz., Nd:YAG ar Nd:YVO<sub>4</sub>, yra pasiekiamos didesnės impulsų energijos ir vidutinės spinduliuotės galios (optimalus en. ir galios santykis), žiūr. pavyzdžiui, *K.Michailovas et al.*, "Kilohertz rate picosecond pulses amplifier for pumping of OPCPA system", in *Lasers, Sources, and Related Photonic Devices*, Paper AW4A3, OSA (2012). Didelis neodimio stiprintuvų stiprinimo koeficientas yra pasiekiamas iš dalies dėl to, kad Nd jonų fluorescencijos spektrinė juosta yra siaura, ypač Nd:YAG kristale. Tačiau siaura Nd:YAG stiprintuvų spektrinė juosta apriboja impulso trukmę iki ne mažiau kaip 15ps. Didelės galios Nd:YAG stiprintuvais, kurių stiprinimo koeficientas viršija  $10^6$ , pasiekiamos tipinės impulsų trukmės yra intervale nuo 20 iki 100 pikosekundžių. Šiek tiek platesne liuminescencijos juosta pasižymi Nd:YVO<sub>4</sub> aktyviosios medžiagos

stiprintuvais pasiekiamos trukmės yra nuo 5 iki 100 pikosekundžių.

Paprastai FMIPŠS sistemos kaupinimui yra naudojama ne minėtų stiprintuvų išėjimo spinduliuotė (vad. fundamentinio dažnio spinduliuotė arba pirma harmonika), o jų antra harmonika (dvigubo spektrinio dažnio spinduliuotė) žaliwoje spektrinėje srityje maždaug ties bangos ilgiais nuo 515nm iki 532nm. Antros harmonikos impulso trukmė yra panaši arba šiek tiek mažesnė (bet ne daugiau kaip 1,41 karto) už pirmos harmonikos impulso trukmę. Todėl tipinės didelės galios Nd:YAG stiprintuvų antros harmonikos impulsų trukmės yra intervale nuo 15 iki 100 pikosekundžių, o Nd:YVO<sub>4</sub> stiprintuvų – nuo 4 iki 100ps.

Palyginti ilga kaupinimo impulso trukmė yra gana svarbus apribojimas, siekiant panaudoti Nd:YAG stiprintuvą FMIPŠS sistemoje kaupinimo impulsui stiprinti. Kaupinimo ir užkrato impulsų trukmių santykis įtakoja parametrinės sąveikos efektyvumą, sustiprinto ultratrumpojo impulso spektrines charakteristikas bei kontrastą foninės spinduliuotės (parametrinės fluorescencijos) atžvilgiu. Efektyviam parametriniam stiprinimui pasiekti užkrato impulso trukmė neturi skirtis nuo kaupinimo impulso trukmės daugiau kaip 10 kartų. Optimali kaupinimo ir užkrato impulsų trukmių santykio vertė yra tarp 1 ir 2, priklausomai nuo minėtų impulsų erdvėlaikinių savybių ir jų energijų. Bendruoju atveju, galimybė pasiekti kuo mažesnę impulso trukmę yra svarbi ne tik Nd:YAG stiprintuvams, bet ir kitiems neodimiu paremiami stiprintuvams ar bet kurios kitos aktyviosios medžiagos, pavyzdžiui iterbio, stiprintuvams.

Kitas aspektas – kaupinimo impulso sinchronizavimas su užkrato impulsu. EP paraiškoje Nr.14177007.3/EP2827461 (UAB „EKSPLA), padavimo data 2014-07-15, ir EP paraiškoje Nr.15159873.7/EP2924500 (UAB „EKSPLA), padavimo data 2015-03-19, aprašytos FMIPŠS sistemos, panaudojančias vienintelį pirminį lazerinį šaltinį, tuo būdu realizuojant pasyvų užkrato ir kaupinimo impulsų sinchronizavimą. Minėtas pirminis lazerinis šaltinis apima iterbio jonais legiruotą skaidulinį osciliatorių ir kaupinimo bei užkrato atšakų lazerinių spinduliuočių formavimo elementus. Žinomuose techniniuose sprendimuose kaupinimo atšakos spinduliuotė, praėjusi minėtus formavimo elementus, yra gerai suderinta su Nd-stiprintuvų spektrinėmis savybėmis. Galimybė panaudoti Nd-stiprintuvą leidžia pasiekti didelę kaupinimo impulsų energiją. Tačiau antros harmonikos generacija, siekiant gauti lazerinę spinduliuotę matomoje spektrinėje srityje FMIPŠS sistemai kaupinti, yra atliekama

tradiciniu būdu: sustiprintas faziškai moduluotas impulsas yra pirmiausiai suspaudžiamas impulsų spaustuve, o paskui praleidžiamas per antros harmonikos kristalą. Dėl to kaupinimo impulsų trukmės ir nemažesnės kaip 10ps.

*Y.Wang et al.*, "Frequency-doubling pulse compressor for picosecond high-power neodymium laser pulses", *Optics Letters* 17, no. 20, p. 1459 (1992); *A.Umbrasas et al.*, "Generation of femtosecond pulses through second-harmonic compression of the output of a Nd:YAG laser", *Optics Letters* 20, no. 21, p. 2228 (1995) yra aprašytas ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būdas, apimantis dviejų statmenų poliarizacijų pirmos harmonikos lazerinės spinduliuotės pluoštų suformavimą, tam tikro numatyto vėlinimo tarp jų įvedimą bei antro (II) tipo antros harmonikos generaciją kvadratinio netiesiškumo terpėje. Dėl statmenų poliarizacijų pluoštų grupinių greičių nederinimo ir dėl minėto pluoštų užlaikymo vienas kito atžvilgiu, galima gauti kelis kartus mažesnę antros harmonikos impulsų trukmę už fundamentinio dažnio lazerinės spinduliuotės (pirmos harmonikos) impulsų trukmę. Žinomo būdo trūkumas yra tas, kad minėtas sąlygas yra sudėtinga techniškai realizuoti, be to, sugeneruoti ultratrumpieji impulsai yra lydimi kelis kartus ilgesnio foninės spinduliuotės impulso, kuriame yra nemaža dalis spinduliuotės energijos.

Straipsniuose *M.Aoyama et al.*, "Efficient noncollinear second-harmonic generation with proper frequency chirp and tilted pulse fronts of femtosecond laser pulses", *Jap. J. Appl. Physics* 39, no. Part 1, No. 5A, p. 2651 (2000) ir *O.Gobert et al.*, "Efficient broadband 400 nm noncollinear second-harmonic generation of chirped femtosecond laser pulses in BBO and LBO", *Applied Optics* 53, no. 12, p. 2646 (2014) aprašyti ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būdai, apimantys faziškai moduluotų ir pakreiptų erdvėje pirmos harmonikos impulsų suformavimą bei nekolinearią pirmo (I) tipo antros harmonikos generaciją kvadratinio netiesiškumo terpėje. Žinomuose būduose pastangos yra sutelkiamos į fundamentinio dažnio impulsų fazinį sumoduliovimą ir impulso amplitudinio fronto pakreipimą tam tikru kontroliuojamu būdu, kad būtų išvengta aukštesnės eilės netiesinių reiškinių bei pasiekta mažesnė antros harmonikos impulsų trukmė. Mažesnė antros harmonikos impulsų trukmė gaunama nenaudojant jokio kompresoriaus, tik tiksliai realizuojant iš anksto numatytus impulsų fazinio sumoduliovimo bei fronto pakreipimo parametrus, o taip pat pirmos harmonikos impulsų sukirtimo kampą netiesiniame kristale. Žinomuose sprendimuose minėtų sąlygų išpildymas yra nelengvas uždavinys, o

pirmos harmonikos energijos keitimo į antros harmonikos energiją koeficientas neviršija 70%.

Artimiausias pagal techninę esmę yra Rusijos Federacijos patentas Nr. RU2393601 (OOO „AVESTA-PROEKT“, prioriteto data: 2008-10-02), kuriame yra aprašytas ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būdas, pagal kurį yra atliekama antros harmonikos generacija iš faziškai moduluotų fundamentinio dažnio impulsų. Žinomas būdas apima šiuos etapus: 1) pradinės lazerinės spinduliuotės impulsų išplėtimą laike, suformuojant pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštą, apibūdinamą impulso trukme  $\Delta t_{\text{chirped}}$ ; 2) pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto praleidimą per kvadratinio netiesiškumo terpę, sugeneruojant antros harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštą; 3) sugeneruotos antros harmonikos lazerinės spinduliuotės pluošto faziškai moduluotų impulsų suspaudimą. Suspaustų antros harmonikos lazerinės spinduliuotės impulsų trukmė  $\Delta t_{2\omega}$  yra tiesiog proporcinga spektriškai ribotai pirmos harmonikos lazerinės spinduliuotės impulsų trukmei  $\Delta t_{\text{BL}}$  bei atvirkščiai proporcinga antros ir pirmos harmonikų lazerinių spinduliuočių spektro pločių ( $\Delta\omega_2$  ir  $\Delta\omega_1$ , atitinkamai) santykiui, kuris priklauso nuo minėtų trukmių  $\Delta t_{\text{BL}}$  ir  $\Delta t_{\text{chirped}}$ . Kai antros harmonikos generacija vyksta stiprių-laukų sąveikos režime, minėtas spektro pločių santykis (dažniniais vienetais) gali būti užrašytas šia formule:

$$\Delta\omega_2/\Delta\omega_1 = \sqrt{4 - 3(\Delta t_{\text{BL}}/\Delta t_{\text{chirped}})^2}.$$

RU2393601 techniniame sprendime aprašyta antros harmonikos generacija iš femtosekundinių impulsų. Minėtas spektro pločių sąryšis galioja (ir minėtas antros harmonikos impulsų trukmės sumažėjimas pasireiškia) tik stiprių-laukų sąveikos režime, o tai reiškia, kad pradinės lazerinės spinduliuotės impulsai turi būti itin didelės energijos, ką yra sunku pasiekti femtosekundiniais šaltiniais. Antra vertus, startuojant nuo vidutinės energijos pradinės lazerinės spinduliuotės impulsų, juos faziškai moduluojant (t.y. plečiant laike), momentiniai intensyvumai sumažėja, todėl neįmanoma pasiekti stiprių-laukų sąveikos režimo ir efektyvios antros harmonikos generacijos netiesinio kristalo ilgyje, kuriame dar nepasireiškia grupinių greičių dispersija. Žinomame sprendime konversijos į antros harmonikos lazerinę spinduliuotę efektyvumas neviršija 40%.

### Sprendžiama techninė problema

Išradimu siekiama sutrumpinti didelės energijos ultratrumpuosius šviesos impulsus.

Dar vienas šio išradimo tikslas – sukurti didelės galios lazerinį šaltinį efektyviam faziškai moduluotų impulsų parametrinio šviesos stiprinimo sistemos (FMIPŠS) kaupinimui. Vienas iš pagrindinių techninių uždavinių, kurį reikia išspręsti FMIPŠS sistemose – trumpo ir pasižyminčio didele energija kaupinimo impulso generavimas bei jo sinchronizavimas su užkrato atšakos impulsu.

### Išradimo esmės atskleidimas

Pagal pasiūlytą išradimą ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būde, apimančiame šiuos etapus: a) pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto impulsų išplėtimą laike, suformuojant pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštą, apibūdinamą centriniu nešančiuoju dažniu  $\omega_1$  ir impulso trukme  $\Delta t_{\omega, \text{chirped}}$ , b) antros harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto suformavimą antros harmonikos generacijos kvadratinio netiesiškumo terpės priemone, kur pluoštas, suformuotas etape b, yra apibūdinamas centriniu nešančiuoju dažniu  $\omega_2 = 2\omega_1$  ir impulso trukme  $\Delta t_{2\omega, \text{chirped}}$ , c) minėto antros harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto, suformuoto etape b, impulsų suspaudimą, suformuojant galutinį ultratrumpųjų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštą, kurio impulsų trukmė  $\Delta t_{2\omega}$  yra mažesnė už minėto pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto impulsų trukmę  $\Delta t_N$ , kur minėto galutinio lazerinės spinduliuotės pluošto ultratrumpųjų impulsų trukmė  $\Delta t_{2\omega}$  yra tiesiogiai proporcinga lazerinės spinduliuotės pluošto, krentančio į minėtą kvadratinio netiesiškumo terpę, spektriškai ribotai impulso trukmei  $\Delta t_{\omega, \text{BL}}$  bei atvirkščiai proporcinga antros harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto spektro pločio  $\Delta\omega_2$  ir lazerinės spinduliuotės pluošto, krentančio į kvadratinio netiesiškumo terpę, spektro pločio  $\Delta\omega_1$  santykiui, kuris priklauso nuo minėtų trukmių  $\Delta t_{\omega, \text{BL}}$  ir  $\Delta t_{\omega, \text{chirped}}$ ,

yra numatytas pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto, gauto etape a, sustiprinimas lazeriniame stiprintuve, suformuojant sustiprintą pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės

spinduliuotės pluoštą, apibūdinamą minėtu spektro pločiu  $\Delta\omega_1$ , kurį praleidžia per minėtą kvadratinio netiesiškumo terpę, skirtą antros harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštui generuoti etape b, o minėto lazerinio stiprintuvo stiprinimo koeficientą parenka tokį, kad, derinyje su šiame ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būde vykdomų etapų kitais optiniais parametrais, užtikrintų ne mažesnę kaip 50% antros harmonikos generacijos efektyvumą.

Kiti pranašumą turintys pagal išradimą pasiūlyto būdo galimi išpildymai nurodyti toliau. Minėtas pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto centrinis bangos ilgis yra intervale nuo 1020nm iki 1080nm. Minėto pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto spektro plotis  $\Delta\omega_{IN}$  atitinka kelių pikosekundžių spektriškai riboto impulso trukmę. Pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto impulsų trukmė  $\Delta t_{\omega, \text{chirped}}$  yra bent 10 kartų didesnė už šio pluošto spektriškai ribotą impulsų trukmę  $\Delta t_{\omega, BL1}$ . Minėto galutinio lazerinės spinduliuotės pluošto ultratrumpieji impulsai yra spektriškai riboti. Spektrinėje srityje ties dažniu  $\omega_1$  minėtos kvadratinio netiesiškumo terpės spektrinis sinchronizmo plotis antros harmonikos generacijai yra didesnis nei minėto sustiprinto pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto, krentančio į kvadratinio netiesiškumo terpę, spektro plotis  $\Delta\omega_1$ . Antros harmonikos generacijos efektyvumas minėtoje kvadratinio netiesiškumo terpėje viršija 70%.

Pagal išradimo konstrukcinį išpildymą pasiūlytame ultratrumpųjų šviesos impulsų lazeriniame šaltinyje, apimančiame impulsų plėstuvą, skirtą išplėsti laike pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto impulsus ir suformuoti pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštą, apibūdinamą centriniu nešančiuoju dažniu  $\omega_1$  ir impulso trukme  $\Delta t_{\omega, \text{chirped}}$ , kvadratinio netiesiškumo terpę antros harmonikos generacijai, skirtą suformuoti antros harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštą, apibūdinamą centriniu nešančiuoju dažniu  $\omega_2=2\omega_1$  ir impulso trukme  $\Delta t_{2\omega, \text{chirped}}$ , impulsų spaustuvą, skirtą suspausti laike minėto antros harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto impulsus ir suformuoti galutinį ultratrumpųjų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštą, kurio impulsų trukmė  $\Delta t_{2\omega}$  yra mažesnė už minėto pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto impulsų trukmę  $\Delta t_{IN}$  ir yra tiesiogiai proporcinga lazerinės spinduliuotės pluošto, krentančio į kvadratinio netiesiškumo terpę, spektriškai ribotai impulso trukmei  $\Delta t_{\omega, BL}$  bei atvirkščiai proporcinga antros

harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto spektro pločio  $\Delta\omega_2$  ir lazerinės spinduliuotės pluošto, krentančio į kvadratinio netiesiškumo terpę, spektro pločio  $\Delta\omega_1$  santykiui, kuris priklauso nuo minėtų trukmių  $\Delta t_{\omega, BL}$  ir  $\Delta t_{\omega, chirped}$ ,

yra numatytas lazerinis stiprintuvas, skirtas impulso plėstuvu suformuotam pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštui sustiprinti, o sustiprintas lazerinės spinduliuotės pluoštas, turintis minėtą spektro plotį  $\Delta\omega_1$ , yra nukreiptas į kvadratinio netiesiškumo terpę, kur paminėto lazerinio stiprintuvo stiprinimo koeficientas yra parinktas toks, kad, derinyje su šį ultratrumpųjų šviesos impulsų lazerinį šaltinį sudarančių komponentų kitais optiniais parametrais, užtikrintų ne mažesnę kaip 50% antros harmonikos generacijos efektyvumą.

Kiti pranašumą turintys pagal išradimą pasiūlyto lazerinio šaltinio galimi išpildymai nurodyti toliau. Minėto lazerinio stiprintuvo pagrindas yra sudarytas iš neodimio jonais legiruotos kietakūnės aktyviosios terpės. Minėta neodimio jonais legiruota kietakūnė aktyvioji terpė yra bet kuri iš Nd:YAG, Nd:YVO<sub>4</sub>, Nd:YLF, Nd:GdVO<sub>4</sub>, Nd:KGW. Minėto lazerinio stiprintuvo pagrindas yra sudarytas iš iterbio jonais legiruotos aktyviosios terpės. Minėtas lazerinis stiprintuvas yra regeneracinis stiprintuvas, kurio stiprinimo koeficientas yra nemažesnis kaip  $10^6$ . Minėta kvadratinio netiesiškumo terpė yra bet kuris iš šių antros harmonikos kristalų: BBO, LBO, LiNbO<sub>3</sub>, KTP, KDP, DKDP, ADP, PPLN, PPKTP, arba gali būti naudojama minėtų kristalų kombinacija.

Kitas pranašumą turintis šio išradimo konstrukcinis išpildymas yra faziškai moduluotų impulsų parametrinio šviesos stiprinimo sistema, kaupinimo atšakoje panaudojanti minėtą ultratrumpųjų šviesos impulsų lazerinį šaltinį.

#### Išradimo naudingumas

Pagal išradimą pasiūlytame būde ir lazeriniame šaltinyje yra pateikta nauja žinomų techninių sprendimų kombinacija, kuri turi ne tik abiejų sprendimų privalumus, bet duoda papildomą naują efektą. Pasiūlytame išradime yra panaudoti faziškai moduluotų impulsų stiprinimo būdas bei faziškai moduluotų impulsų antros harmonikos generacijos būdas. Faziškai moduluotų impulsų stiprinimas leidžia išvengti netiesinių impulso iškraipymų ar netgi stiprintuvo optinių elementų pažeidimo. Dėl to stiprintuve yra pasiekama didesnė impulso energija. Antros

harmonikos generacija iš faziškai moduluotų impulsų leidžia gauti platesnės spektrinės juostos dvigubo spektrinio dažnio lazerinę spinduliuotę. Be to, generuojant antrą harmoniką iš faziškai moduluotų impulsų yra sumažinama atgalinės konversijos tikimybė. Lyginant šio išradimo antros harmonikos spinduliuotės generavimo būdą su prototipo techniniu sprendimu, pagrindinis papildomas privalumas yra aukštesnis antros harmonikos generacijos efektyvumas, kuris yra pasiekiamas parenkant numatyto lazerinio stiprintuvo stiprinimo koeficientą tokį, kad, derinyje su pasiūlytame būde vykdomų etapų arba pasiūlyto šaltinio komponentų kitais parametrais, užtikrintų ne mažesnę kaip 50% antros harmonikos generacijos efektyvumą. Dėl didesnio momentinio intensyvumo sustiprintame pikosekundiniame impulse, lyginant jį su prototipo femtosekundiniu išplėstu ir nepastiprintu impulsu: galia yra perduodama į dvigubo spektrinio dažnio lazerinę spinduliuotę mažesniame netiesinio kristalo ilgyje, kuriame dar nepasireiškia grupinių greičių dispersija. Tai leidžia pasiekti didesnę antros harmonikos impulso sutrumpėjimą pirmos harmonikos impulso atžvilgiu, tuo pačiu užtikrinant konversijos efektyvumą nemažesnę kaip 50%.

Panaudojant pasiūlytą būdą kaupinimo impulsų lazerinio šaltinio konstrukcijoje, galima gauti nesudėtingą ir aukšto visuminio energinio efektyvumo faziškai moduluotų impulsų parametrinio šviesos stiprinimo sistemą, ne tik dėl minėto aukštesnio energinio efektyvumo kaupinimo impulso paruošimo etape, bet ir dėl aukštesnio parametrinės sąveikos efektyvumo, kai kaupinimo impulsas pasižymi mažesne trukme ir didesniu intensyvumu. Antra vertus, esant didesniam kaupinimo impulso intensyvumui, galima naudoti trumpesnį parametrinio stiprinimo kristalą (kas užtikrina platesnę parametrinio stiprinimo juostą), su kuriuo bus pasiektas tas pats efektyvumas. Mažesnė kaupinimo impulso trukmė taip pat leidžia lengviau pasiekti optimalų užkrato impulso bei kaupinimo impulso trukmių santykį: užkrato impulsas gali būti plečiamas mažiau, kas lemia lengvesnį sustiprinto signalinės bangos impulso suspaudimą. Galiausiai, dėl trumpesnio kaupinimo impulso pagerėja FMIPŠS sistemos ultratrumpojo išėjimo impulso kontrastas.

#### Išradimo realizavimo aprašymas

Toliau išradimas detaliau paaiškinamas brėžiniais, kuriuose:

Fig.1 – funkcinė blokinė diagrama, paaiškinanti šio išradimo būdo principą;

Fig.2 – faziškai moduluoto impulso elektrinio lauko osciliacijų bei nešančiojo

dažnio kitimo iliustracija;

Fig.3 – faziškai modulioto impulso intensyvumo profilio iliustracija;

Fig.4 – faziškai modulioto ir faziškai nemodulioto impulsų palyginimas;

Fig.5 – antros harmonikos generacija pagal šio išradimo būdą;

Fig.6 – diagrama, paaiškinanti nešančiojo dažnio kitimo spartos pokyčius sugeneruotame antros harmonikos spinduliuotės faziškai moduliuotame impulse;

Fig.7, Fig.8, Fig.9 – šio išradimo lazerinio šaltinio inkorporavimo į faziškai moduluotų impulsų parametrinio šviesos stiprinimo sistemą pavyzdžiai;

Fig.10 – antros ir pirmos harmonikos spinduliuočių spektro pločių santykio priklausomybė nuo pasirinktų sistemos parametrų.

Pagal išradimą pasiūlytas būdas yra iliustruojamas Fig.1 blokinėje diagramoje. Pradiniame etape lazerinės spinduliuotės pluoštas 1, kurio centrinis nešantysis dažnis yra  $\omega_1$  (pirmos harmonikos arba, kitaip sakant, fundamentinis dažnis), o spektro plotis  $\Delta\omega_{IN}$ , yra praleidžiamas per impulsų plėstuvą 2. Šio pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto 1 impulsai yra faziškai nemoduliuoti (pastovaus nešančiojo dažnio), arba gali būti silpnai moduliuoti (turintys nešančiojo dažnio moduliaciją). Impulsų plėstuvą 2 įvairioms spinduliuotės spektrinėms komponentėms suteikia skirtingą vėlinimą, dėl ko impulsas išplinta laike: pradžioje buvęs faziškai nemoduliuotu arba silpnai moduliotu impulsu, praėjęs plėstuvą 2, tampa vidutiniškai arba stipriai faziškai moduliotu impulsu. Impulsų plėstuvo 2 išėjime pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto 3 impulsų trukmė  $\Delta t_{\omega, \text{chirped}}$  yra didesnė už pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto 1 impulsų trukmę  $\Delta t_{IN}$  ir jos spektriškai ribotą impulso trukmę  $\Delta t_{\omega, BL1}$  (jei pluošto 1 impulsai yra faziškai nemoduliuoti,  $\Delta t_{IN} = \Delta t_{\omega, BL1}$ ).

Minėtas pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštas 3 toliau sklinda per lazerinį stiprintuvą 4, kuris apima vieną lazerinį stiprintuvą arba kelių stiprintuvų seką. Kadangi yra stiprinami faziškai moduluoti impulsai, stiprinimas yra itin efektyvus ir yra pasiekama didelė impulsų energija. Dėl daugialėkiams stiprintuvams būdingo spektrinės juostos siaurinimo sustiprinto lazerinės spinduliuotės pluošto 5 spektro plotis  $\Delta\omega_1$  gali skirtis nuo lazerinės spinduliuotės pluošto 3, krentančio į stiprintuvą 4, spektro pločio, todėl

lazerinės spinduliuotės pluošto 5 spektriškai ribotoji impulsų trukmė  $\Delta t_{\omega, BL}$  gali skirtis nuo pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto 1 spektriškai ribotą impulsų trukmę  $\Delta t_{\omega, BL1}$ .

Tolimesniame etape sustiprintas pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštas 5 yra nukreipiamas į kvadratinio netiesiškumo terpę 6, kur vyksta antros harmonikos generacija. Gali būti išpildytos tiek kolinearaus, tiek ir nekolinearaus fazinio sinchronizmo sąlygos. Antros harmonikos generacijai iš siaurajuostės spinduliuotės kolinearios sąveikos geometrija yra prioritetinga, nes yra paprastesnė. Minėta kvadratinio netiesiškumo terpė 6 gali būti bet kuris iš BBO, LBO, LiNbO<sub>3</sub>, KDP, KTP ir kt. netiesinių kristalų ar jų periodiškai polintas atitikmuo. Sugeneruoto antros harmonikos lazerinės spinduliuotės pluošto 7 impulsai taip pat yra faziškai moduluoti, o jų nešančiojo dažnio kitimo po gaubtinę greitį padidėja. Dažniausiai lazerinėje technologijoje naudojamų didelio stiprinimo koeficiento aktyviųjų terpių antros harmonikos spinduliuotės bangos ilgis patenka į matomosios šviesos spektro sritį. Nd:YAG ar Nd:YVO<sub>4</sub> stiprintuvų antros harmonikos spinduliuotės bangos ilgis lygus 532nm. Minėtame lazeriniame stiprintuve 4 panaudojus kitokias aktyvias terpes, galima gauti kitų bangos ilgių spinduliuotę matomoje spektro srityje, kuri yra ypač tinkama kaip kaupinimo spinduliuotė faziškai moduluotų impulsų parametrinio šviesos stiprinimo sistemoms, panaudojančiose BBO parametrinio šviesos stiprinimo kristalą.

Galiausiai antros harmonikos lazerinės spinduliuotės pluošto 7 faziškai moduluoti impulsai yra suspaudžiami impulsų spaustuve 8. Impulsų spaustuvas yra dispersinėmis savybėmis pasižymintis optinis elementas, dėl kurių lazerinės spinduliuotės spektrinių komponentų išsifazavimas gali būti sumažintas arba išvis panaikintas. Lazerinės spinduliuotės pluoštas 9 impulsų spaustuvo 8 išėjime yra sudarytas iš  $\Delta t_{2\omega}$  trukmės impulsų, kur  $\Delta t_{2\omega}$  yra mažesnė už spektriškai ribotą lazerinės spinduliuotės pluošto 5, krentančio į netiesinę terpę 6, impulsų trukmę  $\Delta t_{\omega, BL}$ . Be to, minėta suspaustų impulsų (lazerinės spinduliuotės pluošte 9) trukmė  $\Delta t_{2\omega}$  priklauso nuo pirmos harmonikos spinduliuotės impulsų išplėtimo laipsnio, t. y. nuo minėtų trukmių  $\Delta t_{\omega, chirped}$  ir  $\Delta t_{\omega, BL1}$  santykio. Net ir didelio stiprinimo, t. y. kai stiprinimo koeficientas yra nemažesnis kaip  $10^6$ , Nd:YAG stiprintuvų atveju suspausto antros harmonikos impulso trukmė gali būti mažesnė nei 10ps (tuo tarpu impulsų energija gali siekti kelis šimtus milidžaulių), panaudojant šio išradimo būdą.

Viename konkrečiame šio išradimo sprendimo išpildyme ultratrumpųjų šviesos impulsų lazerinis šaltinis panaudoja Nd:YAG terpe paremtą lazerinį stiprintuvą 4, kuris yra sudarytas iš regeneracinio Nd:YAG lazerinio stiprintuvo arba regeneracinio (Nd:YAG arba Nd:YVO<sub>4</sub>) stiprintuvo bei vienalėkio ar daugialėkio Nd:YAG galios stiprintuvo grandinės. Šioje realizacijoje išradimo tikslams pasiekti pradinė lazerinė spinduliuotė (pluoštas 1) gali būti ir siaurajuostė, pavyzdžiui, pasižyminti spektro pločiu  $\Delta\omega_{IN}$  mažesniu nei 1nm, kas atitinka kelių pikosekundžių impulso trukmę ties 1064nm bangos ilgiu.

Pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto 1 impulsų plėtimui gali būti panaudotas impulsų plėstuvus apibūdintas šiose publikacijose – *M.Y.Shverdin et al.*, “Chirped-pulse amplification with narrowband pulses”, *Opt. Lett.* 35, p. 2478 (2010); US8068522 (*Barty et al.*). Taip pat gali būti panaudota sprendimo variacija, kai pradinė lazerinė spinduliuotė jau turi tam tikrą fazinę moduliaciją. Taigi pirmo harmonikos impulsų fazinė moduliacija (išplėtimas laike), gali būti atliktas užkrato lazeryje, kaip buvo pristatyta mūsų ankstesnėje patentinėje paraiškoje EP2827461: lazerinis šaltinis turi savyje skaiduliniais komponentais paremtą užduodantįjį generatorių, generuojantį du optiškai sinchronizuotus ultratrumpuosius išėjimo impulsus, kur kaupinimo atšakai skirtas impulsas yra suderintas su neodimiu legiruotomis aktyviosiomis terpėmis ir jau yra faziškai moduluotas.

Fig.2 vaizduoja elektrinio lauko 10 osciliacijas faziškai moduluoto (čirpuoto) impulso atveju: dažnis yra nepastovus ir priklauso nuo laikinės padėties po elektrinio lauko stiprio gaubtinės 11. Šiuo atveju impulso nešantysis dažnis nuolat auga, kitimas (augimas) yra tiesinis, ir impulsas yra Gauso pavidalo. Nešančiojo dažnio deviacijos priklausomybė laike yra tiesė 12. Siauro laiko lango 13 centre nešantysis dažnis lygus  $\omega_{13}$ .

Fig.3 ir kreivė 14 paveiksle Fig.4 vaizduoja faziškai moduluoto impulso intensyvumo priklausomybę nuo laiko (vad. impulso profiliu arba impulso gaubtine). Nešantysis dažnis  $\omega_F$  impulso priekyje (laiko momentu  $t_F$ ) skiriasi nuo dažnio  $\omega_C$  ( $\omega_0$ ) ties impulso gaubtinės viduriu (laiko momentu  $t_C$ ) ir nuo dažnio  $\omega_T$  impulso gale (laiko momentu  $t_T$ ). Impulso, pavaizduoto Fig.2, atveju,  $\omega_F < \omega_C < \omega_T$ . Kaip jau minėta, nešančiojo dažnio kitimas laike yra sukuriamas, įvedus fazių poslinkius tarp lazerinės spinduliuotės spektrinių komponentų. Faziškai moduluoto impulso 14 trukmė visada yra didesnė už faziškai nmoduluoto impulso 15 trukmę (žiūr. Fig.4), kalbant apie to

paties spektro pločio spinduliuotę. Faziškai nemoduliuotas impulsas 15 yra vadinamas spektriškai ribotu impulsu, nes jo trukmė  $\Delta t_{BL}$  yra mažiausia įmanoma impulso trukmė, kurią leidžia jo spektro plotis  $\Delta\omega$ . Tuo tarpu faziškai moduluoto impulso 14 trukmė  $\Delta t_{chirped}$  visada yra didesnė už  $\Delta t_{BL}$ .

Norint pasiekti šio išradimo tikslus bei turėti ankščiau minėtus privalumus, fundamentinio dažnio (pirmos harmonikos) impulsus reikia plėsti stipriai. Pagal prioritetinę šio išradimo realizaciją, pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto 3 impulsų trukmė  $\Delta t_{\omega, chirped}$  turėtų bent 10 kartų viršyti jo (arba pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto 1) spektriškai ribotą impulsų trukmę  $\Delta t_{\omega, BL1}$ .

Pažymėtina, kad yra keli antros harmonikos generacijos režimai. Silpnos sąveikos arba silpnų-laukų sąveikos režime visuose antros harmonikos impulso gaubtinės taškuose intensyvumas yra proporcingas pirmos harmonikos impulso intensyvumui, todėl sugeneruoto antros harmonikos impulso trukmė yra mažesnė  $2^{1/2}$  karto (tuo atveju, jei grupinių greičių dispersija yra nežymi). Šiuo atveju galima gauti tik žemą energinį keitimo į antrą harmoniką koeficientą. Tuo tarpu stiprios sąveikos arba stiprių-laukų sąveikos režime didžioji dalis fundamentinės spinduliuotės energijos gali būti konvertuota į antrą harmoniką, o antros harmonikos impulso forma praktiškai atkartoja fundamentinio impulso formą. Šiuo atveju nėra impulso trukmės išlošimo (jei siekiama mažesnės trukmės). Kai fundamentinės bangos nuskurdinimo ir atgalinės konversijos įtaka yra žymi, antros harmonikos impulso trukmė ir forma gali skirtis nuo fundamentinio impulso.

Fig.5 vaizduoja antros harmonikos generaciją pagal šio išradimą būdą. Antros harmonikos lazerinės spinduliuotės pluoštas 7 yra sugeneruojamas iš pirmos harmonikos lazerinės spinduliuotės pluošto 5. Pluoštas 5, sudarytas iš faziškai moduluotų ir sustiprintų impulsų 16, yra gaunamas iš pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto 1 ankščiau aprašytu būdu (žiūr. Fig.1 aprašymą), kur optinės grandinės komponentas 17 apima impulsų spaustuvą (2, Fig.1) ir lazerinį stiprintuvą (4, Fig.1). Kadangi lazerinės spinduliuotės pluošto 5 impulsas 16 yra faziškai moduluotas, po jo gaubtine yra nešančiojo dažnio kitimas, t.y.  $\omega_{1F} \neq \omega_{10} \neq \omega_{1T}$ . Antros harmonikos generacijos netiesiniame kristale 6 metu, kiekviename impulso gaubtinės laiko momente yra sukuriama dvigubo spektrinio dažnio spinduliuotė. Sugeneruoto antros harmonikos lazerinės spinduliuotės pluošto 7 impulsas 18 taip pat yra faziškai

moduliuotas. Siekiant didelio konversijos efektyvumo, išpildomos sąlygos stiprių laukų sąveikai pasireikšti. Todėl faziškai moduluoto antros harmonikos impulso 18 trukmė  $\Delta t_{2\omega, \text{chirped}}$  yra artima faziškai moduluoto pirmos harmonikos impulso 16 trukmei  $\Delta t_{\omega, \text{chirped}}$ . Svarbiausias privalumas generuojant antrą harmoniką iš faziškai moduluotų impulsų – spektro praplatėjimas. Kuomet minėtas impulsų išplėtimo faktorius, santykis  $\Delta t_{\omega, \text{chirped}}/\Delta t_{\omega, \text{BL1}}$ , yra nemažesnis nei 10, antros harmonikos spinduliuotės (pluošto 7) spektro plotis  $\Delta\omega_2$  gali net iki 2 kartų viršyti pirmos harmonikos spinduliuotės (pluošto 5) spektro plotį  $\Delta\omega_1$ . Nešančiojo dažnio kitimo sparta taip pat pasikeičia. Impulso 18 dažnio deviacijos dydis (fazinės moduliacijos parametras impulso laikiniame atvaizdavime) yra didesnis už dažnio deviaciją impulse 16. Stiprių-laukų sąveikos režime minėtas dažnio deviacijos dydis impulse 18 padvigubėja. Impulsų spaustuviu 8 yra suformuojamas galutinis lazerinės spinduliuotės pluoštas (9), sudarytas iš ultratrumpųjų šviesos impulsų 19. Idealiu atveju, kuomet impulsų spaustuve 8 yra visiškai panaikinama fazių vėlinimas tarp spektrinių komponentių, impulsai 19 yra spektriškai riboti. Lazerinės spinduliuotės pluošto 9 impulsai 19 gali būti trumpesni už spektriškai ribotą pirmos harmonikos spinduliuotės pluošto 1 impulsų trukmę net 2 kartus. Taigi lyginant su antros harmonikos generacija iš faziškai nemoduluotų impulsų, šio išradimo antros harmonikos generacijos būde impulso trukmės sutrumpėjimo išlošimas yra nuo 1,41 (jei lyginsime su žemos konversijos atveju) iki 2 karto (jei lyginsime su aukštos konversijos atveju). Tam tikrais atvejais, impulsų 18 bei 19 forma ir trukmė gali skirtis nuo tų, kurie yra parodyti Fig.5. Tokie atvejai apima grupinių greičių dispersijos kristale 6 pasireiškimą, arba konfiguracijas, kai antros harmonikos konversijos efektyvumas yra nevienodas visoms spektrinėms komponentėms. Todėl, norint gauti kuo trumpesnius antros harmonikos spinduliuotės impulsus, reikalinga kruopščiai parinkti netiesinio kristalo ilgį bei kitas sąlygas.

Fig.6 pateiktas detalesnis paaiškinimas, kaip gaunami faziškai moduluoti antros harmonikos impulsai pagal šio išradimo būdą. Čia pirmos harmonikos impulsas 16 yra padalintas į daugybę atkarpų 20-29, kuriose elektromagnetinis laukas osciliuoja skirtingais dažniais nuo  $\omega_1(t_1)$  iki  $\omega_1(t_2)$ . Kiekviena iš minėtų atkarpų (ar pjūvių) 20-29, sudarančių impulsą 16, sugeneruoja savo antros harmonikos spinduliuotę netiesiniame kristale 6. Atitinkamais laiko momentais yra sugeneruojamas naujas elektromagnetinis laukas, kurio nešantysis dažnis kinta nuo

$\omega_2(t1)$  iki  $\omega_2(t2)$ , o atskiros atkarpos 30-39 sudaro antros harmonikos spinduliuotės impulsą 18. Impulsas 18 yra faziškai moduluotas, o momentinio nešančiojo dažnio kitimo greitis yra didesnis nei impulse 16. Stiprių-laukų sąveikos režime impulso 18 trukmė sutampa su impulso 16 trukme ( $\Delta t_{2\omega, \text{chirped}} = \Delta t_{\omega, \text{chirped}} = t4 - t3$ ), o momentinio nešančiojo dažnio kitimo greitis padvigubėja (dažnio skalės mastelis yra išlaikomas), nes galioja:

$$\omega_2(t2) - \omega_2(t1) = 2 \cdot [\omega_1(t2) - \omega_1(t1)] ,$$

$$\omega_2(t4) - \omega_2(t3) = 2 \cdot [\omega_1(t4) - \omega_1(t3)] .$$

Fig.7 – Fig.9 brėžiniuose yra pateikti pavyzdžiai, kaip šio išradimo lazerinis šaltinis gali būti panaudotas faziškai moduluotų impulsų parametrinio šviesos stiprinimo (FMIPŠS) sistemai kaupinti. Šio išradimo lazerinis šaltinis yra pavaizduotas kaip elementas 40, kuris iš pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto 1 sugeneruoja ultratrumpųjų šviesos impulsų kaupinimo spinduliuotės pluoštą 9, realizuotas Fig.1 iliustruotu principu. Elementas 41 yra pirminis lazerinis šaltinis, išspinduliuojantis pradinį lazerinės spinduliuotės pluoštą 1. Šaltinis 41 taip pat išspinduliuoja ir lazerinės spinduliuotės pluoštą 42, FMIPŠS sistemos užkrato kanalui. Sistemoje taip pat gali būti užkrato bei kaupinimo impulsų tolimesnio formavimo įrenginiai (elementai 43 ir 44), o po jų užkrato bei kaupinimo impulsai per kreipiančiąją optiką (elementai 45, 45a, 45b) yra nukreipiami į parametrinio stiprinimo kristalą 46 arba kristalus 46a, 46b. Dažniausiai yra reikalinga nekolinearaus fazinio sinchronizmo konfigūracija (kaip Fig.7, Fig.8), siekiant sustiprinti plačią užkrato spinduliuotės spektrinę juostą ir suformuoti ultratrumpąjį sustiprintos signalinės bangos 47 impulsą (elementas 48 vaizduoja kompresorių). Antra vertus, kolinearai konfigūracija (kaip Fig.9) suteikia galimybę gauti šalutinės bangos impulsą 49 be erdvinio čirpo. Fig.8 taip pat atstovauja kaupinimo konfigūraciją, pagal kurią dalis kaupinimo impulso yra panaudojama pirmoje parametrinio stiprinimo pakopoje, tuo tarpu, likusioji kaupinimo impulso dalis 50 (tuo atveju, jei kaupinimo impulsas vis dar yra kelis kartus ilgesnis už užkrato impulsą) yra panaudojama sekančioje parametrinio stiprinimo pakopoje; čia 51 – vėlinimo linija, 52 – optinis elementas likutiniam kaupinimui 50 nukreipti; 53 – kaupinimo spinduliuotės likutis, kuris toliau nėra naudojamas. Taip pat yra galimos kitokios FMIPŠS sistemos realizacijos, nepavaizduotos šiuose pavyzdžiuose.

Apibendrinant galima pasakyti, kad šio išradimo būdas ir lazerinis šaltinis, leidžia ne tik sugeneruoti itin mažos trukmės ultratrumpuosius šviesos impulsus, bet

ir leidžia pasiekti didelę impulsų energiją. Dėl lazerinio stiprintuvo 4 buvimo tarpe tarp impulsų plėstuvo 2 ir kvadratinio netiesiškumo terpės 6 (žiūr. Fig.1), faziškai moduluoti pirmos harmonikos (pluošto 3) impulsai yra pastiprinami, kad būtų suformuoti pastiprinti faziškai moduluoti impulsai (lazerinės spinduliuotės pluošte 5), kurių momentiniai intensyvumai užtikrina stiprių-laukų sąveikos režimą ir efektyvią pirmos harmonikos spinduliuotės konversiją į antrą harmoniką. Neodimio stiprintuvais, kurių stiprinimo koeficientas yra nemažesnis kaip  $10^6$ , galima pasiekti didelius momentinius intensyvumus faziškai moduluotame pastiprintame impulse, o taip pat paderinant fokusavimo sąlygas, galima užtikrinti stiprios konversijos atvejį – tokį, kad daugiau nei 70% pirmos harmonikos lazerinės spinduliuotės yra paverčiama antros harmonikos spinduliuote netiesinio antros harmonikos kristalo 6 ilgyje, kuriame dar nepasireiškia grupinių greičių dispersija. Šio išradimo būdas taip pat gali būti išpildytas ir lazeriniame šaltinyje, panaudojančiame mažesniu stiprinimo koeficientu, mažesniu nei  $10^6$ , pasižymintį lazerinį stiprintuvą 4: tuomet reikės aštriau fokusuoti lazerinės spinduliuotės pluoštą 5 netiesiniame kristale 6, kad antros harmonikos generacijos efektyvumas (pirmos harmonikos energijos keitimo į antrą harmoniką koeficientas) būtų nemažesnis nei 70%. Antra vertus, neoptimizavus fokusavimo sąlygų ir neužtikrinus stiprių-laukų sąveikos režimo, bus pasiektas mažesnis antros harmonikos generacijos efektyvumas, o suspaustų antros harmonikos impulsų (pluošte 9) trukmės sumažėjimas bus ne toks ryškus.

Fig.10 pavaizduota  $\Delta\omega_2/\Delta\omega_1$  santykio priklausomybė nuo pasirinktų sistemos parametrų, išreikštų per pasiekiamą antros harmonikos generacijos efektyvumą, Gauso funkcijos pavidalo impulsams. Čia  $\Delta\omega_2$  yra antros harmonikos faziškai moduluotų impulsų (pluošte 7) spektro plotis, o  $\Delta\omega_1$  – pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų (sustiprintame pluošte 5), krentančių į kvadratinio netiesiškumo terpę 6, spektro plotis. Trys skirtingos kreivės 54, 55 ir 56 atspindi minėtą spektro pločių santykio priklausomybę trims impulsų išplėtimo faktoriaus  $\Delta t_{\omega, \text{chirped}} / \Delta t_{\omega, \text{BL1}}$  vertėms: 5, 10 ir 20, atitinkamai. Kadangi mažiausia įmanoma galutinės lazerinės spinduliuotės pluošto 9 ultratrumpųjų impulsų 19 trukmė yra išreiškiamą taip:

$$\Delta t_{2\omega, \text{BL}} = \frac{\Delta t_{\omega, \text{BL}}}{\Delta\omega_2/\Delta\omega_1} ,$$

kur  $\Delta t_{\omega, \text{BL}}$  yra pirmos harmonikos pluošto 5, krentančio į kvadratinio

netiesiškumo terpę 6, spektriškai ribota impulso trukmė, tad minėta  $\Delta\omega_2/\Delta\omega_1$  santykio priklausomybė taip pat išreiškia ir ultratrumpųjų impulsų sutrumpinimo, kurį įmanoma pasiekti šio išradimo lazeriniame šaltinyje, priklausomybę nuo pasirinktų sistemos parametrų. Kitaip sakant, jei santykis  $\Delta\omega_2/\Delta\omega_1$  lygus 2, tai ultratrumpųjų šviesos impulsų, sugeneruotų šio išradimo lazeriniame šaltinyje pagal šio išradimo būdą, impulsų trukmė bus 2 kartus mažesnė už pirmos harmonikos impulsų trukmę lazerinio stiprintuvo (4, Fig.1) išėjime. Kaip matyti iš Fig.10, šis rezultatas yra pasiekiamas tik esant itin aukštam antros harmonikos generacijos efektyvumui ir impulsų išplėtimo faktoriui nemažesniam kaip 10. Priklausomai nuo pasirinktų sistemos parametrų – pradinės lazerinės spinduliuotės energijos, impulsų išplėtimo faktoriaus, stiprintuvo 4 stiprinimo koeficiento, spinduliuotės fokusavimo antros harmonikos kristale 6 sąlygų, kristalo ilgio – yra pasiekiamas skirtingas antros harmonikos generacijos efektyvumas ir mažesnę ar didesnę antros harmonikos spinduliuotės spektro pločio padidėjimą bei impulso trukmės sumažėjimą, lyginant su pirmos harmonikos spinduliuote. Silpnos konversijos srityje, kai minėtas efektyvumas yra žemesnis nei 50%, antros harmonikos ir pirmos harmonikos spektro pločių santykis  $\Delta\omega_2/\Delta\omega_1$  neviršija 1,6; tokio paties antros harmonikos impulso 19 sutrumpėjimo (pirmos harmonikos impulso atžvilgiu) ir galima tikėtis. Tuo tarpu aukštesnio nei 50% antros harmonikos generacijos efektyvumo atveju galima pasiekti  $\Delta\omega_2/\Delta\omega_1$  ir  $\Delta t_{\omega, BL}/\Delta t_{2\omega, BL}$  santykius intervale nuo ne mažiau kaip 1,5 iki 2. Fig.10 paveiksle pavaizduotos teorinės kreivės, kurios atspindi antros harmonikos generaciją, kuomet difrakcijos bei skersinio pluoštų nunešimo įtaka nėra reikšmingos. Tais atvejais, kai minėtų reiškinių įtakos negalima nepaisyti, kreivės gali nežymiai pakisti, tačiau bendra tendencija išlieka – kuo aukštesnis antros harmonikos generacijos efektyvumas yra užtikrinamas, tuo trumpesnių ultratrumpųjų impulsų šio išradimo lazeriniame šaltinyje galima tikėtis.

Taigi aukštas antros harmonikos generacijos efektyvumas yra ne tik pasiekiamas naudingas naudingas efektas, leidžiantis pasiekti didelę ultratrumpųjų lazerinių impulsų energiją, bet ir yra tinkamų sistemos parametrų pasirinkimo kriterijus.

Kitas aspektas – Fig.10 teorinės kreivės atspindi idealią antros harmonikos generaciją, kurioje atgalinės konversijos tikimybė lygi nuliui. Kadangi šio išradimo būde, antra harmonika yra generuojama iš faziškai moduluotų impulsų, kurių

spektrinės komponentės yra atskirtos laike, atgalinės konversijos tikimybė yra sumažinama iki minimumo, taigi eksperimentinės antros harmonikos generacijos efektyvumo vertės yra artimos teoriškai apskaičiuotoms.

Prioritetinėje šio išradimo realizacijoje, kuomet pirmos harmonikos impulsų išplėtimo faktorius  $\Delta t_{\omega, \text{chirped}} / \Delta t_{\omega, \text{BL1}}$  yra nemažesnis kaip 10 ir kai sistemos parametų visuma yra parinkta antros harmonikos generacijos efektyvumui, viršijančiam 70%, pasiekti, antros harmonikos impulsas 19 po idealiai suspausdimo impulsų spaustuve 8 (žiūr. Fig. 5 ir Fig.1) yra bent 1,7 karto trumpesnis už spektriškai ribotą pirmos harmonikos spinduliuotės impulsą. Parinkus sistemos parametrus, kurie užtikrina 90% antros harmonikos generacijos efektyvumą, idealiai suspausto antros harmonikos impulso 19 trukmė  $\Delta t_{2\omega, \text{BL}}$  yra nemažiau kaip 1,9 karto mažesnė už spektriškai ribotą pirmos harmonikos spinduliuotės impulso trukmę  $\Delta t_{\omega, \text{BL}}$ . Kitose šio išradimo realizacijose yra užtikrinamas bent 50% antros harmonikos generacijos efektyvumas (pasirinkus neoptimaliausius sistemos parametrus), kas vis tiek leidžia pasiekti šimto milidžaulių eilės ultratrumpuosius impulsus su trukme mažesne nei 10ps sąlyginai nesudėtingame, nedidelių matmenų ir vidutinės kainos konstrukciniame išpildyme.

## IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būdas, apimantis šiuos etapus:

a) pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto (1) impulsų išplėtimą laike, suformuojant pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštą (3), apibūdinamą centriniu nešančiuoju dažniu  $\omega_1$  ir impulso trukme  $\Delta t_{\omega, \text{chirped}}$ ,

b) antros harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto (7) suformavimą antros harmonikos generacijos kvadratinio netiesiškumo terpės (6) priemone, kur pluoštas (7) yra apibūdinamas centriniu nešančiuoju dažniu  $\omega_2=2\omega_1$  ir impulso trukme  $\Delta t_{2\omega, \text{chirped}}$ ,

c) minėto antros harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto (7) impulsų suspaudimą, suformuojant galutinį ultratrumpųjų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštą (9), kurio impulsų trukmė  $\Delta t_{2\omega}$  yra mažesnė už minėto pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto (1) impulsų trukmę  $\Delta t_{1\omega}$ ,

kur minėto galutinio lazerinės spinduliuotės pluošto (9) ultratrumpųjų impulsų trukmė  $\Delta t_{2\omega}$  yra

tiesiogiai proporcinga lazerinės spinduliuotės pluošto, krentančio į kvadratinio netiesiškumo terpę (6), spektriškai ribotai impulso trukmei  $\Delta t_{\omega, \text{BL}}$  bei

atvirkščiai proporcinga antros harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto (7) spektro pločio  $\Delta\omega_2$  ir lazerinės spinduliuotės pluošto, krentančio į kvadratinio netiesiškumo terpę (6), spektro pločio  $\Delta\omega_1$  santykiui, kuris priklauso nuo minėtų trukmių  $\Delta t_{\omega, \text{BL}}$  ir  $\Delta t_{\omega, \text{chirped}}$ ,

besiskiriantis tuo, kad

etape (a) suformuotą pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštą (3) sustiprina lazeriniame stiprintuve (4), suformuojant sustiprintą pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštą (5), apibūdinamą minėtu spektro pločiu  $\Delta\omega_1$ , kurį nukreipia į minėtą kvadratinio netiesiškumo terpę (6), skirtą etapui (b) vykdyti, kur

lazerinio stiprintuvo (4) stiprinimo koeficientą parenka tokį, kad, derinyje su šiame ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būde vykdomų etapų kitais optiniais parametrais, užtikrintų ne mažesnę kaip 50% antros harmonikos generacijos efektyvumą etape (b).

2. Ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būdas pagal 1 punktą,

besiskiriantis tuo, kad minėto pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto (1) centrinis bangos ilgis yra intervale nuo 1020nm iki 1080nm.

3. Ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būdas pagal bet kurį iš ankstesnių punktų,

besiskiriantis tuo, kad minėto pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto (1) spektro plotis  $\Delta\omega_{IN}$  atitinka kelių pikosekundžių spektriškai riboto impulso trukmę.

4. Ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būdas pagal bet kurį iš ankstesnių punktų,

besiskiriantis tuo, kad pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto (3) impulsų trukmė  $\Delta t_{\omega, \text{chirped}}$  yra bent 10 kartų didesnė už šio pluošto spektriškai ribotą impulso trukmę  $\Delta t_{\omega, \text{BL1}}$ .

5. Ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būdas pagal bet kurį iš ankstesnių punktų,

besiskiriantis tuo, kad minėto galutinio lazerinės spinduliuotės pluošto (9) ultratrumpieji impulsai yra spektriškai riboti.

6. Ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būdas pagal bet kurį iš ankstesnių punktų,

besiskiriantis tuo, kad spektrinėje srityje ties dažniu  $\omega_1$  minėtos kvadratinio netiesiškumo terpės (6) spektrinis sinchronizmo plotis antros harmonikos generacijai yra didesnis nei minėto sustiprinto pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto (5), krentančio į kvadratinio netiesiškumo terpę (6), spektro plotis  $\Delta\omega_1$ .

7. Ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būdas pagal bet kurį iš ankstesnių punktų,

besiskiriantis tuo, kad antros harmonikos generacijos efektyvumas minėtoje kvadratinio netiesiškumo terpėje (6) viršija 70%.

8. Ultratrumpųjų šviesos impulsų lazerinis šaltinis, apimantis:

- impulsų plėstuvą (2), skirtą išplėsti laike pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto (1) impulsus ir suformuoti pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų

lazerinės spinduliuotės pluoštą (3), apibūdinamą centriniu nešančiuoju dažniu  $\omega_1$  ir impulso trukme  $\Delta t_{\omega, \text{chirped}}$ ,

- kvadratinio netiesiškumo terpę (6) antros harmonikos generacijai, skirtą suformuoti antros harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštą (7), apibūdinamą centriniu nešančiuoju dažniu  $\omega_2=2\omega_1$  ir impulso trukme  $\Delta t_{2\omega, \text{chirped}}$ ,

- impulsų spaustuvą (8), skirtą suspausti laike minėto antros harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto (7) impulsus ir suformuoti galutinį ultratrumpųjų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštą (9), kurio impulsų trukmė  $\Delta t_{2\omega}$  yra mažesnė už minėto pradinio lazerinės spinduliuotės pluošto (1) impulsų trukmę  $\Delta t_N$  ir yra tiesiogiai proporcinga lazerinės spinduliuotės pluošto, krentančio į kvadratinio netiesiškumo terpę (6), spektriškai ribotai impulso trukmei  $\Delta t_{\omega, \text{BL}}$  bei atvirkščiai proporcinga antros harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluošto (7) spektro pločio  $\Delta\omega_2$  ir lazerinės spinduliuotės pluošto, krentančio į kvadratinio netiesiškumo terpę (6), spektro pločio  $\Delta\omega_1$  santykiui, kuris priklauso nuo minėtų trukmių  $\Delta t_{\omega, \text{BL}}$  ir  $\Delta t_{\omega, \text{chirped}}$ ,

besiskiriantis tuo, kad

numatytas lazerinis stiprintuvas (4), skirtas impulso plėstuvu (2) suformuotam pirmos harmonikos faziškai moduluotų impulsų lazerinės spinduliuotės pluoštui (3) sustiprinti, o sustiprintas lazerinės spinduliuotės pluoštas (5), turintis minėtą spektro plotį  $\Delta\omega_1$ , yra nukreiptas į kvadratinio netiesiškumo terpę (6), kur

lazerinio stiprintuvo (4) stiprinimo koeficientas yra parinktas toks, kad, derinyje su šį ultratrumpųjų šviesos impulsų lazerinį šaltinį sudarančių komponentų kitais optiniais parametrais, užtikrintų ne mažesnę kaip 50% antros harmonikos generacijos efektyvumą.

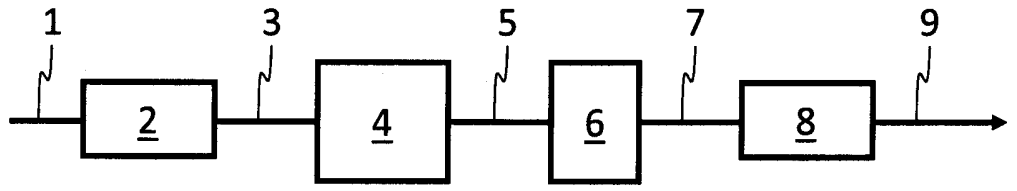
9. Lazerinis šaltinis pagal 8 punktą,

besiskiriantis tuo, kad minėto lazerinio stiprintuvo (4) pagrindą sudaro neodimio jonais legiruota kietakūnė aktyvioji terpė.

10. Lazerinis šaltinis pagal 9 punktą,

besiskiriantis tuo, kad minėta neodimio jonais legiruota kietakūnė aktyvioji terpė yra bet kuri iš Nd:YAG, Nd:YVO<sub>4</sub>, Nd:YLF, Nd:GdVO<sub>4</sub>, Nd:KGW.

11. Lazerinis šaltinis pagal 8 punktą,  
besiskiriantis tuo, kad minėto lazerinio stiprintuvo (4) pagrindą sudaro iterbio jonais legiruota aktyvioji terpė.
12. Lazerinis šaltinis pagal bet kurį iš 8-11 punktų,  
besiskiriantis tuo, kad minėtas lazerinis stiprintuvas (4) yra regeneracinis stiprintuvas, kurio stiprinimo koeficientas yra nemažesnis kaip  $10^6$ .
13. Lazerinis šaltinis pagal bet kurį iš 8-12 punktų,  
besiskiriantis tuo, kad minėta kvadratinio netiesiškumo terpė (6) yra bet kuris iš šių antros harmonikos kristalų: BBO, LBO, LiNbO<sub>3</sub>, KTP, KDP, DKDP, ADP, PPLN, PPKTP, arba gali būti naudojama minėtų kristalų kombinacija.
14. Faziškai moduluotų impulsų parametrinio šviesos stiprinimo sistema, kaupinimo atšakoje panaudojanti lazerinį šaltinį pagal bet kurį iš 8-13 punktų, realizuojantį ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būdą pagal bet kurį iš 1-7 punktų.



**Fig.1**

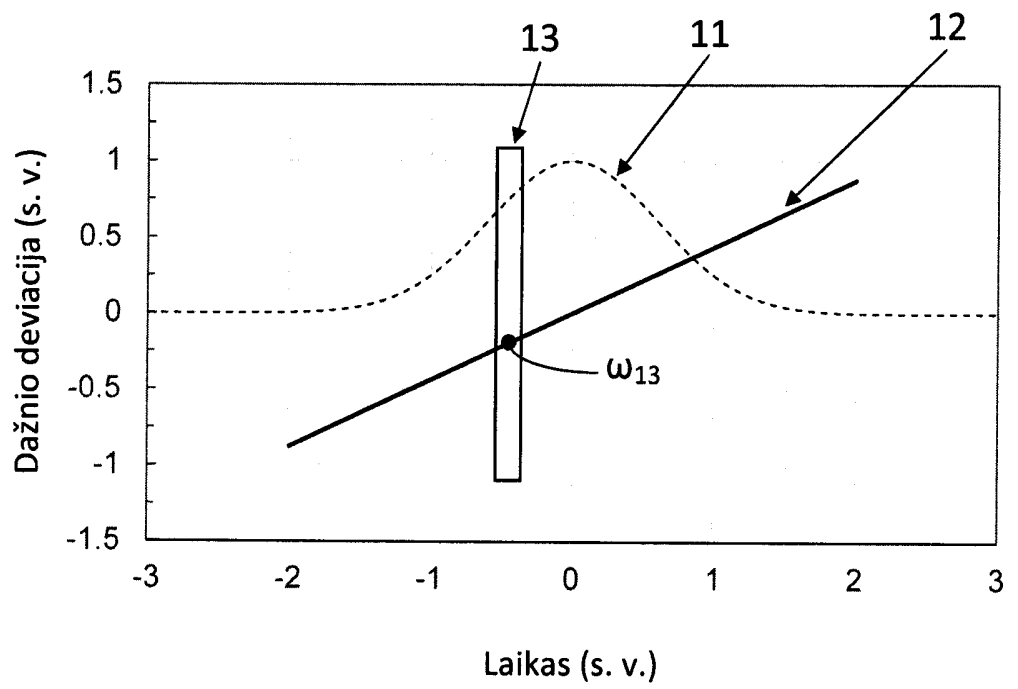
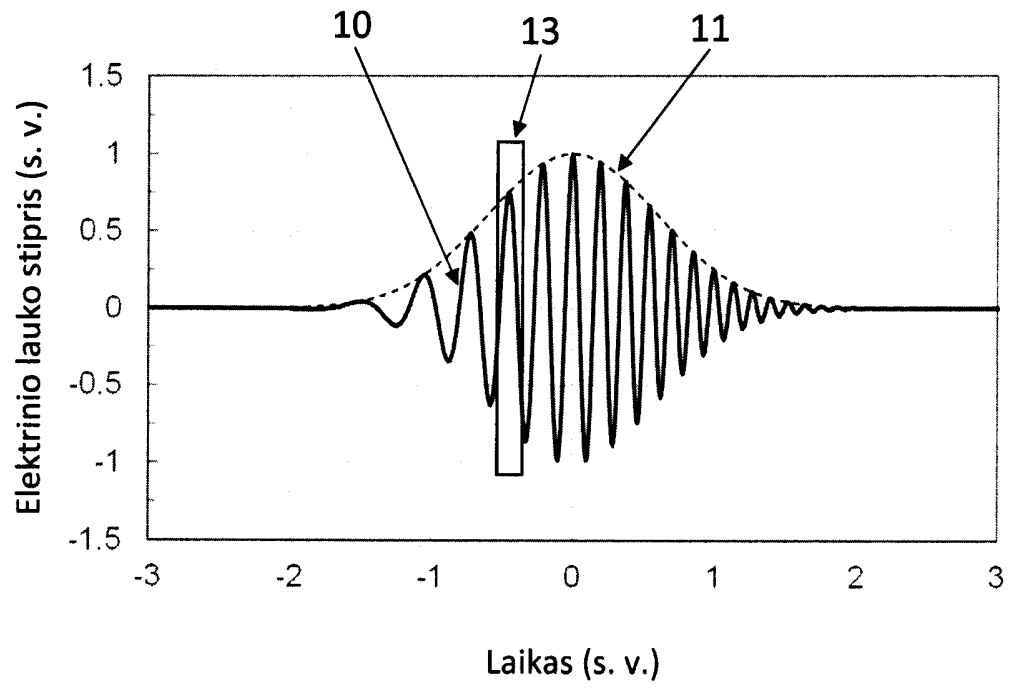


Fig.2

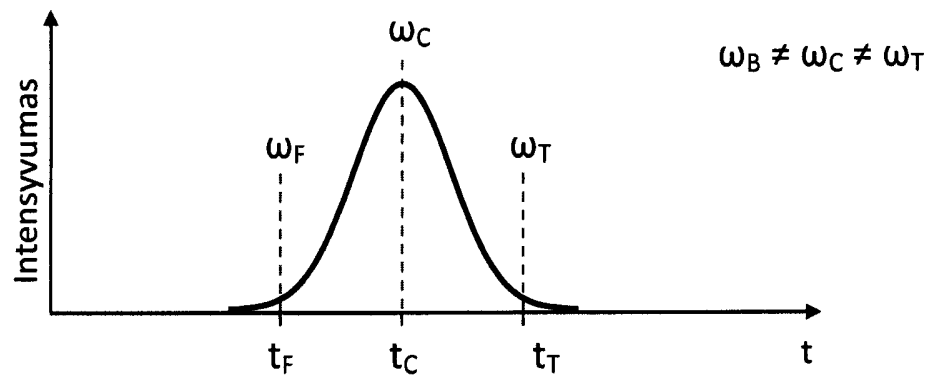


Fig.3

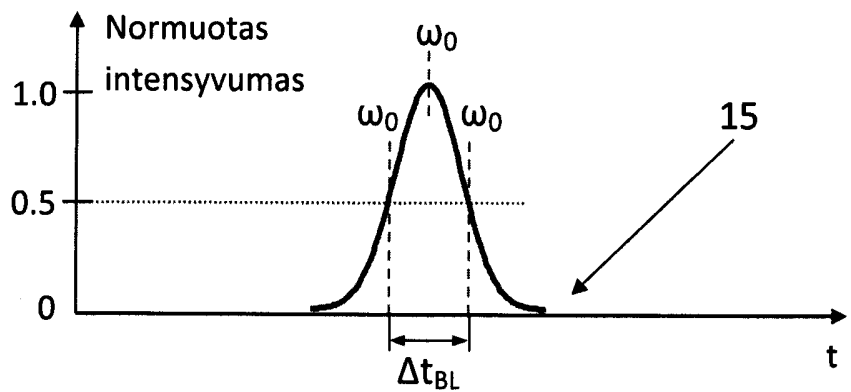
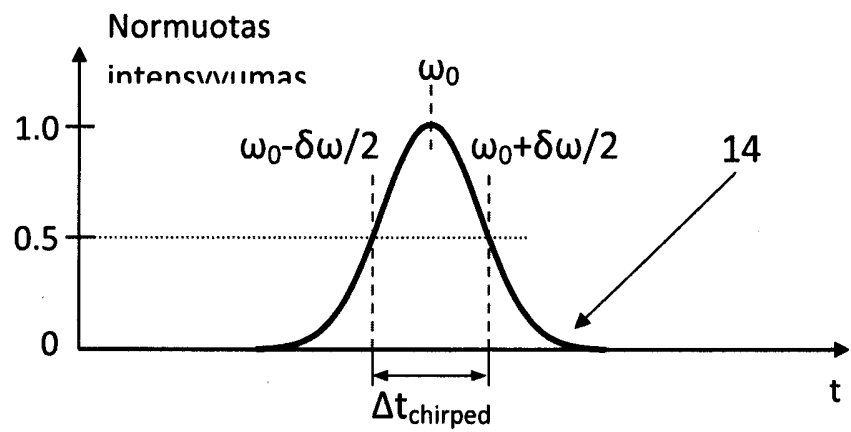


Fig.4

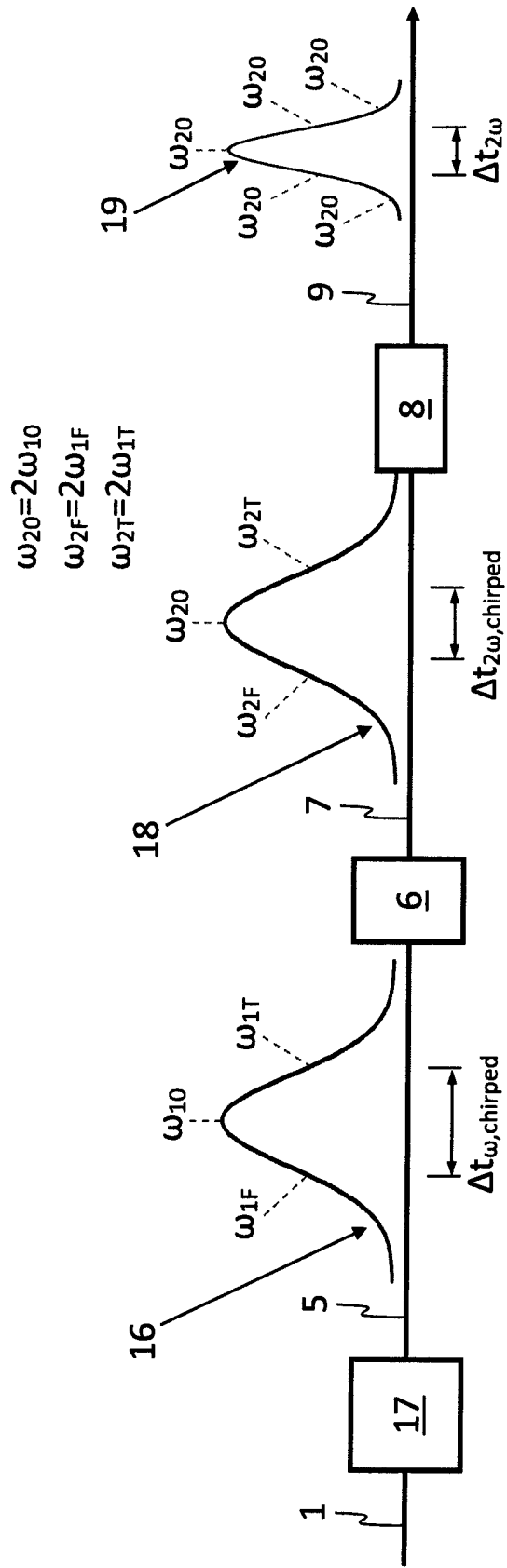
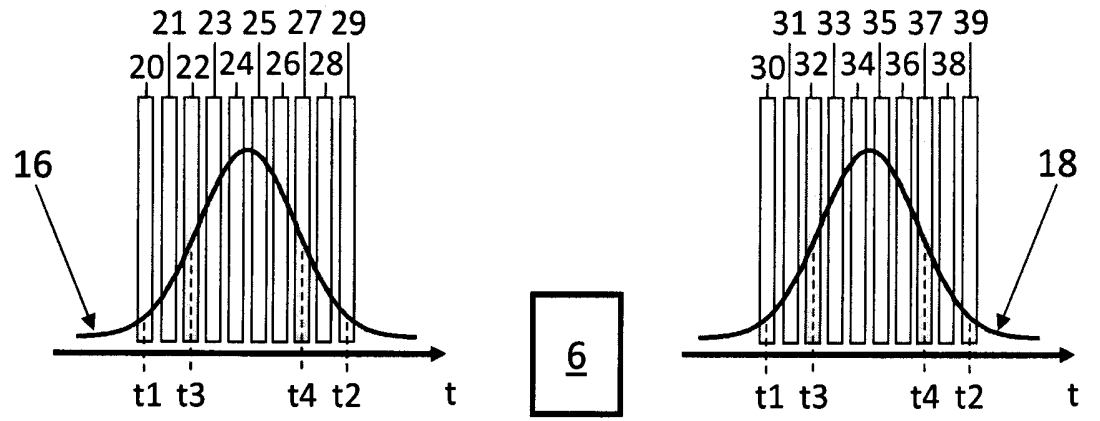


Fig.5



$$\omega_2(t1) = 2\omega_1'$$

$$\omega_2(t2) = 2\omega_1'$$

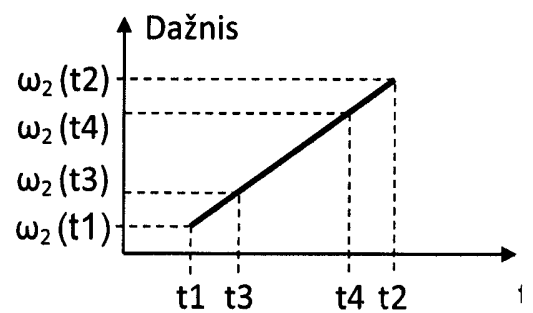
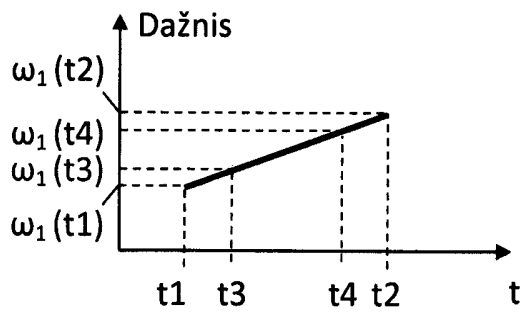


Fig.6

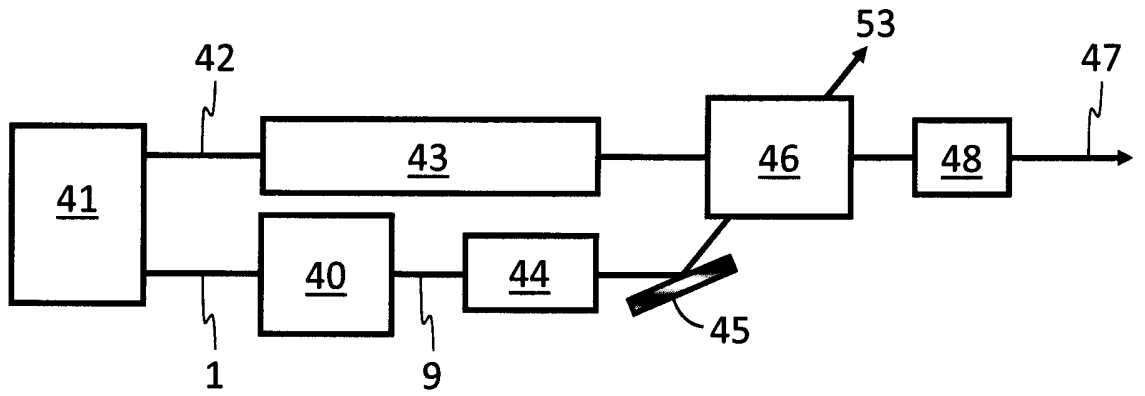


Fig.7

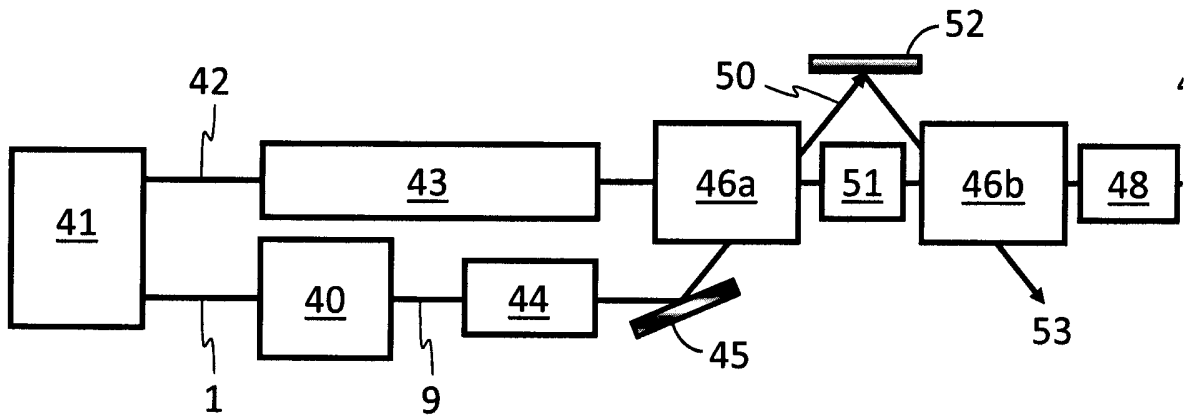


Fig.8

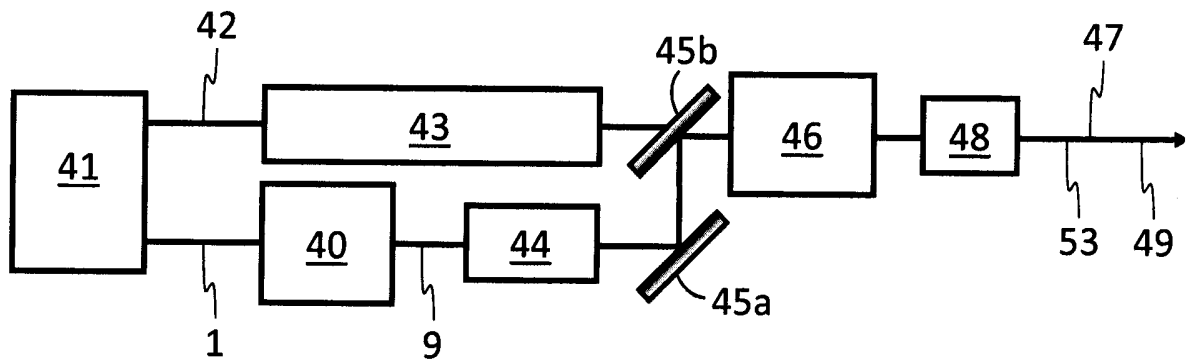


Fig.9

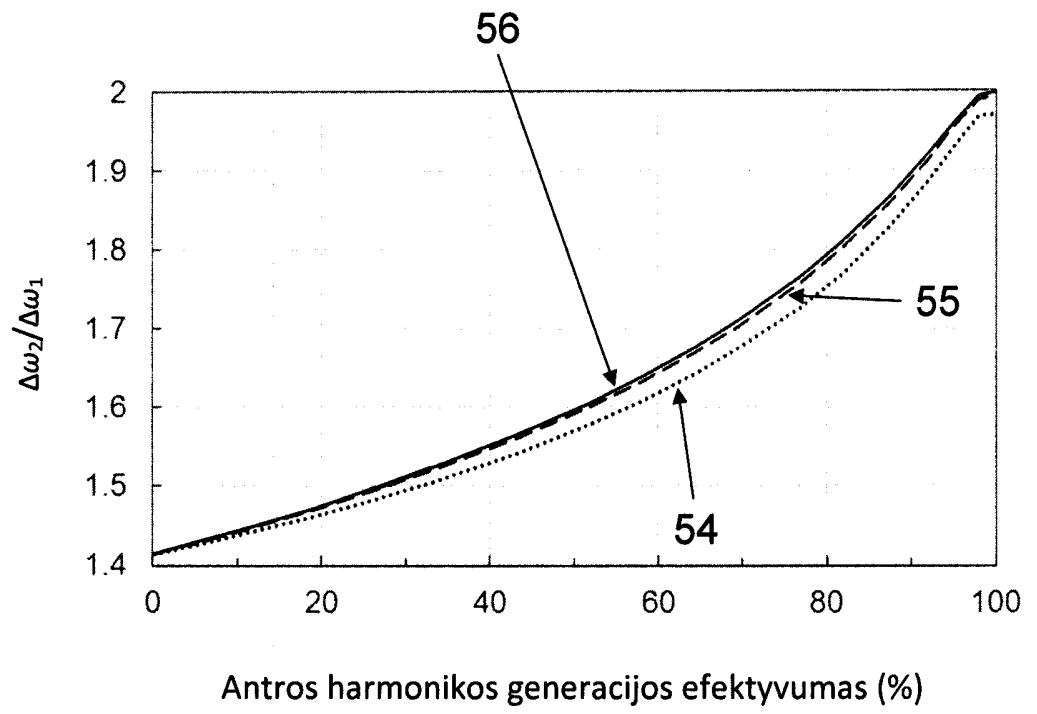


Fig.10