

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

(21) Paraiškos numeris: **2023 520**
(22) Paraiškos padavimo data: **2023-05-19**
(41) Paraiškos paskelbimo data: **2024-11-25**
(45) Patento paskelbimo data: **2024-12-27**

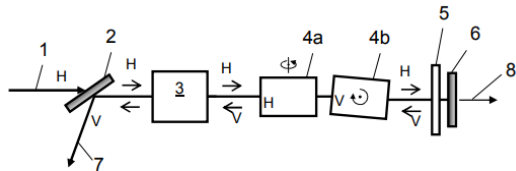
(73) Patento savininkas:
Uždaroji akcinė bendrovė „EKSPLA“,
Savanorių pr. 237, LT-02300 Vilnius, LT
(72) Išradėjas:
Kirilas MICHAİLOVAS, LT
Andrejus MICHAİLOVAS, LT
(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:
Virgina Adolfina DRAUGELIENĖ, 8, UAB TARPINĖ,
A.P.Kavoliuko g. 24-152, LT-04328 Vilnius, LT

LT 7115 B

(54) Pavadinimas:
Didelio intensyvumo efektyvi lazerinė sistema, pasižyminti aukšta erdvine ir laikine spinduliuotės kokybe

(57) Referatas:

Išradimas yra susijęs su efektyviomis didelės energijos ultratrumpųjų impulsų lazerinėmis sistemomis, kuriose yra užtikrinama aukšta erdvinė ir laikinė spinduliuotės kokybė. Šio išradimo lazerinė sistema apima kvantinį lazerinės spinduliuotės stiprintuvą, turintį savyje bent vieną stiprinimo elementą ir bent vieną netiesinės fazės kompensavimo elementą. Netiesinės fazės kompensavimui panaudojami kvadratinio netiesiškumo elementai, kuriuose vyksta kaskadiniai netiesiniai reiškiniai. Neigiama netiesinė fazė, reikalinga kompensacijai, yra gaunama generuojant antrą harmoniką I-tipo AHG kristale išderinto fazinio sinchronizmo sąlygomis arba II-tipo AHG kristale neišderinto arba išderinto fazinio sinchronizmo sąlygomis. Gali būti panaudojami keli AHG kristalai ir (arba) I-tipo bei II-tipo AHG kristalų kombinacija. Netiesinės fazės absoliutinis dydis, kuris yra šio išradimo lazerinėje sistemoje yra intervale nuo π iki 6π radianų, o išėjimo spinduliuotės likutinis netiesinės fazės dydis neviršija π radianų. Prioritetiniame išpildyme išėjimo spinduliuotės impulsų energija yra ne mažesnė kaip 200 mJ, o impulsų trukmė yra intervale nuo 5 ps iki 100 ps, o bendras stiprinimo elementų užpildos apgrąžos panaudojimo efektyvumas yra ne mažesnis kaip 30 %.



1 pav.

TECHNIKOS SRITIS

Išradimas yra susijęs su ultratrumpųjų impulsų lazeriniais šaltiniais, ypač su efektyviomis didelės energijos ultratrumpųjų impulsų lazerinėmis sistemomis, kuriose yra užtikrinama aukšta erdvinė ir laikinė spinduliuotės kokybė. Labiausiai išradimas yra susijęs su netiesinės fazės, atsirandančios dėl didelių intensyvumų sistemos optiniuose elementuose, kompensacija kaskadinio kvadratinio netiesiškumo pagalba.

TECHNIKOS LYGIS

Stiprinant ultratrumpųjų impulsų lazerinę spinduliuotę, pasiekiamas toks intensyvumas, ties kuriuo lazerinės sistemos optiniuose elementuose ir netgi ore pradeda reikštis netiesinės optikos reiškiniai. Netiesiniai reiškiniai yra gerai, kai reikalinga bangos ilgio konversija. Tačiau intensyvi spinduliuotė taip pat keičia medžiagos, kuria sklinda, savybes, o pakitusios medžiagos savybės daro poveikį spinduliuotei, kuris kartais yra nepageidaujamas. Nuo intensyvumo priklausantis, netiesinis, medžiagos lūžio rodiklio pasikeitimas yra vadinamas Kero efektu arba Kero netiesiškumu. Lūžio rodiklio pokytis lemia fazės pokytį. Lazerinės spinduliuotės pluoštui, turinčiam tam tikrą skersinį intensyvumo pasiskirstymą, Kero efektas pasireiškia pluošto fokusavimusi arba defokusacija ir bendru erdvinių savybių pablogėjimu. Ultratrumpųjų impulsų lazerinei spinduliuotei, kuri turi ir laikinį intensyvumo profilį, Kero efektas pasireiškia fazine savimoduliacija laike – nešančiojo dažnio kitimu po impulso gaubtine (čirpo atsiradimu), impulso ilgėjimu ir smailinio intensyvumo sumažėjimu. Vengiant pažeisti aktyviąją terpę, dažniausiai nėra pasiekama stiprinimo sotis, ir aktyviosios terpės užpildos apgrąža panaudojama neefektyviai.

Netiesinis lūžio rodiklio pokytis yra aprašomas formule $\Delta n(x, y, z, t) = n_2 \cdot I(x, y, z, t)$, o netiesinis fazės pokytis – $\Delta \Phi(x, y, t) = \frac{2\pi}{\lambda} \int n_2 \cdot I(x, y, z, t) dz$, kur n_2 vadinamas netiesiniu lūžio rodikliu, o $I(x, y, z, t)$ yra erdvinis ir laikinis intensyvumo skirstinys. Pluoštui, kurio didžiausio intensyvumo zona yra ašyje, sukauptosios netiesinės fazės dydis pluošto ašyje yra vadinamas *B-integralu* ir yra apskaičiuojamas pagal formulę: $B = \frac{2\pi}{\lambda} \int n_2 \cdot I(z) dz$, kur $I(z)$ – intensyvumas pluošto ašyje.

Teigiamas n_2 lemia pluošto fokusavimąsi, neigiamas – defokusaciją,

skleidimąsi. Lazeriuose naudojamų kietakūnių aktyviųjų terpių, pvz., Nd:YAG, n_2 yra teigiamas, todėl, stiprinant ultratrumpųjų impulsų lazerinę spinduliuotę, intensyvumo vertė, ties kuria susifokusavęs pluoštas pažeistų pačią aktyviąją terpę arba kitus optinius elementus pasiekiami gana anksti, dar iki pasiekiant stiprinimo sotį. Dėl šios priežasties stiprinti galima tik iki tam tikro intensyvumo. Siekiant didelių impulsų energijų ir tuo pačiu kuo efektyviau išnaudoti aktyviojoje terpėje sukauptą užpildos apgrąžą, yra formuojamas plokščios viršūnės pluoštas tam, kad kritinis intensyvumas būtų pasiektas per visą pluošto diametrą vienu metu. Papildomai, prieš stiprinimą impulsai yra išplečiami laike. Kitu atveju tenka naudoti didelio diametro aktyviuosius elementus, taip aukojant efektyvumą ir didinant sistemos kainą. Stiprinant ultratrumpuosius impulsus, kurių trukmė yra mažesnė kaip 1 ps, iki šimtų milidžaulių ir didesnės energijos, beveik visada yra pasitelkiamas čirpuotų – ištemptų laike – impulsų stiprinimo būdas.

B-integralo vertė yra netiesiškumo įvertinimo matas. Ribinė *B-integralo* vertė, ties kuria pasireiškia gausinio erdvinio profilio pluošto fokusavimasis, laikoma lygia 3 arba π radianams. Projektuojant lazerinius stiprintuvus, ši vertė yra naudojama kaip ribinė. Esant didesnei vertei, ilgalaikis sistemos eksploatavimas yra nesaugus elementų pažeidimo prasme. Specialiais atvejais galima saugiai eksploatuoti sistemą ir esant didesnėms *B-integralo* vertėms, jei fokusavimąsi kompensuoja difrakcija. Daugiausiai netiesinės fazės impulsas prikaupia aktyviojoje terpėje, nes čia vyksta spinduliuotės stiprinimas. Jei 3 rad *B-integralo* vertė pasiekiami atstume, mažesniame nei Reilėjaus ilgis (angl. *Rayleigh length*), tai pluošto difrakcijos nepakanka, kad stabilizuotų pluošto skersmenį. Pluoštas fokusuojasi į mažo skersmens giją ir galiausiai pažeidžia aktyviąją terpę. Susifokusavimas yra kritinis reiškinys, dėl kurio prastėja erdvinės impulso savybės ir gali įvykti pažaida, bet impulso spektrinės/laikinės savybės nuo netiesinės sąveikos irgi pakinta. Impulso ilgėjimas ir laikinio profilio blogėjimas pastebimas jau ties mažesnėmis *B-integralo* vertėmis – 1 rad eilės.

Taip pat yra medžiagų, kurių n_2 tam tikromis sąlygomis yra neigiamas. Jos galėtų būti panaudotos aktyviosios terpės sąlygotos netiesinės fazės kompensavimui, jei jose sukaupia neigiama netiesinė fazė būtų palyginamo dydžio su aktyviojoje terpėje sukaupia teigiama netiesine faze. Parinkus tinkamą kompensatoriaus ilgį, neigiamos netiesinės fazės dydis gali kompensuoti bendrą visoje optinėje sistemoje sukauptą teigiamos netiesinės fazės dydį. Neigiamu netiesiniu lūžio rodikliu pasižymi

polimerai ir kitos organinės medžiagos, kai kurie skysčiai, grafeno oksido nanodalelės, $\text{Ag:Al}_2\text{O}_3$ ir puslaidininkinės medžiagos.

JAV patente nr. 6141362 (*D.D. Meyerhofer ir O.A. Konoplev*, prioriteto data: 1998-06-05) aprašyta čirpuotų lazerinių impulsų stiprinimo sistema, sudaryta iš trumpų užkrato impulsų šaltinio, impulsų plėstuvo, stiprintuvo aktyviosios terpės, impulsų spaustuvo, kurioje papildomai yra puslaidininkinis *B-integralo* kompensatorius. Minėtas *B-integralo* kompensatorius yra plonasluoksnė GaAs arba GaAlAs struktūra, pasižyminti neigiamu netiesiniu lūžio rodikliu n_2 . Vienuose išpildymuose puslaidininkinis *B-integralo* kompensatorius yra patalpinamas sistemos pradžioje nesustiprinto impulso kelyje, ir dirba kaip prieškompensatorius. Kituose išpildymuose kompensatorius yra patalpinamas sistemos pabaigoje sustiprinto impulso kelyje, ir dirba kaip post-kompensatorius. Kurioje vietoje talpinti kompensatorių, priklauso nuo kelių parametrų. Jeigu dirbama tokiomis sąlygomis, kad yra pavojus pažeisti aktyviąją terpę, kompensatorių reikia naudoti prieš stiprinimą. Tačiau pradinis užkrato impulsas yra mažos energijos ir sukaupti reikiamą neigiamą netiesinę fazę yra sunkiau. Kai kompensatorius yra po stiprinimo elemento (ir net po impulsų spaustuvo), didesnis impulso intensyvumas leidžia lengviau sukaupti reikiamą netiesinės fazės dydį. Puslaidininkiuose neigiamas n_2 turi dvi dedamąsias: greitąją dedamąją dėl surišųjų elektronų ir lėtąją dedamąją dėl sužadintų laisvųjų krūvininkų. Puslaidininkiai turi neigiamą n_2 , kai jų draustinio energijos tarpo plotis E_g yra šiame intervale $h\nu < E_g < 1,42 h\nu$. Pavyzdžiui, 1053 nm bangos ilgiui lengviausia pritaikyti GaAs kompensatorių, 850 nm – AlGaAs, 800 nm – CdSe. Puslaidininkinė struktūra turi būti plona (pateiktuose pavyzdžiuose – 400 μm ir 2 mm), kad stipriai nepasireikštų tiesinė ir dvifotonė sugertis, ir storis sutilptų į pluošto sąsmauką. Dar viena sąlyga: puslaidininkinės medžiagos relaksacijos trukmė turi būti mažesnė nei impulso trukmė, kad neigiamo n_2 absoliutinis dydis būtų panašus arba didesnis už lazerinės terpės teigiamą n_2 . GaAs minėta relaksacijos trukmė lygi 100 ps, tad sprendimas su puslaidininkiniais *B-integralo* kompensatoriais yra tinkamas tik kelių šimtų pikosekundžių trukmės arba nanosekundiniams impulsams. *D.D. Meyerhofer ir O.A. Konoplev* sprendime impulsai buvo plečiami iki 300 ps ir 1 ns. Puslaidininkinės struktūros netiesinio lūžio rodiklio absoliutinis dydis viršijo stiprintuvo aktyviosios terpės netiesinį lūžio rodiklį. Vieno praėjimo per kompensatorių pakako sukompensuoti per daug lėkčių regeneraciniame stiprintuve sukauptą *B-integralą*. Netiesinės fazės

kompensavimo sprendimas buvo pademonstruotas tik gana nedidelio *B-integralo* atveju – 1,6 rad pavyko sumažinti iki 0,4 rad.

Straipsnyje U. Roth et al., „Compensation of nonlinear self-focusing in high-power lasers“, IEEE Journal of Quantum Electronics 36, pp. 687–691 (2000) aprašyti skaitinio modeliavimo ir eksperimentiniai rezultatai, kaip, panaudojant GaAs plonasluoksne puslaidininkinę struktūrą, lazerinio pluošto fokusavimasis yra sukompensuojamas Nd:stiklas terpės lazerinėje sistemoje. Žemas puslaidininkinės struktūros pažeidimo slenkstis yra pagrindinis minėtų sprendimų trūkumas. 1 GW/cm² intensyvumo vertė, kurios reikia, kad GaAs netiesinis lūžio rodiklis n_2 viršytų Nd:YLF ar Nd:stiklas terpių n_2 , yra nedaug mažesnė už pažeidimo slenkstį. O padidinus struktūros storį, labai išauga tiesinės ir netiesinės sugerties nuostoliai. Dar vienas trūkumas – su fiksuotu struktūros storiu ir pluošto fokusavimo parametrais nėra paderinimo galimybių. Be to, toks kompensavimo būdas yra netinkamas didelės vidutinės galios lazeriams dėl lazerio spinduliuotės sugerties ir atsirandančių šiluminių reiškinių.

Egzistuoja ir kita netiesinės fazės kompensavimo galimybė. Dėl kaskadinių netiesinių reiškinių išderintose bangos ilgio konversijos konfigūracijose, pavyzdžiui, antros harmonikos generacijoje (AHG), fundamentinės bangos ilgio spinduliuotė patiria fazės pokytį. Kadangi jis priklauso nuo intensyvumo, šį reiškinį galima suvokti kaip efektinio netiesinio lūžio rodiklio buvimą. AHG elementą išderinus iš fazinio sinchronizmo, antros harmonikos generacija vyksta neefektyviai, nes dėl grupinių greičių nederinimo labai greitai prasideda atvirkštinis reiškinys – atgalinė konversija – energijos perdavimas iš antros harmonikos bangos į fundamentinio bangos ilgio bangą. Tada vėl prasideda antros harmonikos generacija, ir t. t. Energijos mainai vyksta kelis kartus, o rezultatas – žemas antros harmonikos (AH) generacijos efektyvumas ir efektinis netiesinis lūžio rodiklis fundamentinei bangai, kuris gali būti tiek teigiamas, tiek ir neigiamas, priklausomai nuo išderinimo iš fazinio sinchronizmo sąlygų.

Didelio išderinimo atveju, kai $|\Delta k|L \gg 2\pi$, kur L – AHG kristalo ilgis, efektinis netiesinis lūžio rodiklis yra proporcingas AHG kristalo kvadratiniam efektiniam netiesiškumui d_{eff} ir atvirkščiai proporcingas faziniam išderinimui Δk : $n_2^{\text{eff}} \propto -\frac{d_{\text{eff}}^2}{\Delta k}$, kur $\Delta k = k_{2\omega} - 2k_{\omega}$. Ši priklausomybė negalioja arti sinchronizmo kampo. Arti fazinio

sinchronizmo, kai $|\Delta k|L \leq 2\pi$ ir $|\Delta k|L \cong 2\pi$, sprendinys eksperimentiškai buvo pademonstruotas dar 1992 m. straipsnyje: R. DeSalvo et al., „Self-focusing and self-defocusing by cascaded second-order effects in KTP“, *Opt. Lett.* 17, pp. 28–30 (1992), o formule užrašytas M. Bache disertacijoje „Cascaded nonlinearities for ultrafast nonlinear optical science and applications“ (2018), 14 psl. (užrašomas tik netiesinei fazei):

$$\Delta\Phi^{eff} \propto -[1 - \text{sinc}(\Delta kL)] \frac{d_{eff}^2}{\Delta k}.$$

Europos patentas nr. EP1153332 (D.N. Payne et al.; prioriteto data: 1999-02-19) aprašo būdą ir optinį įrenginį, naudojamą telekomunikacijoje. Telekomunikacijai reikalingi optiniai stiprintuvai, gebantys pastiprinti signalą be impulso spektrinio ir laikinio profilio iškraipymų. Skaiduliniam stiprintuve fazinė savimoduliacija yra proporcinga impulso intensyvumui ir aktyviosios skaidulos ilgiui, ir vienas iš būdų yra naudoti didelio modos ploto skaidulą stiprintuve, kad būtų sumažintas intensyvumas. D.N. Payne et al. sprendimo esmė – naudoti įprastinę kvarcinę skaidulą arba planarinį stiprintuvą (LiNbO_3 arba kvarco pagrindu), o fazinę savimoduliaciją laike prieškompensuoti efektyviu n_2 , sukuriama išderintame AHG elemente. Minėtas AHG elementas yra periodiškai orientuotas LiNbO_3 (PPLN) kristalas. Išderinimas iš fazinio sinchronizmo yra atliekamas kristalo temperatūros keitimu: mažinant temperatūrą sukuriamas teigiamas efektyvus n_2^{eff} , didinant temperatūrą, sukuriamas neigiamas efektyvus n_2^{eff} . Spinduliuotės intensyvumas yra toks, kad būtų dirbama didelio užpildos apgrąžos panaudojimo režime. Netiesinės fazės kompensacija atliekama prieš stiprinimą. Sprendimo autoriai pademonstravo, kad 1,2 ps impulsas, kuris stiprintuve pasiekia 1 kW smailinę galią ir be prieškompensacijos sukaupia $2,5\pi$ rad *B-integralo* dydį, panaudojus 4 mm PPLN kristalą ir palaikant 10 °C aukštesnę nei AHG fazinio sinchronizmo temperatūrą, pavyko atstatyti impulso laikinį profilį ir trukmę iki pradinio. Nuostoliai dėl antros harmonikos generacijos siekė maždaug 20 %. Taip pat numatytos kitos realizacijos, kuriose AHG elementas yra periodiškai orientuota optinė skaidula; temperatūros derinimas atliekamas remiantis grįžtamojo ryšio duomenimis, pvz. matuojant spektro formą. Tarp AHG elemento ir stiprintuvo naudojamas atenuatorius atveria platesnes galimybes tiksliai sistemos neigiamo n_2 ir teigiamo n_2 suderinimui. Payne et al. sprendimas yra tinkamas skaidulinėms optinėms grandinėms telekomunikacijoje, tačiau negalėtų būti pritaikytas didelės energijos ultratrumpųjų

impulsų kietakūnėms lazerinėms sistemoms. Didelio modos diametro pluoštui sunku užauginti didelių gabaritų ir geros kokybės PPLN kristalą. PPLN kristalų pažeidimo slenkstis yra mažiausiai viena eile žemesnis už tūrinių BBO ar LBO kristalų pažeidimo slenkstį.

K. Beckwitt et al., „Compensation for self-focusing by use of cascade quadratic nonlinearity“, Opt. Lett. 26, pp. 1696–1698 (2001) straipsnyje pademonstruotas fokusavimosi kompensavimas ir pluošto kokybės pagerinimas, paremtas efektyviu neigiamu netiesiniu lūžio rodikliu, gautu išderintoje I-tipo antros harmonikos generacijoje BBO kristale. Femtosekundinė Ti:safyro regeneracinio stiprintuvo spinduliuotė, kurios 150 fs trukmės impulsų energija lygi 600 μJ , ir kuri jau turi nežymią erdvinę intensyvumo moduliaciją, praeina 6 cm ilgio lydyto kvarco optinį elementą. Dirbant 23 GW/cm^2 sąlygomis, spinduliuotė minėtame kvarciniame optiniame elemente dėl teigiamo netiesinio lūžio rodiklio sukaupia $1,1\pi$ rad netiesinės fazės dydį, kuris pasireiškia tuo, kad nedidelė intensyvumo moduliacija tampa aštriais pikais. Kompensavimui yra naudojamas 2,5 cm ilgio BBO kristalas. Jo medžiagos netiesinis lūžio rodiklis yra teigiamas ir apytiksliai lygus lydyto kvarco netiesiniam lūžio rodikliui, tad bendras fazės kiekis, kurį reikia kompensuoti tampa maždaug $1,65\pi$ rad. Erdviškai išderinus BBO kristalą (I-tipo sąveikoje) iš fazinio sinchronizmo, pasiekama sukauptos netiesinės fazės visiška kompensacija. Stebint skersinį pluošto skirstinį, matoma, kad yra išvengiama pluošto diametro sumažėjimo ir smulkios skalės intensyvumo moduliacijos. Dar labiau išsukus BBO kristalą iš fazinio sinchronizmo kampo, pastebimas perkompensavimas: pluošto diametras padidėja, o smulkios skalės intensyvumo moduliacijos ir vėl išryškėja. Minėtame straipsnyje netiesinės fazės įtaka ir jos kompensacija ištirta ir laikinėje skalėje. 5 ps spektriškai riboti impulsai, kurių energija 0,5 mJ, per vieną lėkį 2 cm ilgio Ti:safyro kristale sukaupia 1π radianų dydžio netiesinę fazę. Dėl savimoduliacijos spektras išplatėja 3,2 karto. 1,7 cm ilgio BBO kristalu, išderintu iš fazinio sinchronizmo, pasiekta dalinė laikinės savimoduliacijos kompensacija: spektro išplitimas sumažintas nuo 3,2 karto iki 1,5 karto. Teoriškai apsvarstyta galimybė ir daugialėkiuose stiprintuvuose kompensuoti netiesinę fazę po kiekvieno lėkio.

J.P. Caumes et al., „Direct measurement of wave-front distortion induced during second-harmonic generation: application to breakup-integral compensation“, Opt. Lett. 29, pp. 899–901 (2004) straipsnyje tyrinėta netiesinės fazės kompensacija

išderintoje I-tipo antros harmonikos generacijoje BBO kristale, stebint pluošto banginio fronto iškraipymą Šako–Hartmano matuokliu (angl. – *Shack–Hartmann wave-front analyzer*). 700 fs impulsų trukmės ir $1,053\ \mu\text{m}$ bangos ilgio lazerinei spinduliuotei sklindant 4 cm ilgio lydyto kvarco elementu užfiksuota nuo 0,25 rad iki 3 rad netiesinė fazė, intensyvumui kintant $2,5\text{--}40\ \text{GW}/\text{cm}^2$ intervale. SF57 stiklo netiesiškumas yra žymiai didesnis, todėl tik 0,8 cm storio bandinio pakako, kad būtų pasiekta 3 rad netiesinės fazės riba, esant $20\ \text{GW}/\text{cm}^2$ spinduliuotės intensyvumui. Taip pat ištirta netiesinės fazės priklausomybė nuo BBO kristalo išderinimo iš fazinio sinchronizmo, esant $16\ \text{GW}/\text{cm}^2$ (impulsų energija $120\ \mu\text{J}$) ir $48\ \text{GW}/\text{cm}^2$ spinduliuotės intensyvumui. Nors pluošto skersmens pasikeitimas tokiomis sąlygomis dar nepasireiškė, Šako–Hartmano matuokliu užfiksuotas erdvinis banginio fronto iškraipymas. Pademonstruota iki 2π rad dydžio netiesinės fazės, sukauptos lydyto kvarco elemente, kompensacija 2 mm storio BBO kristale. Netiesinės fazės kompensacija buvo įmanoma intensyvumo intervale nuo $10\ \text{GW}/\text{cm}^2$ iki $100\ \text{GW}/\text{cm}^2$.

C. Dorrer et al., „Self-phase modulation compensation in a regenerative amplifier using cascaded second-order nonlinearities“, *Opt. Lett.* 39, pp. 4466–4469 (2014) pademonstravo netiesinės fazės kompensaciją regeneracinio stiprintuvo rezonatoriuje. Pagrindinis tikslas – išvengti spektro išplatėjimo ir impulso pailgėjimo. Kai 12 ps trukmės impulsas buvo stiprinamas nuo 10 pJ iki 2 mJ Nd:YLF regeneraciniame stiprintuve be kompensatoriaus, per daug lėkų sukaupia 6 rad ($\sim 2\pi$) dydžio netiesinė fazė, dėl kurios spektras stipriai išplatėjo. Pagrindinis indėlis – dėl DKDP Pokelso elemento netiesinio lūžio rodiklio. Įterpus 5 mm ilgio BBO kristalą, išderintą iš fazinio sinchronizmo (I-tipo sąveikai), spektras neišplatėjo, o erdvinis pluošto skirstinys išliko artimas rezonatoriaus modai. Tai indikuoja, kad netiesinę fazę pavyko sukompensuoti. Dėl kompensacijos išlaikyta maža impulso trukmė, kas lėmė, kad po regeneracinio stiprintuvo sekančiame galios stiprintuve pasiekta iki 2 kartų stiprinimo efektyvumo pagerėjimas. Galios stiprintuve pasiekta 75 mJ impulsų energija ($7,5\ \text{GW}/\text{cm}^2$ intensyvumas) be erdvinių ir laikinių spinduliuotės iškraipymų.

I. Stasevičius ir M. Vengris, „Exploiting optical nonlinearities for group delay dispersion compensation in femtosecond optical parametric oscillators“, *Opt. Express* 28, pp. 26122–26136 (2020) pademonstravo netiesinės fazės kompensaciją kaskadinių netiesinių reiškinių pagalba femtosekundinio parametrinio šviesos osciliatoriaus viduje. Vienoje iš realizacijų kaskadinio kvadratinio netiesiškumo šaltinis

buvo antros harmonikos kristalas (0,7 mm ilgio BBO, I-tipo sąveikai), kitoje realizacijoje – pats parametrinio stiprinimo kristalas (2,5 mm storio LBO, I-tipo sąveikai). Tiek parametriniame kristale, tiek antros harmonikos kristale dirbta 20 GW/cm² intensyvumo sąlygomis. Visame parametrinio šviesos osciliatoriaus derinimo diapazone – nuo 770 nm iki 790 nm – išlaikyta mažesnė nei 200 fs impulso trukmė ir aukšta laikinė kokybė (trukmės ir spektro pločio sandauga neviršijo 0,6), o vidutinės galios nuostoliai kompensatoriuje neviršijo 20 %.

A. L. Belostotsky et al., „Nonlinear phase change in type II second-harmonic generation under exact phase-matched conditions“, Opt. Lett. 19, pp. 856–858 (1994) straipsnyje aprašyta galimybė sukaupti netiesinę fazę kito tipo kaskadinių netiesinių reiškinių metu. Antros harmonikos generacijai vykstant II-tipo sąveikoje (fundamentinė spinduliuotė turi dvi statmenas poliarizacijos dedamąsias, vad. o ir e poliarizacijomis), kai statmenų poliarizacijos dedamųjų amplitudės yra nevienodos, net ir neišderinus iš fazinio sinchronizmo kampo vyksta periodiniai energijos mainai tarp fundamentinės ir antros harmonikos spinduliuotės. Kai tik fundamentinės bangos mažesnės amplitudės poliarizacijos dedamoji yra išsekvojama, prasideda atgalinė konversija, ir iš naujo generuojama fundamentinė banga patiria π radianų dydžio fazės pokytį. Kai išsekvojama antra harmonika, procesas prasideda iš naujo, ir kiekvieną kartą, kai fundamentinės bangos silpnesnės dedamosios ar antros harmonikos amplitudė sumažėja iki nulio ir pradedama generuoti iš naujo, įvyksta jų fazės šuolis per π . Modeliavimai, atlikti KTP antros harmonikos kristalui ties 1,064 μm bangos ilgio <0,2 GW/cm² galios tankio sąlygomis, rodo:

1) esant 1:0,7 fundamentinės bangos dedamųjų amplitudžių santykiui, 2π rad fazės pokytį galima pasiekti >0,9 cm AHG kristalo ilgyje;

2) esant 1:0,5 amplitudžių santykiui, 2π rad fazės pokytį galima pasiekti ~0,8 cm AHG kristalo ilgyje. Taigi dirbant faziniame sinchronizme, atgalinės konversijos periodiškumas ir tam tikrame ilgyje pasiekiamas netiesinės fazės pokytis (kuris yra π , 2π ir t.t.) priklauso nuo amplitudžių santykio.

Taip pat pamodeliuota II-tipo antros harmonikos generacija, kai antros harmonikos generacijos KTP kristalas yra išderinamas iš fazinio sinchronizmo. Šiuo atveju fundamentinės bangos mažesnės amplitudės dedamosios fazės pokyčiai yra mažesni nei π , ir kinta nešuoliška, ir per 1 cm netiesinio kristalo ilgį nespėja surinkti 2π radianų dydžio suminės fazės. Antra vertus, energijos mainų periodiškumas

priklauso ir nuo išderinimo iš fazinio sinchronizmo dydžio, tad atsiranda papildoma galimybė švelniai paderinti fazės pokyčio dydį. II-tipo sąveikoje reikia nepamiršti, kad o ir e poliarizacijos dedamosios pasižymi skirtingu tiesiniu lūžio rodikliu, tad ilgame kristale susidarys fazės postūmis tarp fundamentinės bangos dedamųjų vien dėl sklidimo kristalu. Ilgas II-tipo AHG kristalas veiks kaip fazinė plokštelė, kas A. L. Belostotsky *et al.* modeliavime nebuvo įskaityta. Be to, KTP kristalas pasižymi žemu pažeidimo slenksčiu, bent 5 kartus žemesniu nei kiti didelės energijos lazerinėse sistemose naudojami AHG kristalai: BBO, BIBO, LBO ar CLBO. Ultratrumpųjų impulsų lazerinėse sistemose, kuriose intensyvumas viršija 20 GW/cm^2 , KTP kristalas nėra tinkamas pasirinkimas.

Artimiausi pagal techninę esmę yra visi sprendimai, kuriuose netiesinės fazės kompensacija atliekama kaskadinių kvadratinų netiesinių reiškinių pagalba didelio intensyvumo sąlygomis ir kuriuose reikia kompensuoti bent 2π radianų dydžio teigiamą *B-integralą*. Tačiau nei viename žinomame sprendime nėra pasiekama $>200 \text{ mJ}$ pikosekundinių impulsų energija 20 W/cm^2 galios tankio sąlygomis ir užtikrinant aukštą lazerinės spinduliuotės erdvinę ir laikinę kokybę taip, kad likutinė *B-integralo* vertė neviršytų π .

Šiuo išradimu siekiame:

- tūriniu kvadratinio netiesiškumo kristalu, kuriame pasireiškia kaskadiniai netiesiniai reiškiniai, kompensuoti lazerinėje sistemoje sukauptą netiesinės fazės dydį, viršijantį 2π radianų;
- surasti sąlygas lazerinės sistemos netiesinei fazei kompensuoti, dirbant $>20 \text{ GW/cm}^2$ režime;
- sustiprinti $5 \text{ ps} - 100 \text{ ps}$, prioritetiškai $10 \text{ ps} - 20 \text{ ps}$, trukmės impulsų spinduliuotę iki ne mažiau kaip 200 mJ , prioritetiškai iki 500 mJ , atskiru atveju – iki 1 J ,
- užtikrinti aukštą erdvinę ir laikinę kokybę, kad spinduliuotė būtų tinkama keliapakopės parametrinio čirpuotų impulsų stiprinimo (angl. OPCPA) sistemos kaupinimui, ir tuo pačiu užtikrinti ekonomiškai pagrįstą sistemos kainą;
- dėl geresnio apgrąžos panaudojimo efektyvumo (iki 15% vieno lėkio metu) naudoti mažesnio diametro aktyviąją terpę;

- didelės energijos ir aukšto intensyvumo ultratrumpųjų impulsų stiprintuve realizuoti veikimą stiprinimo soties režime.

IŠRADIMO ESMĖS ATSKLEIDIMAS

Pagal pasiūlytą išradimą lazerinėje didelio intensyvumo efektyvioje lazerinėje sistemoje, apimančioje optinių elementų grandinę, kurioje išdėstytas kvantinis lazerinis spinduliuotės stiprintuvas, turintis savyje bent vieną stiprinimo elementą ir bent vienas netiesinės fazės kompensavimo elementas, kur

- minėto bent vieno stiprinimo elemento netiesinis lūžio rodiklis n_2 yra teigiamo ženklo, o minėto bent vieno netiesinės fazės kompensavimo elemento netiesinis lūžio rodiklis n_2 yra neigiamo ženklo, kur

- minėtas bent vienas netiesinės fazės kompensavimo elementas yra kvadratinio netiesiškumo optinis elementas, kuriame vyksta kaskadiniai netiesiniai reiškiniai, kurioje

- minėtas bent vienas stiprinimo elementas yra sukonfigūruotas ir yra kaupinamas taip, kad įėjimo spinduliuotė sustiprinama, gaunant ne mažesnę kaip 200 mJ išėjimo spinduliuotės impulsų energiją,

- minėtas bent vienas netiesinės fazės kompensavimo elementas yra sukonfigūruotas taip, kad bendras minėtame bent viename netiesinės fazės kompensavimo elemente gaunamas neigiamos netiesinės fazės absoliutinis dydis yra nuo π iki 6π radianų,

- išėjimo spinduliuotės likutinis netiesinės fazės dydis, išreikštas *B-integralo* verte, neviršija π radianų, o minėtų išėjimo spinduliuotės ir įėjimo spinduliuotės spektro pločių santykis neviršija 3.

Įėjimo į lazerinę sistemą spinduliuotės ir išėjimo iš lazerinės sistemos spinduliuotės impulsų trukmė yra intervale nuo 5 ps iki 100 ps.

Bent viename iš optinių elementų, sudarančių lazerinę sistemą, spinduliuotės intensyvumas viršija 20 GW/cm² vertę.

Minėtas bent vienas stiprinimo elementas yra dvi izotropinės aktyviosios terpės, o

- lazerinės sistemos optiniai elementai į optinę grandinę sujungti taip, kad lazerinė spinduliuotė per minėtas dvi izotropines aktyvias terpes bei minėtą bent vieną netiesinės fazės kompensavimo elementą sklįstų po vieną kartą,

- kiekvienos iš minėtų dviejų izotropinių aktyviųjų terpių stiprinimo faktorius yra nuo 1 iki 10 kartų, ir kiekvienoje iš jų užpildos apgrąžos panaudojimo efektyvumas yra ne mažesnis kaip 15 %.

Minėtas bent vienas stiprinimo elementas yra viena izotropinė aktyvioji terpė,

- lazerinės sistemos optiniai elementai į optinę grandinę sujungti taip, kad lazerinė spinduliuotė per minėtą vieną izotropinę aktyviąją terpę bei minėtą bent vieną netiesinės fazės kompensavimo elementą sklįstų po du kartus,

- minėtos vienos izotropinės aktyviosios terpės stiprinimo faktorius yra nuo 1 iki 10 kartų kiekviename spinduliuotės per ją lėkyje, o bendras per du spinduliuotės lėkius pasiekiamas užpildos apgrąžos panaudojimo efektyvumas yra ne mažesnis kaip 30 %.

Per minėtą bent vieną stiprinimo elementą sklindanti spinduliuotė yra tiesinės poliarizacijos lazerinė spinduliuotė.

Per minėtą bent vieną stiprinimo elementą sklindanti spinduliuotė yra apskritiminės poliarizacijos lazerinė spinduliuotė.

Pagal prioritetinį šio išradimo išpildymą

- per minėtą bent vieną netiesinės fazės kompensavimo elementą sklindanti spinduliuotė yra tiesinės poliarizacijos lazerinė spinduliuotė, o

- minėtas bent vienas netiesinės fazės kompensavimo elementas yra I-tipo antros harmonikos generacijos kristalas arba kristalų seka,

- neigiamas netiesinis lūžio rodiklis n_2 yra gaunamas generuojant antrą harmoniką išderinto fazinio sinchronizmo sąlygomis.

Pagal atskirą prioritetinio išpildymo variantą minėtas bent vienas kompensavimo elementas yra dviejų I-tipo antros harmonikos generacijos kristalų seka, kur

- pirmame lėkyje per minėtus du antros harmonikos generacijos kristalus sklindanti spinduliuotė yra pirmos tiesinės poliarizacijos būsenos,

- antrame lėkyje per minėtus du antros harmonikos generacijos kristalus sklindanti spinduliuotė yra antros tiesinės poliarizacijos būsenos, statmenos pirmai tiesinės poliarizacijos būsenai,

- pirmasis antros harmonikos generacijos kristalas yra sukonfigūruotas ir įmontuotas optinių elementų grandinėje taip, kad išderinimas iš fazinio sinchronizmo būtų atliekamas išsukant kristalą iš fazinio sinchronizmo kampo plokštumoje, kuri yra sinchronizmo plokštuma pirmos būsenos tiesinei poliarizacijai, todėl pirmasis kristalas kompensuoja netiesinės fazės dydį, sukauptą pirmojo lėkio per visus lazerinės sistemos optinius elementus metu;

- antrasis antros harmonikos generacijos kristalas yra sukonfigūruotas ir įmontuotas optinių elementų grandinėje taip, kad išderinimas iš fazinio sinchronizmo būtų atliekamas išsukant kristalą iš fazinio sinchronizmo kampo plokštumoje, kuri yra sinchronizmo plokštuma antros būsenos tiesinei poliarizacijai, todėl antrasis kristalas kompensuoja netiesinės fazės dydį, sukauptą antrojo lėkio per visus lazerinės sistemos optinius elementus metu.

Pagal dar vieną atskirą prioritetinio išpildymo variantą minėtas bent vienas kompensavimo elementas yra dviejų I-tipo antros harmonikos generacijos kristalų seka, kur pirmasis kristalas ir antrasis kristalas yra sukonfigūruoti taip, kad išderinimas iš fazinio sinchronizmo būtų atliekamas keičiant kristalų temperatūrą.

Pagal kitą šio išradimo išpildymo variantą

- per minėtą bent vieną netiesinės fazės kompensavimo elementą sklindanti spinduliuotė yra tiesinės poliarizacijos lazerinė spinduliuotė, o

- minėtas bent vienas netiesinės fazės kompensavimo elementas yra II-tipo antros harmonikos generacijos kristalas, kurio principinės ašys yra pasuktos kampu β minėtos tiesinės poliarizacijos atžvilgiu, ir

- neigiamas netiesinio lūžio rodiklis n_2 yra gaunamas generuojant antrą harmoniką:

- išderinto fazinio sinchronizmo sąlygomis, jei kampas β yra lygus 45 laipsniams, arba

- neišderinto arba išderinto fazinio sinchronizmo sąlygomis, jei kampas β nėra lygus 45 laipsniams.

Pagal dar vieną šio išradimo išpildymą

- per minėtą bent vieną netiesinės fazės kompensavimo elementą sklindanti spinduliuotė yra tiesinės poliarizacijos lazerinė spinduliuotė, o
- minėtas bent vienas netiesinės fazės kompensavimo elementas yra I-tipo ir (arba) II-tipo antros harmonikos generacijos kristalų seka, minėtuose kristaluose realizuojant kaskadinius netiesinius reiškinius ir gaunant neigiamą netiesinę fazę.

Pagal alternatyvų šio išradimo išpildymą

- per minėtą bent vieną netiesinės fazės kompensavimo elementą sklindanti spinduliuotė yra apskritiminės poliarizacijos lazerinė spinduliuotė, o
- minėtas bent vienas netiesinės fazės kompensavimo elementas yra II-tipo antros harmonikos generacijos kristalas arba kristalų seka,
- neigiamas netiesinio lūžio rodiklis n_2 yra gaunamas generuojant antrą harmoniką neišderinto arba išderinto fazinio sinchronizmo sąlygomis.

Antros harmonikos generacijos kristalai yra parinkti iš šio kristalų sąrašo: BBO, BIBO, LBO arba CLBO.

Išėjimo spinduliuotės impulsų energija yra ne mažesnė kaip 1 J, o likutinis netiesinės fazės dydis, išreikštas *B-integralo* verte, neviršija 1 radiano.

Nuostoliai dėl antros harmonikos generacijos minėtame bent viename netiesinės fazės kompensavimo elemente (4a, 4b, 4c, 4d) neviršija 5 %.

Išradimo naudingumas

Netiesinės fazės kompensacija siaurajuostės aktyviosios terpės stiprintuve išderintos AHG būdu privalumai yra šie:

- efektinis netiesinis lūžio rodiklis n_2^{eff} yra beveik vienodas per visą stiprintuvo stiprinimo juostą,
- AHG kristalo ar kristalų išderinimu iš fazinio sinchronizmo galima švelniai pareguliuoti efektinio netiesinio lūžio rodiklio dydį,
- dviejų lėkių sistemoje galima atskirai kompensuoti netiesinę fazę, sukaupiamą pirmojo ir antrojo lėkio metu,
- BBO ir kiti boratiniai antros harmonikos kristalai pasižymi aukštu pažeidimo

slenksčiu ir tuo pačiu dideliu efektiniu netiesiškumu, kas leidžia juos naudoti didelės energijos ir didelio intensyvumo sistemose netiesinei fazei kompensuoti. Dviem standartinio dydžio kristalais galima kompensuoti iki 6π rad dydžio *B-integralą*, ir pasiekti 1 J dydžio pikosekundinių impulsų energiją.

TRUMPAS BRĖŽINIŲ APRAŠYMAS

1 pav. – šio išradimo lazerinės sistemos išpildymas, kuriame panaudojama viena aktyvioji terpė.

2 pav. – šio išradimo lazerinės sistemos prioritetinis išpildymas.

3 pav. – šio išradimo lazerinės sistemos išpildymas, kuriame panaudojamos dvi aktyviosios terpės.

4 pav. – pavaizduota tipinė efektinės netiesinės fazės priklausomybė nuo išderinimo Δk kvadratinio netiesiškumo terpėse.

5, 6, 7 pav. – kiti šio išradimo lazerinės sistemos išpildymo variantai.

TINKAMIAUSI ĮGYVENDINIMO VARIANTAI

1 pav. pavaizduotas šio išradimo lazerinės sistemos pirmas išpildymas. Lazerinė sistema yra realizuota kaip dviejų lėkių kvantinis stiprintuvas, kuriame: 1 – įėjimo lazerinė spinduliuotė; 2 – poliarizatorius, kuris praleidžia horizontaliosios (H) tiesinės poliarizacijos spinduliuotę ir atspindi vertikaliosios (V) tiesinės poliarizacijos spinduliuotę; 3 – aktyvioji terpė, pavyzdžiui, Nd:YAG kristalas; 4a, 4b – I-tipo antros harmonikos generacijos (AHG) kristalai, skirti efektingam netiesiniam lūžio rodikliui sukurti; 5 – ketvirčio bangos ilgio fazinė plokštelė aktyviosios terpės fundamentiniam bangos ilgiui, kurios optinė ašis sudaro 45° kampą su krentančios spinduliuotės H poliarizacijos kryptimi; 6 – veidrodis, pasižymintis dideliu atspindžio koeficientu aktyviosios terpės fundamentiniam bangos ilgiui; 7 – išėjimo spinduliuotė.

Minėti AHG kristalai 4a, 4b yra tvirtinami taip, kad galėtų būti sukiojami: pirmasis AHG kristalas 4a yra sukiojamas plokštumoje, kuri yra fazinio sinchronizmo plokštuma H poliarizacijai; antrasis kristalas 4b – plokštumoje, kuri yra fazinio sinchronizmo plokštuma V poliarizacijai. Kristalai 4a, 4b yra orientuoti ir pagaminti I-

tipo antros harmonikos generacijai. Aktyvioji terpė 3 stiprina per poliarizatorių 2 praėjusią H poliarizacijos įėjimo spinduliuotę 1. Antram lėkiui realizuoti optinėje grandinėje ir spinduliuotei iš stiprintuvo išvesti po atspindžio nuo poliarizatoriaus yra panaudoti: ketvirčio bangos ilgio fazinė plokštelė 5 ir veidrodis 6. Fazinė plokštelė 5 tiesinę horizontaliąją (H) poliarizaciją paverčia apskritimine, o po atspindžio nuo veidrodžio 6 ir antro lėkio per ketvirčio bangos ilgio fazinę plokštelę 5 poliarizacija tampa tiesine vertikaliąja (V) poliarizacija, statmena įėjimo poliarizacijai.

Daugelio aktyviųjų terpių netiesinis lūžio rodiklis yra teigiamas, todėl netiesiniam fazės pokyčiui kompensuoti reikalingas elementas, pasižymintis neigiamu efektiniu lūžio rodikliu, mūsų atveju – AHG kristalas. Efektinio lūžio rodiklio ženklas priklauso nuo AHG kristalo išderinimo iš fazinio sinchronizmo. Kampinio derinimo atveju – priklauso nuo AHG kristalo išsukimo iš sinchronizmo kampo.

Kai H poliarizacijos spinduliuotė, išėjusi iš stiprintuvo aktyviosios terpės 3, sklinda per kristalus 4a, 4b pirmą kartą, pirmajame kristale 4a ji patiria netiesinę sąveiką dėl suminio poveikio į jos fazę dėl kristalo medžiagos teigiamo netiesinio lūžio rodiklio n_2^m ir neigiamo efektinio n_2^{eff} indėlio išderintoje antros harmonikos generacijoje, o antrajame kristale 4b spinduliuotė patiria tik medžiaginio teigiamo kristalo netiesinio lūžio rodiklio poveikį. Pirmojo kristalo 4a išderinimas iš fazinio sinchronizmo parenkamas taip, kad kompensuotų suminę sukauptą teigiamą netiesinę fazę pirmo lėkio per aktyviąją terpę 3 ir per abu AHG kristalus 4a, 4b metu.

Po atspindžio nuo veidrodžio 6 ir antrą kartą praėjusios per fazinę plokštelę 5 spinduliuotės poliarizacija paverčiama į tiesinę vertikaliąją (V). Antro lėkio metu AHG kristalų funkcijos susikeičia vietomis. V poliarizacijos spinduliuotė AHG kristale 4b sukaupia teigiamą netiesinę fazę dėl kristalo medžiaginių savybių ir neigiamą netiesinę fazę dėl išderintos antros harmonikos generacijos, o kristale 4a – tik teigiamą netiesinę fazę dėl kristalo medžiaginių savybių. Antrojo kristalo 4b išderinimas iš fazinio sinchronizmo ir jo ilgis parenkami taip, kad jame sukaupia neigiama netiesinė fazė kompensuotų suminę sukauptą teigiamą abiejų AHG kristalų 4a ir 4b netiesinę fazę ir prieškompensuotų netiesinę fazę, kurią spinduliuotė patirs sklisdama per aktyviąją terpę 3. Tai yra, aktyviosios terpės 3 netiesinės sąveikos įtakos kompensacija yra atliekama iš anksto, tad ją galima vadinti prieškompensacija. Taip išvengiama pavojingo pluošto fokusavimosi antro lėkio per aktyviąją terpę 3 metu.

Kadangi po antrojo lėkio per aktyviąją terpę spinduliuotės poliarizacija V yra statmena pradinei poliarizacijos būsenai H, spinduliuotė 7 yra atspindi nuo poliarizatoriaus 2 ir išeina iš stiprinimo sistemos kitu keliu negu įėjimo spinduliuotė 1. Esant idealiai netiesinės fazės kompensacijai, išėjimo spinduliuotė 7 pasižymi aukšta erdvine ir laikine spinduliuotės kokybe. Esant dalinei kompensacijai, bet sukaupiai netiesiniai fazėi esant mažesnei kaip 3 rad ($< \pi \text{ rad}$), netiesinio lūžio rodiklio poveikis spektrinėms, laikinėms ir erdvinėms spinduliuotės savybėms yra laikomas saugiu. Tai sumažina reikalavimus kompensacijos tikslumui ir leidžia lazerinę sistemą eksploatuoti tam tikrame išėjimo energijų diapazone nekeičiant kompensatoriaus suderinimo.

Netaikant netiesinės sąveikos kompensacijos, didelio intensyvumo lazerinėje sistemoje, kurioje galios tankis (intensyvumas) viršija 20 GW/cm^2 , o impulsai stiprinami iki $\sim 100 \text{ mJ}$ eilės energijos ir daugiau, $> 2\pi \text{ rad}$ dydžio netiesinė fazė per du lėkius surenkama net esant didesniai kaip 10 mm pluošto diametrui, kas yra optimalus praktinis elemento diametras. Tokias netiesinės fazės reikšmes galima kompensuoti į sistemą įnešant didelę neigiamos netiesinės fazės vertę, panaudojus tinkamus AHG kristalų 4a, 4b ilgius ar vieno ilgo AHG kristalo ilgį. BBO kristalas yra tinkamas šiam sprendimui realizuoti, nes pasižymi dideliu efektyviu netiesiškumu d_{eff} leidžiančiu pasiekti didelę efektyvio netiesinio lūžio rodiklio n_2^{eff} vertę. Dėl BBO kristalų auginimo technologinių apribojimų jų ilgis apribotas 25 mm , todėl dviejų kristalų panaudojimas leidžia tuos apribojimus apeiti.

Kadangi didžiausios efektyvio netiesinio lūžio rodiklio vertės yra pasiekiamos arti sinchronizmo kampo (4 pav.), tai netiesinės fazės kompensacija yra lydimą ir nuostolių dėl antros harmonikos spinduliuotės generacijos. Kaip indikacija, kokiame režime vyksta AHG generacija – galėtų būti antros harmonikos (AH) spinduliuotės energijos stebėjimas kryptyje 8 už veidrodžio 6, kuris yra skaidrus AH spinduliuotei. Pagal AHG efektyvumą galima spręsti apie tai, kiek yra nukrypta nuo fazinio sinchronizmo ir įsidėmėti fazinio sinchronizmo padėtį. Praktiškiau netiesinės fazės kompensaciją vertinti pagal pluošto laikinių, spektrinių arba erdvinų savybių pokyčius. Poveikis erdvinėms savybėms ne toks akivaizdus ir priklauso nuo pradinės pluošto skėsties bei pluošto dydžio. O štai spektro plotis vienareikšmiškai atspindi, kaip gerai sukompensuota sukaupia netiesinė fazė. Idealios kompensacijos atveju išėjimo spinduliuotės 7 spektro plotis turi būti toks pats kaip įėjimo spinduliuotės 1 spektro plotis. Praktinėje realizacijoje AHG kristalų 4a, 4b pozicijos, kuriose gaunamas

siauriausias išėjimo spinduliuotės 7 spektras, ir yra geriausios įmanomos kompensacijos pozicijos. Siūlomoje sistemoje naudojame du AHG kristalus, kur pirmasis kristalas turi kompensuoti sukauptą netiesinę fazę pirmojo lėkio metu, o antrasis – sukauptą netiesinę fazę antrojo lėkio metu. Todėl spektro pločio stebėjimą, skirtą netiesinės fazės kompensacijai įvertinti, galima atlikti kiekvienam lėkiui atskirai: po pirmojo lėkio – kryptyje 8, po antrojo lėkio – išėjimo spinduliuotės 7 kryptyje.

2 pav. pavaizduotas šio išradimo lazerinės sistemos prioritetinis išpildymas. Jame taip pat naudojama viena aktyvioji terpė 3, ir optinė schema yra papildyta šiais elementais: vaizdo pernešimo teleskopais 9a ir 9b bei ketvirčio bangos ilgio fazinėmis plokštelėmis 10a, 10b. Siekiant kuo efektyviau išnaudoti aktyviosios terpės 3 inversiją, kuri šoninio kaupinimo didelės galios sistemose būna pasiskirsčiusi visame aktyviosios terpės tūryje, geriausia, kad lazerinės spinduliuotės pluoštas turėtų plokščios viršūnės arba super-gausinės formos intensyvumo profilį. Tačiau toks pluoštas labai greitai difraguoja – neišlaiko skirstinio ir gali suformuoti didelio intensyvumo taškus, galinčius pažeisti bet kurį sistemos elementą. Vaizdo pernešimo sistemos leidžia pernešti suformuotą pluošto intensyvumo skirstinį (vaizdą) dideliais atstumais. Pirmasis teleskopas 9a perneša vaizdą į aktyviąją terpę 3 iš ankstesnės sistemos pakopos aktyviosios terpės. Antrasis teleskopas 9b perneša vaizdą iš aktyviosios terpės 3 ant galinio veidrodžio 6 (pluošto atvaizdas susidaro veidrodžio 6 plokštumoje) ir atgal į aktyviąją terpę 3. Panaudojant dar vieną teleskopą, pastatytą tarpe tarp teleskopo 9b ir veidrodžio 6 arba tarp fazinės plokštelės 5 ir veidrodžio 6, būtų galima AHG kristalus 4a ir 4b talpinti netoli pluošto atvaizdo, pernešto teleskopu 9b iš aktyviosios terpės 3, plokštumos.

Yra žinoma, kad, terpe sklindant apskritiminės poliarizacijos pluoštui, sukaupiamas mažesnis *B-integralas* nei sklindant tiesinės poliarizacijos pluoštui. Taigi ketvirčio bangos ilgio fazinės plokštelės 10a, 10b yra reikalingos tam, kad aktyviaja terpe 3 sklistų apskritiminės poliarizacijos pluoštas, o kitais sistemos elementais – tiesinės poliarizacijos pluoštas. Tai yra priemonė aktyviojoje terpėje sukaupti mažesnę netiesinę fazę. Sprendimas tinka izotropinei aktyviajai terpei, tokiai kaip Nd:YAG. Tokiu atveju iš sinchronizmo išderintais AHG kristalais 4a, 4b reikės kompensuoti mažesnę netiesinės fazės kiekį. Pluošto daliklio 11 atskėlus dalį išėjimo spinduliuotės 7, spektrometru 12 stebimi spinduliuotės spektro pločio pokyčiai. Kuomet spektras yra siauriausias, kompensacija yra geriausia.

Sistemos surinkimo ir derinimo metu spektrą galima stebėti pluošto kelyje tarp elementų 4b ir 5 arba tarp elementų 5 ir 6 arba už veidrodžio 6. Derinant pirmąjį AHG kristalą 4a, matuojamas spektro plotis.

Jei pradiniu momentu AHG kristalas 4a yra išstatomas fazinio sinchronizmo kampu (AH spinduliuotės energija didžiausia), spektras yra išplitęs tiek, kiek sąlygoja teigiama medžiaginė netiesinė fazė dėl pirmo lėkio per aktyviąją terpę 3 ir kitus sistemos elementus. Esant silpnesniam kaupinimui, spektro išplitimas bus mažesnis, esant stipresniam kaupinimui, spektro išplitimas bus didesnis. Išderinant AHG kristalą 4a iš fazinio sinchronizmo, spektrometru stebimas arba spektro platėjimas arba siaurėjimas. Kuomet spektras yra siauriausias, tuomet pasiekama geriausia pirmojo lėkio netiesinės fazės kompensacija.

Patartina pradinį derinimą, spektro platėjimą ir siaurėjimą bei fazinio sinchronizmo padėtį įsidėmėti esant sumažintam kaupinimo lygiui. Nes, dirbant su didelėmis spinduliuotės energijomis, yra pavojus dėl pluošto fokusavimosi pažeisti optinius elementus, jei AHG kristalas 4a bus išderinamas iš fazinio sinchronizmo taip, kai jo efektyvus netiesinis lūžio rodiklis teigiamas, ir suminę sistemos sukauptą netiesinę fazę AHG kristalas ne mažina, o didina. Didžiausia efektyvio netiesinio lūžio rodiklio n_2^{eff} vertė – tiek neigiama, tiek teigiama – yra netoli fazinio sinchronizmo. Išsiaiškinus kuria kryptimi derinant kristalas 4a veikia kaip kompensatorius, įjungus pilną kaupinimo lygį, kristalą derinti tik į tą pusę nuo fazinio sinchronizmo.

Antrojo AHG kristalo 4b išsukimo kampas derinamas, sistemoje esant gražinančiam veidrodžiui 6 ir stebint spektro plotį po antrojo lėkio per aktyviąją terpę išėjimo spinduliuotės 7 kelyje, kaip parodyta 2 pav. Šiuo atveju reikia imtis dar didesnių atsargumo priemonių derinimo metu, kad, esant pilnam kaupinimo lygiui, kristalas 4b būtų išderinamas reikiama kryptimi ir veiktų kaip kompensatorius, o ne papildomos teigiamos fazės šaltinis.

Vietoj fazinės plokštelės 5 gali būti panaudotas ir 45 laipsnių posūkio kampo Faradėjaus rotatorius, tačiau šis įneštų papildomą teigiamos netiesinės fazės kiekį, kurį reikėtų kompensuoti AHG kristalais 4a, 4b.

3 pav. – dar vienas šio išradimo lazerinės sistemos išpildymas. Čia taip pat yra du stiprinimo įvykiai, tačiau yra panaudojamos dvi aktyviosios terpės 3a ir 3b, per kurias spinduliuotė sklinda po vieną kartą. Aktyviųjų terpių 3a, 3b geometriniai ir

kaupinimo parametrai gali skirtis. Teigiamo netiesinio aktyviųjų terpių 3a, 3b lūžio rodiklio sąlygotas fazės pokytis yra kompensuojamas I-tipo sąveikos AHG kristalu 4, išderintu iš fazinio sinchronizmo. Kristalas 4 atlieka perkompensavimo funkciją: jis kompensuoja netiesinę fazę, sukaupią aktyviojoje terpėje 3a, ir prieškompensuoja netiesinę fazę, kuri susikaups aktyviojoje terpėje 3b. Šioje vietoje gali būti panaudoti keli AHG kristalai 4a, 4b, 4c tam, kad būtų surinkta didesnė netiesinė fazė. Abipus antrosios aktyviosios terpės 3b taip pat yra statomos ketvirčio bangos ilgio fazinės plokštelės 13a, 13b, kad per aktyviają terpę sklistų apskritiminės poliarizacijos pluoštas ir netiesinės fazės akumuliacija būtų mažesnė. Patartina naudoti du teleskopus 9a, 9b: vaizdo pernešimui iš terpės 3 į AHG kristalą 4 (arba vieną iš kristalų 4a, 4b, 4c, jei jie yra keli) ir iš kristalo 4 į terpę 3b. Už AHG kristalo 4 galima įterpti separatorių antros harmonikos spinduliuotei atskirti. Išėjimo spinduliuotės 7 pluošto kelyje dalikliu 11 atskėlus dalį fundamentinio bangos ilgio spinduliuotės ir matuojant jos spektro plotį, parenkamas geriausias netiesinės fazės sukompensavimo AH generacijos režimas.

4 pav. pavaizduota tipinė $\Delta\Phi^{\text{eff}}$ priklausomybė nuo išderinimo Δk . Kampinio derinimo atveju sąryšis tarp kristalo išsukimo kampo ir Δk priklauso nuo kristalo lūžio rodiklių fundamentiniam ir antros harmonikos bangos ilgiams priklausomybių nuo krypties kristale. Išderinimą iš fazinio sinchronizmo galima pasiekti ir keičiant kristalo temperatūrą. Teigiama efektinė netiesinė fazė $\Delta\Phi^{\text{eff} [+]}$ realizuojama, kai $\Delta k < 0$, o neigiama efektinė netiesinė fazė $\Delta\Phi^{\text{eff} [-]}$, kai $\Delta k > 0$. Kreivės 14, 15 ir 16 pateiktos tik iliustracijai ir yra apskaičiuotos pagal $\Delta\Phi^{\text{eff}} \propto -[1 - \text{sinc}(\Delta k L)] \frac{d_{\text{eff}}^2}{\Delta k}$ sąryšį, pasirinkus vienodą d_{eff} vertę ir tris skirtingus kristalo ilgius: kreivei 14 pasirinktas ilgis L , kreivei 15 – ilgis $1,5L$, o kreivei 16 – ilgis $2L$. Didžiausia $\Delta\Phi^{\text{eff}}$ vertė yra pasiekama ties tam tikru išderinimu, kuris yra netoli fazinio sinchronizmo (netoli $\Delta k = 0$), ir kuris priklauso nuo kristalo ilgio. Pvz. kreivės 15 didžiausia neigiama netiesinės fazės vertė $\Delta\Phi_{\text{max2}}^{[-]}$ gaunama ties Δk_2 išderinimu. Kadangi ir didžiausia pasiekama fazės vertė priklauso nuo kristalo ilgio, tai norint ypač didelės netiesinės fazės vertės, gali tekti pasirinkti kuo ilgesnį kristalą arba kelis kristalus. Antra vertus, jei kristalo ilgis yra pakankamas, tereikia surasti optimalų išderinimą, pvz., temperatūrą arba kampą. Jei maksimalios netiesinės fazės nereikia, tai tokių išderinimo pozicijų yra dvi ir geriau rinktis tą, kur išderinimas nuo sinchronizmo yra didesnis, kad konversija į antrąją harmoniką būtų mažesnė. Tolstant nuo fazinio sinchronizmo, nuostoliai dėl AH generacijos mažėja. Verta paminėti, kad, jei kristalo kvadratinis netiesiškumas d_{eff} yra didelis (pvz. BBO,

LBO, BIBO, CLBO ir kt.), reikiama netiesinės fazės vertė $\Delta\Phi_{\text{opt}}$ gali būti gaunama ir L , ir $1,5L$, ir $2L$, ir nL kristalo ilgiu. Pasirinkus trumpesnę kristalą, fazės vertės jautrumas išderinimui bus mažesnis.

Siūloma derinimo metodika nr.1 (žr. 2 pav.):

(1) Sustatyti elementus 9a, 2, 10a, 3, 10b, 9b, 4a, 4b, 5 ir 6 be stiprinimo. Veidrodį 6 išimti.

(2) Sumažinti įėjimo signalą iki minimalaus detektuojamo lygio, kad sustiprintas signalas būtų kuo silpnesnis, derinant sistemą.

(3) Už elemento 5 matuoti antros harmonikos spinduliuotės energiją ir fundamentinės spinduliuotės spektro plotį.

(4) Suderinti AHG kristalą 4a taip, kad būtų pasiekiamas AH generacijos maksimumas. Įsidėmėti kristalo 4a suderinimo poziciją (kampą ir (ar) temperatūrą) – tai fazinio sinchronizmo pozicija. Jei antros harmonikos generacija nevyksta, padidinti signalą ir kartoti (4) žingsnį.

(5) Kristalą 4a nedaug išderinti iš sinchronizmo pozicijos. Stebėti, į kurią pusę išderinus iš sinchronizmo pozicijos, fundamentinės spinduliuotės spektras plėtėja, o kurią – siaurėja.

(6) Jei spektro plėtimosi/siaurėjimo pastebėti nepavyksta, tai reiškia, kad signalo lygis yra per žemas ir teigiama medžiaginė visų sistemos elementų netiesinė fazė maža ir nėra ką kompensuoti. Šiek tiek padidinti įėjimo signalo lygį ir kartoti žingsnius nuo (5).

(7) Kristalo 4a išderinimo kryptis, kurioje spinduliuotės spektras plėtėja, atitinka teigiamą $\Delta\Phi^{\text{eff} [+]}$ sritį. Kristalo 4a išderinimo kryptis, kurioje spinduliuotės spektras siaurėja, atitinka neigiamą $\Delta\Phi^{\text{eff} [-]}$ sritį. Kompensavimas atliekamas AHG kristalą 4a išderinant iš sinchronizmo į neigiamos fazės sritį.

(8) Sugrįžti į fazinio sinchronizmo poziciją.

(9) Padidinti įėjimo signalo lygį. Derinant kristalo 4a sinchronizmą neigiamos netiesinės fazės kryptimi, stebėti, kaip siaurėja fundamentinės spinduliuotės spektras. Kai pasiekiamas toks išderinimas (išderinimo Δk vertė), ties kuriuo spektras siauriausias, o toliau derinant spektras vėl pradeda plėtimosi, randame $\Delta\Phi_{\text{opt}}$ (žr.4 pav.) tam signalo lygiui. Kartoti (9) žingsnį didinant signalo lygį iki numatyto stiprinimo lygio.

Įsidėmėti kristalo 4a suderinimo poziciją (toliau bus vadinama optimaliu išderinimu) ties numatytu pirmo lėkio stiprinimo lygiu, kur $\Delta\Phi_{\text{opt}}$ pirmam lėkiui yra optimalus.

(10) Sumažinti įėjimo signalo lygį.

(11) Gražinti veidrodį 6, antros harmonikos spinduliuotės energijos matuoklį ir spektrometrą 12 perkelti išėjimo spinduliuotės 7 kelyje matavimui (atspindyje nuo pluošto daliklio 11).

(12) Antrąjį AHG kristalą 4b derinti tol, kol gaunama didžiausia AH energija. Įsidėmėti kristalo 4b suderinimo poziciją (kampą ir (ar) temperatūrą) – tai fazinio sinchronizmo pozicija antrajam kristalui 4b.

(13) Kristalą 4b nedaug išderinti iš sinchronizmo pozicijos. Stebėti, į kurią pusę išderinus iš sinchronizmo pozicijos, fundamentinės spinduliuotės spektras plėtėja, o kurią – siaurėja. Įsidėmėti kristalo 4b išderinimo kryptį, kurioje spinduliuotės spektras siaurėja.

(14) Sugrįžti į fazinio sinchronizmo poziciją.

(15) Padidinti įėjimo signalo lygį. Derinant kristalą 4b spektro siaurėjimo kryptimi, stebėti spektro pločio pokyčius.

(16) Analogiškai, kaip (9) žingsnyje buvo ieškomas optimalus suderinimas pirmajam kristalui 4a, rasti optimalų išderinimą antrajam kristalui 4b. Kol stiprinamo signalo lygis yra žemesnis už numatytąjį, pirmasis kristalas 4a įneša ne optimalią kompensuojančią neigiamą fazę, tad ir antrojo kristalo 4b optimalios pozicijos neįmanoma surasti. Tačiau nedideliais žingsneliais didinant signalo lygį, galima surasti apytikslį kristalo 4b išderinimo diapazoną.

(17) Padidinus įėjimo signalą iki numatytojo lygio (kad būtų gaunama numatytoji stiprintuvo išėjimo energija), surandama galutinė antrojo kristalo 4b išderinimo pozicija, kai spinduliuotės spektras yra siauriausias. Taip suderinamas $\Delta\Phi_{\text{opt}}$ antram lėkiui ir visai stiprinimo grandinei.

Siūloma derinimo metodika nr.2 (žr. 2 pav.):

(1) Sustatyti elementus 9a, 2, 10a, 3, 10b, 9b, 5.

(2) Įjungti aktyviosios terpės 3 kaupinimą. Už elemento 5 matuoti spinduliuotės spektro plotį. Įsidėmėti spektro pločio vertę $\Delta\lambda_{\text{min}}$, esant žemam kaupinimo lygiui.

(3) Įterpti AHG kristalus 4a, 4b.

(4) Įjungti tokį aktyviosios terpės 3 kaupinimo lygį, ties kuriuo kristale 4a pradeda vykti antros harmonikos generacija.

(5) Suderinti AHG kristalą 4a taip, kad būtų pasiekiamas AH generacijos maksimumas. Įsidėmėti kristalo 4a suderinimo poziciją (kampą ir (ar) temperatūrą) – tai fazinio sinchronizmo pozicija.

(6) Jei fundamentinės spinduliuotės spektras nėra platesnis nei $\Delta\lambda_{\min}$, tai reiškia, kad kaupinimo lygis yra per žemas ir teigiama medžiaginė visų sistemos elementų netiesinė fazė dar nepasireiškė. Reikia padidinti kaupinimą iki tokio lygio, kad spinduliuotės spektras taptų platesnis nei $\Delta\lambda_{\min}$.

(7) Kristalą 4a nedaug išderinti iš sinchronizmo pozicijos. Stebėti, į kurią pusę išderinus iš sinchronizmo pozicijos, fundamentinės spinduliuotės spektras plėtėja, o kurią – siaurėja. Įsidėmėti kristalo 4a išderinimo kryptį, kurioje spinduliuotės spektras siaurėja.

(8) Kristalo 4a išderinimo kryptis, kurioje spinduliuotės spektras plėtėja, atitinka teigiamą $\Delta\Phi^{\text{eff} [+]}$ sritį. Kristalo 4a išderinimo kryptis, kurioje spinduliuotės spektras siaurėja, atitinka neigiamą $\Delta\Phi^{\text{eff} [-]}$ sritį. Kompensavimas atliekamas AHG kristalą 4a išderinant iš sinchronizmo į neigiamos fazės sritį.

(9) Sugrįžti į fazinio sinchronizmo poziciją.

(10) Padidinti kaupinimo lygį. Derinant kristalą 4b spektro siaurėjimo kryptimi, matuoti spektro plotį. Kai surandamas toks išsukimo kampas (išderinimo Δk vertė), ties kuriuo spektras tampa tokio paties pločio kaip $\Delta\lambda_{\min}$ arba yra tam tikras spektro pločio minimumas, po kurio toliau išderinant kristalą spektras vėl pradeda plėtimuisi, tai yra $\Delta\Phi_{\text{opt}}$ (žr. 4 pav.). Kartoti (10) žingsnį didinant kaupinimą iki numatyto kaupinimo lygio. Įsidėmėti kristalo 4a suderinimo poziciją (toliau bus vadinama optimaliu išderinimu) ties numatytu pirmo lėkio stiprinimo lygiu, su kuriuo gauta $\Delta\Phi_{\text{opt}}$ pirmam lėkiui.

(11) Analogiškai surasti $\Delta\Phi_{\text{opt}}$ antrajame kristale 4b antram lėkiui.

Sistemos ilgalaikė eksploatacija yra jautri stiprinamos spinduliuotės pluošto kryptčiai. Krypties užtikrinimui galima įvesti automatizuotą krypties stebėjimo ir atstatymo sistemą. Pavyzdžiui, sudarytą iš dviejų kvadratinių fotodetektorių ir motorizuotų justiravimo mazgų, bei procesoriaus, kuris pagal tam tikrą algoritmą per

motorizuotus justiravimo mazgus užtikrina stiprinamo pluošto krypties stabilumą.

Pavyzdys. Toliau bus pateikiami modeliavimo rezultatai, siekiant nustatyti, kokių parametrų AHG kristalų reikia sistemos išpildyme pagal 2 pav., kad pikosekundinė spinduliuotė būtų sustiprinta iki ~ 1 J energijos. Greta pagrindinio tikslo – sustiprinti spinduliuotę, siekiama užtikrinti aukštą erdvinę bei laikinę kokybę. Tik užtikrinant aukštą erdvinę bei laikinę kokybę, galime išvengti pluošto erdvinių iškreipimų, elementų pažeidimo bei turėti aukštą stiprinimo efektyvumą, kuris leis pasiekti 1 J energiją. Užsibrėžiame, kad per vieną lėkį AHG kristaluose 4a, 4b teigiama netiesinė fazė (*B-integralas*) dėl medžiaginio n_2 nevirsytų 2 rad. Parametrai:

- į lazerinę sistemą krentančios 1064 nm bangos ilgio lazerinės spinduliuotės 1 pluoštas pasižymi plokščios viršūnės intensyvumo skirstiniu; impulsų trukmė lygi 20 ps;

- Nd:YAG aktyviosios terpės 3 ilgis 130 mm;

- per aktyviają terpę sklinda apskritiminės poliarizacijos spinduliuotė.

Rezultatas: vaizdo pernešimo teleskopu 9a aktyviojoje terpėje 3 suformuojant 19,6 mm diametro pluošto sąsmauką, ir į aktyviają terpę 3 paduodant ~ 120 mJ energijos pikosekundinį impulsą, pasiekiami 1 J energija stiprintuvo išėjime, tenkinant užsibrėžtas sąlygas. Bendri dviejų lėkių per visus sistemos elementus nuostoliai lygūs maždaug 15 % (įskaitant 3 %–5 % nuostolius dėl AH generacijos kristaluose 4a, 4b). Per vieną lėkį aktyviojoje terpėje 3 impulsas yra sustiprinamas iki ~ 500 mJ. Didžiausias galios tankis aktyviojoje terpėje pirmojo lėkio metu yra lygus $9,7 \text{ GW/cm}^2$. Teleskopu 9b pluoštas yra pernešamas į I-tipo BBO antros harmonikos kristalą 4a. BBO kristaluose AHG sinchronizmas derinamas keičiant krintančios į kristalą spinduliuotės kampą (pasukant kristalą lazerinio pluošto atžvilgiu). Teleskopu 9b atliekamas pluošto diametro mažinimas iki ~ 11 mm. BBO kristalų medžiaginė teigiama netiesinė fazė neviršija 2 rad, kai AHG kristalų 4a, 4b ilgis – 8,9 mm. Didelis galios tankis ($\sim 40 \text{ GW/cm}^2$) užtikrina, kad AHG kristaluose 4a, 4b efektyviai vyks kaskadiniai netiesiniai reiškiniai. Tam kad kompensuotume suminę sistemos pirmo lėkio teigiamą netiesinę fazę su 8,9 mm kristalu, pirmąjį BBO kristalą 4a reikia išsukti $0,4$ laipsnio kampą iš fazinio sinchronizmo (išderinimas BBO kristale $\Delta k = 13,6 \text{ mm}^{-1}$). Galios tankis aktyviojoje terpėje 3 antrojo lėkio pabaigoje – $22,7 \text{ GW/cm}^2$. Susumavus visų sistemos elementų teigiamą netiesinę fazę (ir pačių AHG kristalų), iš viso reikia kompensuoti

17,8 rad. Jei antro lėkio netiesinei fazei neužtenka antrojo kristalo 4b neigiamos netiesinės fazės, pilną kompensaciją galima pasiekti abiem kristalais. Pastaba: papildomi sistemos elementai tokie, kaip fazinės plokštelės 10a, 10b, 13a, 13b, lęšiai teleskopuose 9a, 9b, vakuuminių kiuvečių (jei tokios naudojamos) langeliai taip pat įneša maždaug 0,1–0,3 rad teigiamo *B-integralo* indėlį per vieną lėkį, kurie gali būtų sukompensuoti papildomai paderinant pirmąjį AHG kristalą 4a. Kompensacijos kokybė įvertinama stebint spektro plotį po dviejų lėkių sistemos išėjime. Toleruotinas iki π rad likutinis sukauptos netiesinės fazės dydis. Po stiprinimo, įskaičius visus sistemos nuostolius, gaunami maždaug 1 J energijos pikosekundiniai impulsai.

Taip pat yra galimi ir kiti šio išradimo išpildymo variantai, pavaizduoti 5, 6 ir 7 pav., kuriuose yra panaudojama II-tipo antros harmonikos generacija. II-tipo AHG kristale 4d taip pat gali vykti kaskadiniai reiškiniai.

5 pav. schemoje II-tipo AHG kristalu sklinda tiesinė H poliarizacijos spinduliuotė. Kadangi kristalas 4d yra pasuktas kampu β apie pluošto sklidimo kryptį z, H poliarizacija suskyla į o ir e dedamąsias kristalo nuosavų ašių atžvilgiu. Priklausomai nuo kristalo posūkio kampo β , gaunamas skirtingas o ir e poliarizacijos dedamųjų amplitudžių santykis. Kaip jau minėta, esant nevienodoms dedamųjų amplitudėms, net ir neišderinus iš fazinio sinchronizmo, II-tipo sąveikoje vyksta kaskadiniai netiesiniai reiškiniai, sukeliantys efektingą lūžio rodiklį. Netiesinės fazės dydis kinta šuoliškai per π sulig kiekviena atgaline konversija. Kiek kaskadinių reiškinų spėja įvykti kristalo ilgyje, priklauso nuo amplitudžių santykio. Išderinus iš fazinio sinchronizmo, atsiranda galimybė švelniai paderinti neigiamos netiesinės fazės dydį, tačiau dideliame netiesinės fazės kiekiui sukaupti prireiks ilgo kristalo.

6 pav. schemoje panaudojami du AHG kristalai: 4a – išpjautas I-tipo sąveikai, 4d – II-tipo sąveikai. II-tipo kristalas 4d nėra išderinamas iš fazinio sinchronizmo ir jame atliekamas kompensuojančios neigiamos fazės kaupimas dideliais žingsniais – per π , o I-tipo kristalas 4a yra išderinamas (pavyzdžiui, išsukamas kampu) iš fazinio sinchronizmo H poliarizacijai ir jame atliekamas kompensuojančios neigiamos fazės nedidelio kiekio pridėjimas, kad tiksliai sukompensuotume sistemos teigiamą netiesinę fazę.

7 pav. schemoje II-tipo AHG kristalu 4d sklinda apskritiminės poliarizacijos fundamentinė spinduliuotė, kuri gaunama, kai optinėje grandinėje yra tik viena fazinė plokštelė 10a, tačiau nėra fazinių plokštelių 10b ir 5. Ketvirčio bangos ilgio fazinė

plokštelė 10a tiesinės H poliarizacijos spinduliuotę paverčia apskritimine. Apskritiminės poliarizacijos spinduliuotė, sklisdama aktyviaja terpe 3 sukaupia mažesnę netiesinę fazę, nei sukaupytų tiesinės poliarizacijos spinduliuotė. Kadangi už aktyviosios terpės 3 antros fazinės plokštelės nėra, tai ir kitais sistemos elementais sklinda apskritiminės poliarizacijos spinduliuotė. Antros harmonikos generacija AHG kristale 4d vyksta iš o ir e poliarizacijos dedamųjų kristalo nuosavų ašių sistemoje. Užtenka vieno AHG kristalo 4d, kuris veikia kaip netiesinės fazės kompensatorius, ir lėkyje pirmyn, ir lėkyje atgal. Po atspindžio nuo veidrodžio poliarizacijos sukimosi kryptis apsiverčia, tačiau vis tiek išlieka dvi statmenos poliarizacijos dedamosios, tarp kurių vyksta kaskadiniai netiesiniai reiškiniai. Greta kaskadinių reiškinių kurie pasireiškia, nes o ir e poliarizacijos dedamųjų amplitudžių santykis kinta, yra galimybė švelniai išderinti iš fazinio sinchronizmo, keičiant kristalo kampą ar temperatūrą.

Siekiant išvengti nepageidaujamo poveikio poliarizacijai dėl tiesinės fazės poslinkio tarp o ir e poliarizacijos dedamųjų II-tipo kristale (dėl skirtingų tiesinių lūžio rodiklių), galima parinkti tokį kristalo 4d ilgį, kad tiesinės fazės poslinkis kristalo gale būtų kartotinis skaičiui π , pageidautina, kad būtų kartotinis skaičiui 2π .

Šio išradimo uždaviniams spręsti tarp galimų AHG kristalų pasirinkimų yra kvadratinio netiesiškumo kristalai, kurių pažeidimo slenkstis ultratrumpųjų impulsų spinduliuotei viršija 20 GW/cm^2 . Tai gali būti BBO, LBO, BIBO, CLBO ar kiti antros harmonikos kristalai, pasižyminti aukštu pažeidimo slenksčiu ir dideliu efektyviu kvadratinio netiesiškumo koeficientu.

Taip pat yra galimi ir kiti šio išradimo išpildymo variantai, neaprašyti detaliame brėžinių aprašyme, tačiau išmąstomi šios srities specialistams. Išradimo visa teisinė apsaugos apimtis yra išdėstyta apibrėžties punktuose.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Didelio intensyvumo efektyvi lazerinė sistema, apimanti optinių elementų grandinę, kurioje išdėstyta kvantinis lazerinis spinduliuotės stiprintuvas, turintis savyje bent vieną stiprinimo elementą (3, 3a, 3b) ir bent vienas netiesinės fazės kompensavimo elementas (4a, 4b, 4c, 4d), kur

- minėto bent vieno stiprinimo elemento (3, 3a, 3b) netiesinis lūžio rodiklis n_2 yra teigiamo ženklo, o minėto bent vieno netiesinės fazės kompensavimo elemento (4a, 4b, 4c, 4d) netiesinis lūžio rodiklis n_2 yra neigiamo ženklo, kur

- minėtas bent vienas netiesinės fazės kompensavimo elementas (4a, 4b, 4c, 4d) yra kvadratinio netiesiškumo optinis elementas, kuriame vyksta kaskadiniai netiesiniai reiškiniai, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad

- minėtas bent vienas stiprinimo elementas (3, 3a, 3b) yra sukonfigūruotas ir yra kaupinamas taip, kad įėjimo spinduliuotė (1) sustiprinama, gaunant ne mažesnę kaip 200 mJ išėjimo spinduliuotės (7) impulsų energiją,

- minėtas bent vienas netiesinės fazės kompensavimo elementas (4a, 4b, 4c, 4d) yra sukonfigūruotas taip, kad bendras minėtame bent viename netiesinės fazės kompensavimo elemente gaunamas neigiamos netiesinės fazės absoliutinis dydis yra nuo π iki 6π radianų,

- išėjimo spinduliuotės (7) likutinis netiesinės fazės dydis, išreikštas *B-integralo* verte, neviršija π radianų, o minėtų išėjimo spinduliuotės (7) ir įėjimo spinduliuotės (1) spektro pločių santykis neviršija 3.

2. Lazerinė sistema pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad įėjimo į lazerinę sistemą spinduliuotės (1) ir išėjimo iš lazerinės sistemos spinduliuotės (7) impulsų trukmė yra intervale nuo 5 ps iki 100 ps.

3. Lazerinė sistema pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad bent viename iš optinių elementų, sudarančių lazerinę sistemą, spinduliuotės intensyvumas viršija 20 GW/cm² vertę.

4. Lazerinė sistema pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad minėtas bent vienas stiprinimo elementas (3, 3a, 3b) yra dvi izotropinės aktyviosios terpės (3a, 3b),

- lazerinės sistemos optiniai elementai į optinę grandinę sujungti taip, kad lazerinė spinduliuotė per minėtas dvi izotropines aktyvias terpes (3a, 3b) bei minėtą bent vieną netiesinės fazės kompensavimo elementą (4a, 4b, 4c, 4d) sklįstų po vieną kartą,

- kiekvienos iš minėtų dviejų izotropinių aktyviųjų terpių (3a, 3b) stiprinimo faktorius yra nuo 1 iki 10 kartų, ir kiekvienoje iš jų užpildos apgražos panaudojimo efektyvumas yra ne mažesnis kaip 15 %.

5. Lazerinė sistema pagal 1–3 punktus, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad minėtas bent vienas stiprinimo elementas (3, 3a, 3b) yra viena izotropinė aktyvioji terpė (3),

- lazerinės sistemos optiniai elementai į optinę grandinę sujungti taip, kad lazerinė spinduliuotė per minėtą vieną izotropinę aktyviąją terpę (3) bei minėtą bent vieną netiesinės fazės kompensavimo elementą (4a, 4b, 4c, 4d) sklįstų po du kartus,

- minėtos vienos izotropinės aktyviosios terpės (3) stiprinimo faktorius yra nuo 1 iki 10 kartų kiekviename spinduliuotės per ją lėkyje, o bendras per du spinduliuotės lėkius pasiekiamas užpildos apgražos panaudojimo efektyvumas yra ne mažesnis kaip 30 %.

6. Lazerinė sistema pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad per minėtą bent vieną stiprinimo elementą (3, 3a, 3b) sklindanti spinduliuotė yra tiesinės poliarizacijos lazerinė spinduliuotė.

7. Lazerinė sistema pagal bet kurį iš 1–5 punktų, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad per minėtą bent vieną stiprinimo elementą (3, 3a, 3b) sklindanti spinduliuotė yra apskritiminės poliarizacijos lazerinė spinduliuotė.

8. Lazerinė sistema pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad

- per minėtą bent vieną netiesinės fazės kompensavimo elementą (4a, 4b, 4c, 4d) sklindanti spinduliuotė yra tiesinės poliarizacijos lazerinė spinduliuotė, o
- minėtas bent vienas netiesinės fazės kompensavimo elementas (4a, 4b, 4c, 4d) yra I-tipo antros harmonikos generacijos kristalas (4) arba kristalų seka ((4a, 4b) arba (4a, 4b, 4c)),
- neigiamas netiesinis lūžio rodiklis n_2 yra gaunamas generuojant antrą harmoniką išderinto fazinio sinchronizmo sąlygomis.

9. Lazerinė sistema pagal 8 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad minėtas bent vienas kompensavimo elementas (4a, 4b, 4c, 4d) yra dviejų I-tipo antros harmonikos generacijos kristalų (4a, 4b) seka, kur

- pirmame lėkyje per minėtus du antros harmonikos generacijos kristalus (4a, 4b) sklindanti spinduliuotė yra pirmos tiesinės poliarizacijos būsenos,
- antrame lėkyje per minėtus du antros harmonikos generacijos kristalus (4a, 4b) sklindanti spinduliuotė yra antros tiesinės poliarizacijos būsenos, statmenos pirmai tiesinės poliarizacijos būsenai,
- pirmasis antros harmonikos generacijos kristalas (4a) yra sukonfigūruotas ir įmontuotas optinių elementų grandinėje taip, kad išderinimas iš fazinio sinchronizmo būtų atliekamas išsukant kristalą (4a) iš fazinio sinchronizmo kampo plokštumoje, kuri yra sinchronizmo plokštuma pirmos būsenos tiesinei poliarizacijai, todėl pirmasis kristalas (4a) kompensuoja netiesinės fazės dydį, sukauptą pirmojo lėkio per visus lazerinės sistemos optinius elementus metu;
- antrasis antros harmonikos generacijos kristalas (4b) yra sukonfigūruotas ir įmontuotas optinių elementų grandinėje taip, kad išderinimas iš fazinio sinchronizmo būtų atliekamas išsukant kristalą (4b) iš fazinio sinchronizmo kampo plokštumoje, kuri yra sinchronizmo plokštuma antros būsenos tiesinei poliarizacijai, todėl antrasis kristalas (4b) kompensuoja netiesinės fazės dydį, sukauptą antrojo lėkio per visus lazerinės sistemos optinius elementus metu.

10. Lazerinė sistema pagal 8 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad minėtas bent vienas kompensavimo elementas (4a, 4b, 4c, 4d) yra dviejų I-tipo antros harmonikos generacijos kristalų (4a, 4b) seka, kur pirmasis kristalas (4a) ir antrasis kristalas (4b) yra sukonfigūruoti taip, kad išderinimas iš fazinio sinchronizmo būtų atliekamas keičiant kristalų temperatūrą.

11. Lazerinė sistema pagal bet kurį iš 1–7 punktų, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad

- per minėtą bent vieną netiesinės fazės kompensavimo elementą (4a, 4b, 4c, 4d) sklindanti spinduliuotė yra tiesinės poliarizacijos lazerinė spinduliuotė, o

- minėtas bent vienas netiesinės fazės kompensavimo elementas (4a, 4b, 4c, 4d) yra II-tipo antros harmonikos generacijos kristalas (4d), kurio principinės ašys yra pasuktos kampu β minėtos tiesinės poliarizacijos atžvilgiu, ir

- neigiamas netiesinio lūžio rodiklis n_2 yra gaunamas generuojant antrą harmoniką:

išderinto fazinio sinchronizmo sąlygomis, jei kampas β yra lygus 45 laipsniams, arba

neišderinto arba išderinto fazinio sinchronizmo sąlygomis, jei kampas β nėra lygus 45 laipsniams.

12. Lazerinė sistema pagal bet kurį iš 1–7 punktų b e s i s k i r i a n t i tuo, kad

- per minėtą bent vieną netiesinės fazės kompensavimo elementą (4a, 4b, 4c, 4d) sklindanti spinduliuotė yra tiesinės poliarizacijos lazerinė spinduliuotė, o

- minėtas bent vienas netiesinės fazės kompensavimo elementas (4a, 4b, 4c, 4d) yra I-tipo (4a, 4b, 4c) ir (arba) II-tipo (4d) antros harmonikos generacijos kristalų seka, minėtuose kristaluose realizuojant kaskadinius netiesinius reiškinius ir gaunant neigiamą netiesinę fazę.

13. Lazerinė sistema pagal bet kurį iš 1–7 punktų, b e s i s k i r i a n t i tuo,

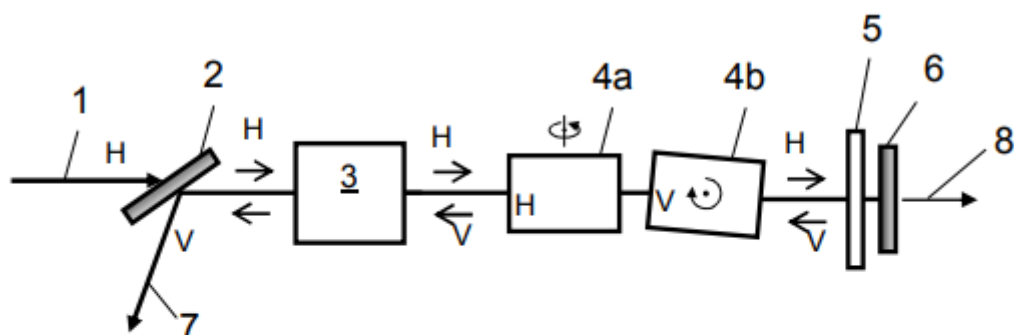
kad

- per minėtą bent vieną netiesinės fazės kompensavimo elementą (4a, 4b, 4c, 4d) sklindanti spinduliuotė yra apskritiminės poliarizacijos lazerinė spinduliuotė, o
- minėtas bent vienas netiesinės fazės kompensavimo elementas (4a, 4b, 4c, 4d) yra II-tipo antros harmonikos generacijos kristalas (4d) arba kristalų seka,
- neigiamas netiesinio lūžio rodiklis n_2 yra gaunamas generuojant antrą harmoniką neišderinto arba išderinto fazinio sinchronizmo sąlygomis.

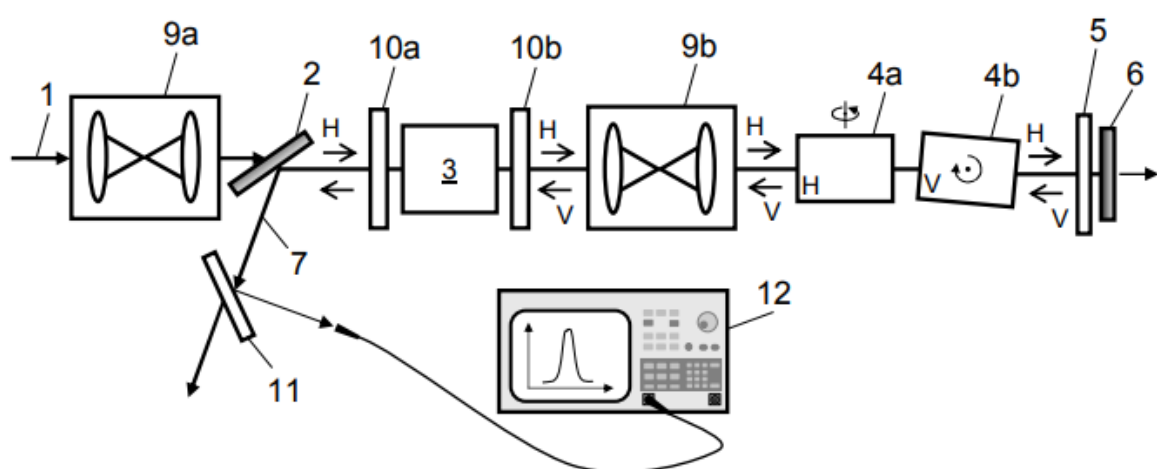
14. Lazerinė sistema pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad antros harmonikos generacijos kristalai (4a, 4b, 4c, 4d) yra parinkti iš šio kristalų sąrašo: BBO, BIBO, LBO arba CLBO.

15. Lazerinė sistema pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad išėjimo spinduliuotės (7) impulsų energija yra ne mažesnė kaip 1 J, o likutinis netiesinės fazės dydis, išreikštas *B-integralo* verte, neviršija 1 radiano.

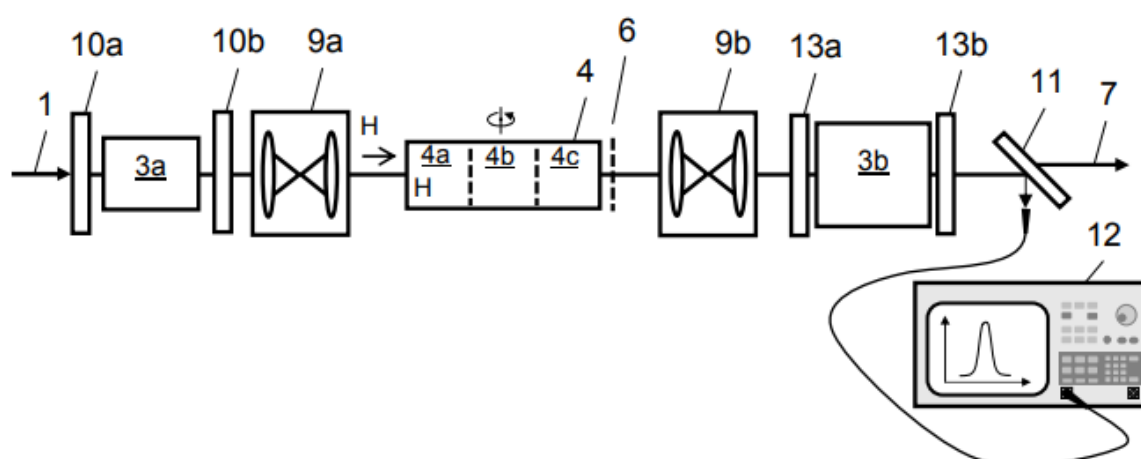
16. Lazerinė sistema pagal bet kurį iš ankstesnių punktų, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad nuostoliai dėl antros harmonikos generacijos minėtame bent viename netiesinės fazės kompensavimo elemente (4a, 4b, 4c, 4d) neviršija 5 %.



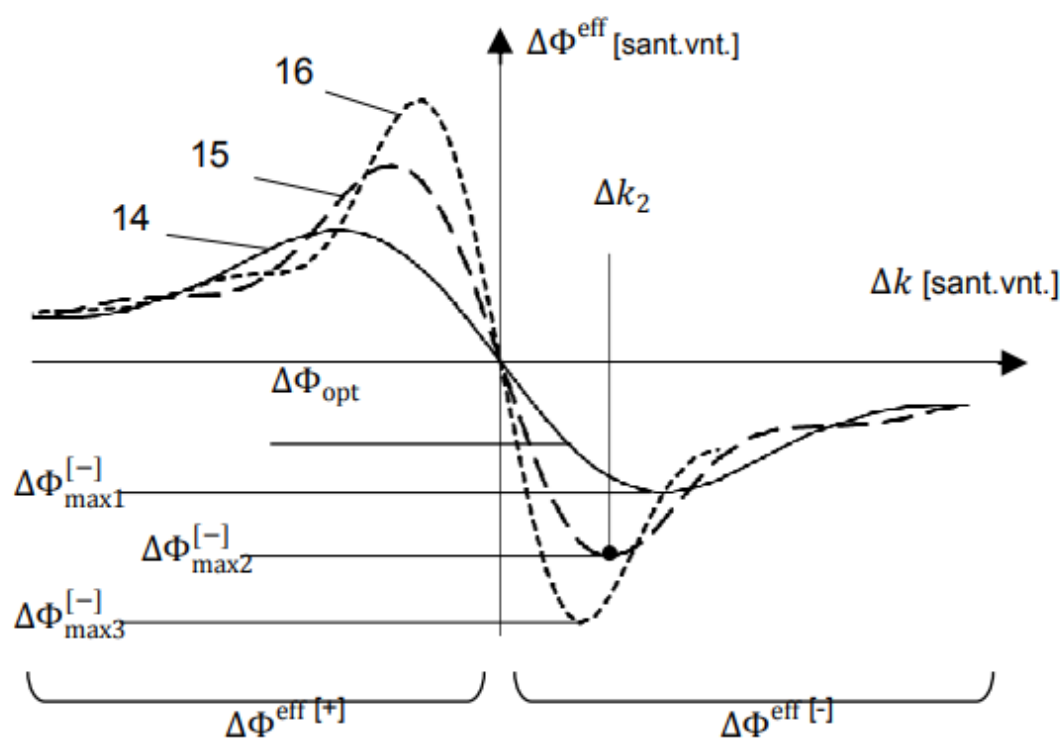
1 pav.



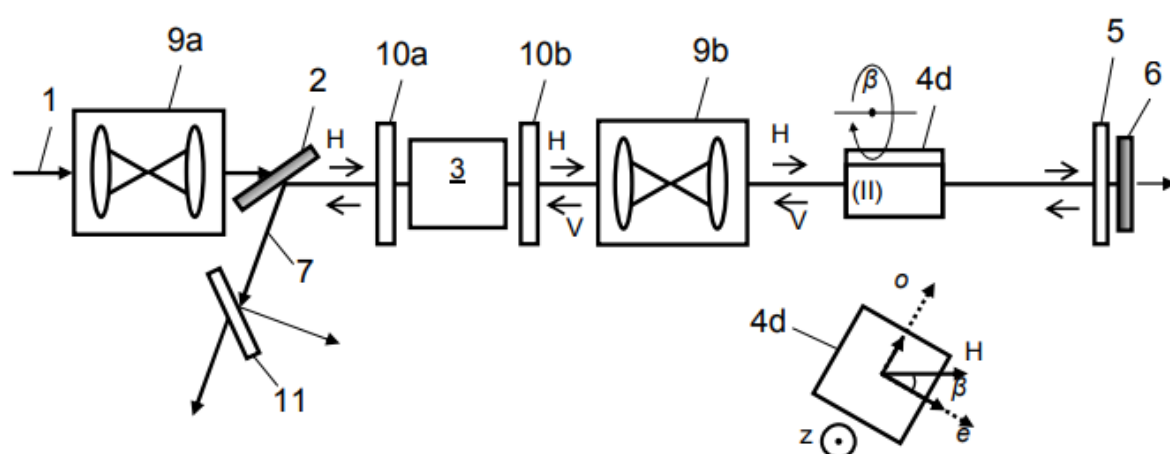
2 pav.



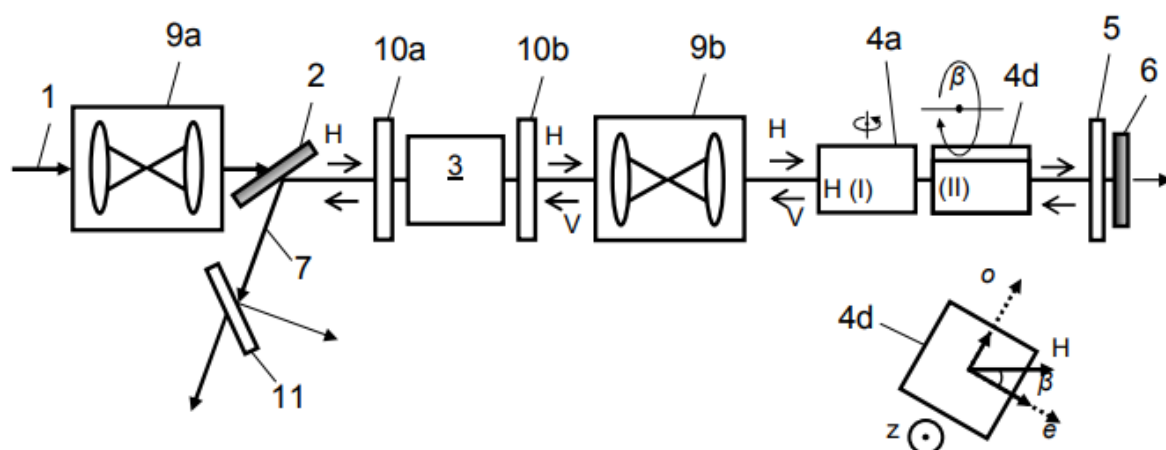
3 pav.



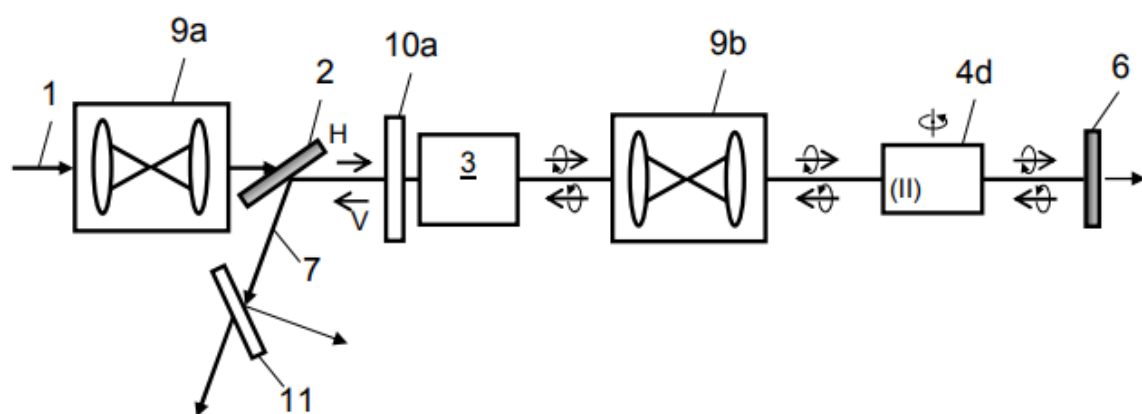
4 pav.



5 pav.



6 pav.



7 pav.