

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRO
FIZIKOS INSTITUTAS

Mikhail Grishin

NUOLATINAI KAUPINAMŲ REGENERACINIŲ LAZERINIŲ
STIPRINTUVŲ DINAMIKA

Daktaro disertacijos santrauka

Fiziniai mokslai, fizika (02 P)

Vilnius, 2011

Disertacija rengta 2006-2010 metais Fizinių ir Technologijos Mokslų centro Fizikos institute

Mokslinis vadovas:

prof. habil. dr. Vidmantas Gulbinas (Fizinių ir Technologijos Mokslų centro Fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02P)

Konsultantas:

dr. Andrejus Michailovas (Fizinių ir Technologijos Mokslų centro Fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02P)

Disertacija ginama Vilniaus universiteto Fizikos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas

doc. dr. Gediminas Trinkūnas (Fizinių ir Technologijos Mokslų centro Fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02P)

Nariai:

prof. habil. dr. Valerijus Smilgevičius (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P)

prof. habil. dr. Valdas Sirutkaitis (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P)

prof. habil. dr. Kęstutis Pyragas (Fizinių ir Technologijos Mokslų centro Puslaidininkų fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02P)

prof. habil. dr. Eugenijus Šatkovskis (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P)

Oponentai:

prof. habil. dr. Valdas Pašiškevičius (Karališkas technologijos institutas, Stokholmas Švedija, fiziniai mokslai, fizika – 02P)

dr. Raimondas Petruškevičius (Fizinių ir Technologijos Mokslų centro Fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02P)

Disertacija bus ginama viešame Fizikos mokslo krypties tarybos posėdyje 2011 m.

birželio mėn. 23 d. 10 val. FTMC Fizikos instituto salėje

Adresas: Savanorių pr. 231, LT-02300, Vilnius, Lietuva

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2011 m. gegužės mėn. 20 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Fizinių ir Technologijos Mokslų centro ir Vilniaus universiteto bibliotekose

VILNIUS UNIVERSITY
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY
INSTITUTE OF PHYSICS

Mikhail Grishin

DYNAMICS OF CONTINUOUSLY PUMPED REGENERATIVE LASER
AMPLIFIERS

Summary of doctoral dissertation

Physical sciences, physics (02 P)

Vilnius, 2011

The dissertation was prepared at Institute of Physics of Center for Physical Sciences and Technology in 2006-2010

Scientific supervisor:

Prof. Dr. Habil. Vidmantas Gulbinas (Institute of Physics of Center for Physical Sciences and Technology, physical sciences, physics – 02P)

Scientific advisor:

Dr. Andrejus Michailovas (Institute of Physics of Center for Physical Sciences and Technology, physical sciences, physics – 02P)

Doctoral dissertation will be defended at the Physical Science Council of Vilnius University:

Chairman

Assoc. Prof. Dr. Gediminas Trinkūnas (Institute of Physics of Center for Physical Sciences and Technology, physical sciences, physics – 02P)

Members:

Prof. Dr. Habil. Valerijus Smilgevičius (Vilnius University, physical sciences, physics – 02P)

Prof. Dr. Habil. Valdas Sirutkaitis (Vilnius University, physical sciences, physics – 02P)

Prof. Dr. Habil. Kęstutis Pyragas (Semiconductor Physics Institute of Center for Physical Sciences and Technology, physical sciences, physics – 02P)

Prof. Dr. Habil. Eugenijus Šatkovskis (Vilnius Gediminas Technical University, physical sciences, physics – 02P)

Official opponents:

Prof. Dr. Habil. Valdas Pašiškevičius (Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, physical sciences, physics – 02P)

Dr. Raimondas Petruškevičius (Institute of Physics of Center for Physical Sciences and Technology, physical sciences, physics – 02P)

The doctoral dissertation will be presented at the public meeting of the Physical Science Council

on 23 of June in 2011 at 10 a.m. in the hall of Institute of Physics of Center for Physical Sciences and Technology,

Savanoriu ave. 231, LT-02300, Vilnius, Lithuania

The summary of the dissertation was sent out on 20 of May in 2011.

The dissertation is available at libraries of Center for Physical Sciences and Technology and Vilnius University.

Ivadas

Kietojo kūno rubino lazeris, pirmą kartą pademonstruotas Teodoro H. Maimano (orig. – Theodore H. Maiman), pradėjo lazerių erą. Per penkis dešimtmečius kietojo kūno lazerių darbinės charakteristikos žymiai pagerėjo. Šiuo metu kietojo kūno lazeriai ne tik išlieka viena iš sparčiausiai besivystančių lazerių mokslo šakų, bet ir tampa vis svarbesniu įrankiu šiuolaikinėje pramonėje. Pastaraisiais metais didžiausias progresas vyksta kietojo kūno lazerio technologija grįstose ultratrumpųjų impulsų lazerių sistemose. Pikosekundiniai ir femtosekundiniai didelės galios lazeriai vis labiau įsitvirtina mikrodarinių gamybos ir medžiagų apdirbimo srityse, tokiose kaip saulės elementų ar skystųjų kristalų ekranų gamyba. Stulbinantys pasiekimai femtosekundinių impulsų stiprinimo srityje įgalina kurti koherentinės spinduliuotės šaltinius, generuojančius ypač trumpo bangos ilgio (siekiančio minkštųjų Rentgeno spindulių sritį) ir tuo pačiu metu rekordiškai mažos trukmės (atosekundinius) impulsus. Tai savo ruožtu atveria kelią naujiems moksliniams tyrimams.

Regeneracinis stiprinimas yra svarbi ultratrumpųjų impulsų generavimo technologijos, leidžiančios gauti išskirtinių charakteristikų femtosekundinius impulsus, sudedamoji dalis. Regeneraciniai stiprintuvai yra naudojami abiejuose šiuo metu sparčiai besivystančiuose ultratrumpų impulsų stiprinimo methoduose: tiek tiesioginiame spinduliuotės stiprinime [1, 2], tiek ir parametriniame moduluotos fazės šviesos impulsų stiprinime (angl. Optical Parametric Chirped-Pulse Amplification, OPCPA) [3]. Esminiai šioms sistemoms keliami reikalavimai yra didelis efektyvumas ir impulsų parametrų stabilumas plačiame pasikartojimo dažnių diapazone. Neodiminė ir iterbinė aktyviosios terpės gerai tinka tiesioginiam kaupinimui lazeriniais diodais, ir todėl jomis galima pasiekti didelį galios efektyvumą. Be to, ilga viršutinio lazerinio lygmens gyvavimo trukmė, būdinga abiemis minėtoms medžiagoms, leidžia sukaupti didelę užpildos apgražą net ir esant nuolatiniam kaupinimui. Tačiau ilga užpildos apgražos gyvavimo trukmė gali sukelti stabilumo problemų, kai impulsų pasikartojimo dažnis viršija relaksacijos spartą [4]. Tokių sistemų dinamika priklauso nuo pusiausvyros tarp dviejų procesų: užpildos apgražos nuskurdinimo, vykstant spinduliuotės stiprinimui, bei apgražos atkūrimo,

veikiant kaupinimui. Jei balansas suyra, regeneracinis stiprintuvas kuria periodiškai kintančių energijų impulsus ar netgi impulsų sekas su chaotiniu energijų pasiskirstymu. Norint išnaudoti regeneracinio stiprinimo privalumus ir optimaliomis priemonėmis išvengti trūkumų, susijusių su impulsų energijos nestabilumu svarbu suprasti šio reiškinių priežastis. Todėl buvo pasirinkti tokie šio tiriamojo **darbo tikslai**:

- išsamiai išanalizuoti bendrus dinamikos dėsningumus nuolatinio kaupinimo regeneraciniams stiprintuvams su ilgos relaksacijos trukmės lazerine terpe;
- surasti būdą, kaip pagerinti nestabilumą paveiktas darbinės stiprintuvo charakteristikas.

Bendras uždavinys susideda iš kelių **užduočių**, kurias galima suformuluoti taip:

- Tinkamo modelio su sumažintu kintamųjų skaičiumi sukūrimas regeneraciniam stiprinimui aprašyti.
- Pasikartojančio stabilaus režimo analitinis nagrinėjimas.
- Sudėtingos sistemos dinamikos išsami skaitmeninė analizė.
- Galimybių eliminuoti neigiamą nestabilumo efektą paieška.
- Eksperimentinis gautų rezultatų patikrinimas.

Siekiant įvykdyti užsibrėžtas užduotis, pasinaudota tiek teoriniais, tiek ir eksperimentiniais **metodais bei priemonėmis**. Stiprinimo proceso modeliavimas buvo grindžiamas dinamikos lygtimis, suformuluotomis kvazi-trijų lygmenų lazerinei terpei, taikant tam tikras įprastas aproksimacijas. Šis supaprastintas modelis gana gerai apibūdina fundamentinius stiprintuvų elgsenos aspektus, o taip pat padeda nustatyti praktiškai svarbias charakteristikas. Tinkamas dinamikos lygčių formulavimas leido sumažinti didelį sistemos parametrų skaičių iki kelių sudėtinių kintamųjų. Šis patobulinimas kartu su analitinio formulavimo privalumu suformuoja fizikinį suvokimą apie regeneracinio stiprinimo dėsningumus. Vienmačio diskretaus laiko dinaminės sistemos formalizmas, pasirodo, yra išsamus ir patogus įrankis gautų

sprendinių stabilumui analizuoti. Pirminiai teorinio modeliavimo rezultatai buvo pritaikyti konstruojant pikosekundinę Nd:YVO₄ lazerinę sistemą. Vėliau ši lazerinė sistema buvo panaudota kaip eksperimentinė bazė galutinėms, labiau apibendrintoms teorinėms išvadoms patvirtinti.

Mokslinis naujumas

- Gautos analitinės išraiškos, aprašančios optimizuotų regeneracinių stiprintuvų stabilų darbo režimą.
- Nustatytos egzistuojančių dinaminių režimų (stabilaus, kvaziperiodinio ir chaotinio) sritys valdančiųjų parametru erdvėje.
- Sukurtas ir išplėtotas stabilumo diagramų metodas, suformuojantis sisteminių požiūrį į regeneracinio stiprinimo dinamikos optimizavimą.
- Nustatytos ir eksperimentiškai patikrintos darbinės charakteristikos kritiniame pasikartojimo dažnių diapazone, kur neegzistuoja analitiniai sprendiniai ir nestabilumų įtaka yra didžiausia.
- Pasiūlytas nestabilumų slopinimo būdas panaudojant užkrato impulso pastiprinimą, prieš įvedant į regeneracinį stiprintuvą.

Praktinė vertė

Šis darbas ne tik suformuoja bendrą supratimą apie regeneracinio stiprinimo fizikinius aspektus (kas apskritai yra svarbu darbui su regeneraciniais stiprintuvais), bet ir pasiūlo gaires realių įrenginių projektavimui ir gamybai. Tai apima analitinį stabilaus režimo aprašymą ir kruopštų detalizavimą, kokiose valdančiųjų parametru reikšmių ribose galimas stabilus sistemos darbas. Galiausiai, įskaičius visus dinaminius efektus, sudarytos diagramos, iš kurių galima nustatyti tikrąsias darbinės charakteristikas. Užkrato impulso energijos padidinimas, kaip priemonė stabilumo problemoms eliminuoti, ir būdas reikiamai impulso energijai pasiekti buvo užpatentuoti. Be to, pasinaudojant šio tiriamojo darbo rezultatais ir minėto išradimo

idėjomis, UAB „Ekspla“ buvo sukurta pikosekundinė sistema, skirta pramoniniams taikymams.

Ginamieji teiginiai

1. Taikymams svarbiu atveju, kai parenkant rezonatoriaus apėjimų skaičių maksimali vidutinė išėjimo galia yra pasiekama stabilios impulsų sekos režime, pagrindinės regeneracinio stiprintuvo veikimo charakteristikos gali būti išreikštos analitiškai per įprastus valdančiuosius parametrus.
2. Regeneracinio stiprinimo dinamika yra vienareikšmiškai nulemiama valdančiaisiais parametrais. Kvaziperiodinis ir chaotinis režimai yra būdingi vidutiniams apėjimų skaičiams, kai pasikartojimo dažnis yra aukštesnis nei užpildos apgrąžos relaksacijos sparta. Nestabilaus veikimo sritis mažėja, kai užkrato impulsų energija didėja.
3. Kritiniame pasikartojimo dažnių diapazone maksimali stabili išėjimo energija yra pasiekama, kai apėjimų skaičius yra ties stabilumo zonos riba. Dėl to išėjimo galia turi V-formos priklausomybę nuo pasikartojimo dažnio.
4. Užkrato impulso energijos padidėjimas pagerina regeneracinio stiprinimo dinamiką. Priešstiprintuvio panaudojimas užkrato impulso formavimo grandinėje yra veiksmingas būdas pasiekti stabilų ir efektyvų Nd:YVO₄ regeneracinio stiprintuvo veikimą.

Disertacijos sandara

Disertaciją (anglų kalba) sudaro įvadas, autoriaus publikacijų sąrašas, šeši skyriai, išvados ir panaudotos literatūros sąrašas. Disertacija pradedama literatūros apžvalga; sekantys keturi skyriai yra skirti teorinei regeneracinio stiprinimo analizei. Paskutinis skyrius aprašo stiprinimo eksperimentus naudojant Nd:YVO₄ lazerinę sistemą.

1 skyriuje trumpai apžvelgiamos pagrindinės lazerinės technologijos, leidžiančios pasiekti didelį stiprinimo koeficientą, ir pristatytos išskirtinės regeneracinių stiprintuvų, pagrindinai skirtų ultratrumpiems impulsams stiprinti, savybės. Be to, pateikiamos tipinės darbinės charakteristikos sistemoms su populiariausiomis lazerinėmis medžiagomis. Aptariamas regeneracinio stiprinimo reiškinys, įskaitant klausimus, susijusius su sudėtinga dinamine elgsena [4-7].

2 skyriuje pristatomas regeneracinių stiprintuvų veikimo principas. Juo vadovaujantis sudaromas supaprastintas, bet vis dėlto gana realistinis modelis, paremtas dinamikos lygties aproksimacija. Išvedama patogesnė išėjimo energijos išraiška; bedimensinis dydis – energija kaip pradinio ir galutinio stiprinimo koeficientų funkcija – bus plačiai naudojamas kituose skyriuose.

Regeneracinio stiprintuvo veikimas susideda iš dviejų funkciškai skirtingų procesų: užpildos apgražos kaupimo ir paties stiprinimo. Užpildos apgraža auga veikiant kaupinimui, kai rezonatoriaus optiniai nuostoliai yra dideli. Stiprinimo procesas prasideda, kuomet šie nuostoliai sumažinami iki minimalios vertės ir į rezonatorių įvedamas užkrato impulsas. Rezonatoriaus viduje cirkuliuojančio impulso energija auga, tuo tarpu užpildos apgraža mažėja. Impulso energijos augimas tęsiasi tol, kol vieno pilno rezonatoriaus apėjimo nuostoliai yra mažesni už stiprinimą. Kuomet nuostoliai viršija stiprinimą, cirkuliuojančio impulso energija pradeda mažėti. Spinduliuotės išvedimas iš rezonatoriaus gali būti organizuojamas pasyviu būdu, panaudojant dalinai pralaidų išėjimo veidrodį (kiekviename darbiniam periode gaunama kelių impulsų vora), arba aktyvios rezonatoriaus iškrovos būdu (gaunamas

vienintelis impulsas). Rezonatoriaus iškrova paprastai yra tinkamesnė ir dažniau naudojama, todėl šiame darbe ji yra analizuojama detaliau.

Šis mokslinis darbas skirtas ilgos gyvavimo trukmės aktyviosioms terpėms, tokioms kaip neodimio ar iterbio jonais legiruoti kristalai. Esant dideliems impulsų pasikartojimo dažniams (IPD), prasmingas tik nuolatinis kaupinimas, todėl nagrinėjamas tik toks atvejis. Paprastai impulso stiprinimo proceso trukmė yra maža, tokia, kad jos metu tiek kaupinimo, tiek relaksacijos procesai gali būti nepaisomi. Tokiame modelyje kaupinimo ir stiprinimo procesai gali būti atskirti laike. Jie atitinka rezonatoriaus žemos kokybės ir aukštos kokybės būsenas. Sistemos dinaminė raida apibūdinama stiprinimo koeficiento ir vidinės rezonatoriaus spinduliuotės energijos kitimu laike. Teorinė analizė grindžiama dinamikos lygtimis, suformuluotomis idealizuotai kvazi-trijų lygmenų lazerinei terpei su homogeniškai išplitusia emisijos juosta [8].

Siekiant sumažinti didelį sistemos parametrų skaičių iki kelių sudėtinių kintamųjų, lygtys buvo sunormuotos. Kaip normavimo koeficientas pasirinktas G_0 , neįsotintas logaritminis mažo signalo stiprinimo koeficientas vienam lėkiui per aktyvųjį elementą, kuris priklauso nuo kaupinimo intensyvumo. Laiko skalė pakeista įvedus bedimensinę laiko išraišką $\tilde{t} = t\beta G_0/T_{rt}$, kuri gaunama sudauginus rezonatoriaus apėjimų skaičių t/T_{rt} ir neįsotintą stiprinimo koeficientą vienam rezonatoriaus apėjimui βG_0 . Faktorius β rodo lėkių skaičių per lazerinę medžiagą vieno pilno rezonatoriaus apėjimo metu. Tokiu būdu sistemos evoliucija aukštos rezonatoriaus kokybės būsenos metu aprašoma dviem diferencialinėmis lygtimis:

$$\frac{d\varepsilon(\tilde{t})}{d\tilde{t}} = \varepsilon(\tilde{t})[g(\tilde{t}) - g_t], \quad (2.1)$$

$$\frac{dg(\tilde{t})}{d\tilde{t}} = -\varepsilon(\tilde{t})g(\tilde{t}), \quad (2.2)$$

kur pagrindiniai kintamieji yra normuotasis stiprinimo koeficientas $g = G/G_0$ ir normuotoji energija ε . Čia G yra logaritminis vieno lėkio mažo signalo stiprinimo koeficientas, dydis, proporcingas vienetinio ploto užpildos apgražai. Sunormuota

energija $\varepsilon = E/(A_a F_{sat} G_0)$ yra parametras, proporcingas suminės rezonatoriaus fotonų energijos E ir modos ploto aktyviajame elemente A_a santykiui. Soties energijos ištėkis $F_{sat} = \hbar\omega/(\sigma_{em} + \sigma_{abs})$ yra lazerinės medžiagos charakteristika, kuri kvazitrijų lygmenų terpei priklauso nuo efektyviojo spinduliavimo skerspjūvio σ_{em} ir efektyviojo sugerties skerspjūvio σ_{abs} , o keturių lygmenų terpei yra $F_{sat} = \hbar\omega/\sigma_{em}$.

Normuotasis slenkstinis stiprinimo koeficientas g_{th} yra suminių optinių rezonatoriaus nuostolių matas. Suminius rezonatoriaus nuostolius sudaro išėjimo nuostoliai δ_{oc} ir neišvengiami parazitiniai nuostoliai δ_l :

$$g_{th} = \delta_{oc} + \delta_l. \quad (2.3)$$

Juos galima perrašyti išėjimo veidrodžio atspindžio koeficiento R_{oc} ir nuostolių koeficiento l terminais:

$$\delta_{oc} = (\beta G_0)^{-1} \ln(1/R_{oc}) \text{ ir } \delta_l = (\beta G_0)^{-1} \ln[1/(1-l)]. \quad (2.4)$$

Pasinaudojant (2.1) ir (2.2) lygtimis, galima išvesti impulso išėjimo energijos išraišką kaip pradinio (g_i) ir galutinio (g_f) stiprinimo koeficientų funkciją:

$$\varepsilon_{out} = g_i - g_f - \delta_l \ln\left(\frac{g_i}{g_f}\right). \quad (2.5)$$

Toks užrašymas atspindi tvermės taisyklę; stiprinimo intervalo metu suvartota medžiagoje sukauptos energijos dalis ($g_i - g_f$) sukuria dvi dedamąsias: impulso išėjimo energiją ε_{out} ir energiją, išbarstytą rezonatoriaus viduje, $\varepsilon_l = \delta_l \ln(g_i/g_f)$. Taigi išėjimo energija yra vienoda ir rezonatoriaus iškrovos, ir stacionaraus spinduliuotės išvedimo per išėjimo veidrodį atvejais.

3 skyriuje, naudojant stabilaus veikimo prielaidą, analitiškai išreiškiamos optimizuoto regeneracinio stiprintuvo pagrindinės darbinės charakteristikos. Jos pateikiamos kaip bedimensinės funkcijos nuo normuotojo impulsų pasikartojimo dažnio, efektyviojo nuostolių faktoriaus bei sudėtinio koeficiento, susijusio su rezonatoriaus, lazerinės medžiagos ir kaupinimo charakteristikomis.

Išėjimo energija priklauso nuo stiprinimo koeficiento reikšmių stiprinimo intervalo pradžioje ir pabaigoje, [(2.5) lygtis]. Stiprintuvo darbas yra stabilus, kai stiprinimo koeficientai atsikartoja kiekviename periode. Pradinis ir galutinis stiprinimo koeficientai gali būti susieti tarpusavyje pasinaudojant stiprinimo koeficiento augimo per kaupinimo intervalą taisykle:

$$g_i = \tilde{g} + g_f(1 - \tilde{g}), \text{ kur } \tilde{g} = 1 - \exp(-T/T_1). \quad (3.1)$$

Čia T_1 yra sužadintosios būsenos relaksacijos trukmė, todėl $(T/T_1)^{-1}$ reiškia normuotą impulsų pasikartojimo dažnį. Taigi stabilaus veikimo atveju, pertvarkius (3.1) lygtį, išėjimo energija gali būti išreikšta valdančiaisiais sistemos parametrais: impulsų pasikartojimo dažniu ir parazitinių nuostolių dydžiu (jie dalyvauja \tilde{g} ir δ_l nariuose, atitinkamai):

$$\mathcal{E}_{out} = \tilde{g}(1 - g_f) - \delta_l \ln \left(1 + \frac{\tilde{g}}{g_f} - \tilde{g} \right). \quad (3.2)$$

Galutinis stiprinimo koeficientas g_f yra toks parametras, kuris pats priklauso arba nuo išėjimo veidrodžio pralaidumo (δ_{oc} , kalbant normuotomis sąvokomis) arba nuo rezonatoriaus apėjimų skaičiaus τ_{cd} . Vienas iš jų (priklausomai nuo to, koks impulso išvedimo iš rezonatoriaus būdas yra naudojamas), yra laisvės laipsnis sistemos optimizavimui. Optimalus galutinis stiprinimo koeficientas g_f^{opt} su kuriuo gaunama maksimali išėjimo energija, yra (3.2) funkcijos ekstremumo uždavinio, $\partial \mathcal{E}_{out} / \partial g_f = 0$, sprendinys:

$$g_f^{opt} = \frac{\sqrt{\tilde{g}^2 + 4\delta_l(1 - \tilde{g})} - \tilde{g}}{2(1 - \tilde{g})}. \quad (3.3)$$

Optimalaus pradinio stiprinimo koeficiento g_i^{opt} išraiška, išvesta iš (3.1) lygties, yra:

$$g_i^{opt} = \frac{\sqrt{\tilde{g}^2 + 4\delta_l(1 - \tilde{g})} + \tilde{g}}{2}. \quad (3.4)$$

Pertvarkant (2.1, 2.2) dinamines lygtis, pagrindinius regeneracinio stiprintuvo parametrus galima aprašyti pradinio ir galutinio stiprinimo koeficientais. Kadangi

stiprinimo koeficientai, su kuriais pasiekama maksimali išėjimo energija, jau yra nustatyti, galima analitiškai išvesti ir kitus sistemos parametrus bei išėjimo charakteristikas, atitinkančias šį optimalų tašką. Maksimali išėjimo energija:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{out}^{max} = & \frac{\tilde{g} \left[2 - \sqrt{\tilde{g}^2 + 4\delta_l(1-\tilde{g})} + \tilde{g} \right]}{2(1-\tilde{g})} \\ & - \delta_l \ln \left[(1-\tilde{g}) \left(1 + \frac{2\tilde{g}}{\sqrt{\tilde{g}^2 + 4\delta_l(1-\tilde{g})} - \tilde{g}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Energija, išsklaidyta per parazitinius nuostolius:

$$\varepsilon_l^{opt} = \delta_l \ln \left[(1-\tilde{g}) \left(1 + \frac{2\tilde{g}}{\sqrt{\tilde{g}^2 + 4\delta_l(1-\tilde{g})} - \tilde{g}} \right) \right]. \quad (3.6)$$

Regeneraciniuose stiprintuvuose su pasyviu impulso išvedimu galutinis stiprinimo koeficientas yra valdomas parenkant išėjimo veidrodžio pralaidumą. Optimalus (kuriam esant išėjimo energija yra maksimali) išėjimo faktorius:

$$\delta_{oc}^{opt} = \frac{\tilde{g} \left[2 - \sqrt{\tilde{g}^2 + 4\delta_l(1-\tilde{g})} + \tilde{g} \right]}{2(1-\tilde{g}) \ln \left[(1-\tilde{g}) \left(1 + \frac{2\tilde{g}}{\sqrt{\tilde{g}^2 + 4\delta_l(1-\tilde{g})} - \tilde{g}} \right) \right]} - \delta_l, \quad (3.7)$$

o jį atitinkantis veidrodžio atspindžio koeficientas gali būti apskaičiuotas keliant dydį $\exp(-\delta_{oc}^{opt})$ laipsniu βG_0 (3.1 lentelė).

Didžiausia energijos vertė ε_{peak}^{opt} , kurią impulsas pasiekia cirkuliuodamas rezonatoriaus viduje:

$$\varepsilon_{peak}^{opt} = g_i^{opt} - (\delta_{oc}^{opt} + \delta_l) \left[1 + \ln \left(\frac{g_i^{opt}}{\delta_{oc}^{opt} + \delta_l} \right) \right]. \quad (3.8)$$

Tuomet rezonatoriaus išėjime intensyviausio impulso (impulsų voroje) energija lygi $\varepsilon_{peak}^{opt} \delta_{oc}^{opt}$. Impulsų voros gaubtinės trukmė gali būti įvertinta kaip suminės išėjimo energijos ir intensyviausio impulso energijos santykis. Ši trukmė bedimensiniame

pavidale, $\varepsilon_{out}^{\max} / (\varepsilon_{peak}^{opt} \delta_{oc}^{opt})$, apytiksliai lygi impulsų skaičiui pusės maksimalios energijos lygyje.

Stiprintuvams su rezonatoriaus iškrova galutinis stiprinimo koeficientas yra efektyviojo apėjimų skaičiaus (bedimensinė stiprinimo intervalo trukmė) funkcija. Didžiausia išėjimo energija pasiekama, kai parenkama optimali efektyviojo apėjimų skaičiaus vertė, lygi:

$$\tau_{cd}^{opt} \approx 2 \frac{\ln(\tilde{g}/\varepsilon_s)}{\sqrt{\tilde{g}^2 + 4\delta_l(1-\tilde{g}) + \tilde{g} - 2\delta_l}}, \quad (3.9)$$

kur ε_s yra užkrato impulso energija. Dydis τ_{cd}^{opt} nustoja augti, kai IPD yra pakankamai didelis, t.y. normuotasis IPD $(T/T_1)^{-1} > 60$. Tokia optimalios stiprinimo intervalo trukmės sotis leidžia išplėsti regeneracinių stiprintuvų veikimo galimybes iki labai aukštų impulsų pasikartojimo dažnių.

3.1 lentelė. Stiprintuvo parametrų išraiškos

Laser parameter	Expression
Impulso energija	$\varepsilon \times G_0 F_{sat} A_a$
Vidutinė galia	$\varepsilon \left(\frac{T}{T_1} \right)^{-1} \times \frac{G_0 F_{sat} A_a}{T_1}$
Stiprinimo intervalo laikiniai parametrai	$\tau \times \frac{T_{rt}}{\beta G_0}$
Stipriausio voros impulso energija	$\varepsilon_{peak} \delta_{oc} \times G_0 F_{sat} A_a$
Impulsų skaičius voroje pusės maksimumo lygyje	$\frac{\varepsilon_{out}}{\varepsilon_{peak} \delta_{oc}}$
Impulsų voros gaubtinės trukmė pusės maksimumo lygyje	$\frac{\varepsilon_{out}}{\varepsilon_{peak} \delta_{oc}} \times \frac{T_{rt}}{\beta G_0}$
Išėjimo veidrodžio atspindžio koeficientas	$[\exp(-\delta_{oc})]^{\beta G_0}$

Ultratrumpųjų impulsų stiprinimo procesui įtaką daro netiesiniai impulso iškraipymai, sukelti optinio Kerr'o efekto, kurio matas yra B -integralas [9].

Regeneracinio stiprintuvo B -integralas, suintegruotas per daugelį rezonatoriaus apėjimų, gali būti užrašytas taip: $B = B_1 \ln(g_i/g_f)$, kur B_1 yra vieno rezonatoriaus apėjimo B -integralas, apskaičiuotas Gauso pavidalo pluoštui, kai impulso energijos įtėkis lygus naudojamos lazerinės medžiagos soties įtėkio vertei. Narys $\ln(g_i/g_f)$ yra daugiklis, įskaitantis daugelio lėkių įtaką, kuris optimizuoto regeneracinio stiprintuvo atveju lygus:

$$\ln\left(\frac{g_i^{opt}}{g_f^{opt}}\right) = \ln\left[(1 - \tilde{g})\left(1 + \frac{2\tilde{g}}{\sqrt{\tilde{g}^2 + 4\delta_l(1 - \tilde{g}) - \tilde{g}}}\right)\right]. \quad (3.10)$$

Dimensinės aptartų parametų reikšmės gali būti apskaičiuotos pagal formules, surašytas 3.1 lentelėje.

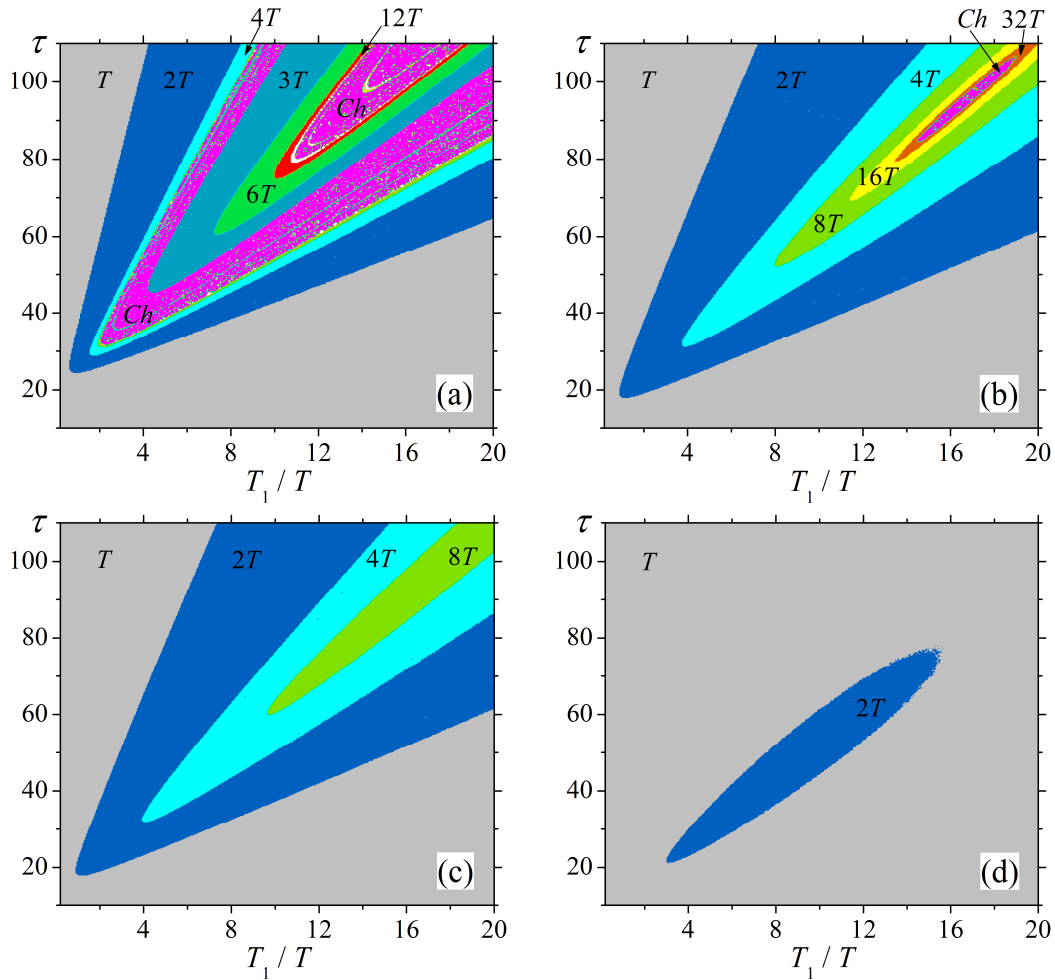
4 skyriuje pateikiama teorinė sudėtingos regeneracinių stiprintuvų dinamikos analizė. Nagrinėjamos stabilaus režimo pažeidimo priežastys ir įvertinamos pasekmės. Valdančiųjų parametų erdvėje išskirtos zonos, atitinkančios stabilų, kvaziperiodinį ir chaotinį režimus. Aptariama rezonatorinių nuostolių ir užkrato impulso energijos įtaka stiprinimo proceso stabilumui. Parodoma, kad esant dideliems impulsų pasikartojimo dažniams, užkrato energija yra svarbus parametras, nulemiantis stabilumo sritį.

Stabilus darbo režimas reiškia, kad impulso stiprinimo intervale sumažėjęs stiprinimo koeficientas yra tiksliai atstatomas kaupinimo intervale. Tokiu atveju pradinis stiprinimo koeficientas atsikartoja kiekviename darbo periode. Pažymėkime $g_i(k)$ stiprinimo koeficientu k -tojo ciklo pradžioje. Impulso stiprinimo proceso dėka stiprinimo koeficientas mažėja ir tampa $g_f(k)$ ciklo pabaigoje. Taisyklė, kaip $g_i(k)$ transformuojasi į $g_f(k)$ surandama iš šios efektyviojo apėjimų skaičiaus išraiškos:

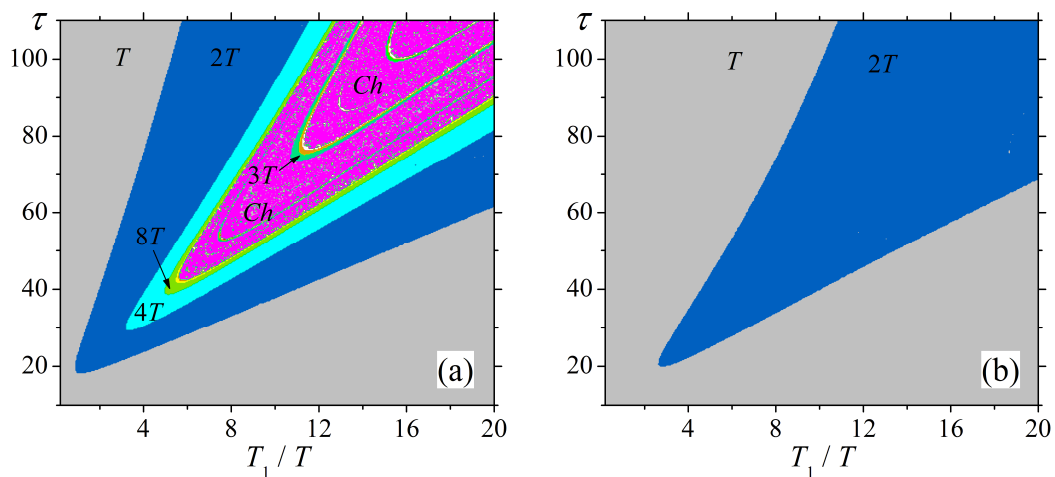
$$\tau_{cd} = - \int_{g_i(k)}^{g_f(k)} \frac{dg}{g[\varepsilon_s + g_i(k) - g - \delta_l \ln(g_i(k)/g)]}. \quad (4.1)$$

Skaitmeninis sprendinys, žymimas $g_f(k) = \hat{F}_{cd}[g_i(k)]$, išreiškia galutinį stiprinimo koeficientą per pradinį stiprinimo koeficientą ir valdančiuosius parametrus $\tau_{cd}, \delta_l, \varepsilon_s$. Gautoji reikšmė tampa sekančio kaupinimo proceso pradine verte; kaupinimo intervalo pabaigoje susiformuoja pradinė vertė $(k+1)$ -ajam ciklui, $g_i(k+1) = 1 - [1 - g_f(k)] \exp(-T/T_1)$. Stiprinimo koeficiento transformacijos taisyklė gali būti perrašyta, $g_i(k+1) = \hat{F}_\Sigma[g_i(k)]$, įvedus atvaizdą $\hat{F}_\Sigma = 1 - (1 - \hat{F}_{cd}) \exp(-T/T_1)$. Pagal diskretaus laiko dinaminių sistemų teoriją [10] sistemos būsenos atsikartojimas kiekviename cikle (vad. stabilium $1T$ režimu) yra realizuojamas, jei egzistuoja fiksuotas taškas g_1 , tenkinantis lygtį $g_1 = \hat{F}_\Sigma(g_1)$, ir sąlyga $|\hat{F}'_\Sigma(g_1)| < 1$ yra tenkinama šiame taške. \hat{F}_Σ -atvaizdų analizė būsenų erdvėje parodė, kad fiksuotas taškas visada egzistuoja ir visada yra vienintelis nepriklausomai nuo valdančiųjų parametrų verčių. Tai nulemia tam tikrą regeneracinių stiprintuvų nestabilumą rūši. Jeigu $|\hat{F}'_\Sigma(g_1)| > 1$, pradinis stiprinimo koeficientas gali atsikartoti kas antrame cikle, arba, bendruoju atveju, vieną kartą per m ciklų. Egzistuoja būsena g_m , kuri atsikartoja m kartų pritaikius transformaciją \hat{F}_Σ , t.y. $g_m = \hat{F}_\Sigma^m(g_m)$. Toks režimas yra stabiliai kvaziperiodinis (mT režimas), kai $|(\hat{F}_\Sigma^m)'(g_m)| < 1$. Priešingu atveju, kai $|(\hat{F}_\Sigma^m)'(g_m)| > 1$, kvaziperiodiškumas suyra, sistema pasižymi chaotine elgsena.

Regeneracinio stiprintuvo darbo režimas yra pilnai apibrėžiamas keturių valdančiųjų parametrų rinkiniu (darbiniu tašku): impulsų pasikartojimo dažniu T_1/T , apėjimų skaičiumi τ_{cd} , užkrato energija ε_s ir parazitiniams nuostoliams δ_l . Grafinis vaizdas, kaip dinaminiai režimai pasiskirsto šių parametrų erdvėje, duoda pilną informaciją apie stiprintuvo veikimą. Skaitmeniškai nustatyti dinaminiai režimai įvairioms užkrato energijos reikšmėms, esant nuliniams nuostoliams yra atvaizduoti pasikartojimo dažnio – apėjimų skaičius plokštumoje (4.1 pav.).



4.1 pav. Stiprinimo dinamikos diagramos pasikartojimo dažnio – apėjimų skaičius plokštumoje skirtingoms užkrato impulso energijoms: $\varepsilon_s = 10^{-10}$ (a); $\varepsilon_s = 2.5 \times 10^{-7}$ (b); $\varepsilon_s = 3 \times 10^{-7}$ (c); $\varepsilon_s = 1.3 \times 10^{-4}$ (d), kai rezonatoriaus nuostoliai $\delta_l = 0$.



4.2 pav. Stiprinimo dinamikos diagramos pasikartojimo dažnio – apėjimų skaičius plokštumoje skirtingoms užkrato impulso energijoms: $\varepsilon_s = 3 \times 10^{-7}$ (a); $\varepsilon_s = 1.9 \times 10^{-4}$ (b), kai rezonatoriaus nuostoliai $\delta_l = 0.028$.

Režimai yra tokie: vienos energijos ($1T$); kvaziperiodiniai su fundamentaliu periodu lygiu dviems ($2T, 4T, 8T, 16T$ ir $32T$); kvaziperiodiniai su fundamentaliu periodu lygiu trimis ($3T, 6T$ ir $12T$); ir chaotinės elgsenos.

Žemiems IPD ($T_1/T < 1$) stiprintuvo darbas yra stabilus. Dideliems IPD stabilus režimas pasiekiamas, kai apėjimų skaičius yra mažas arba labai didelis. Veikimo stabilumas stipriai priklauso nuo užkrato impulso energijos. Didėjant užkrato energijai, regeneracinio stiprinimo dinamika tampa vis paprastesnė (4.1 pav.). Galiausiai, kai $\varepsilon_s > 1.9 \times 10^{-4}$, stiprinimas yra stabilus visame IPD diapazone bet kokiai apėjimų skaičiaus vertei.

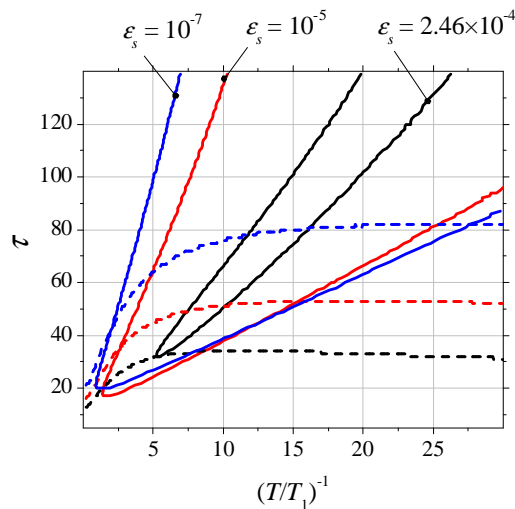
Parazitinių nuostolių padidėjimas sumažina stabilumo zoną. Esant vidutinio dydžio nuostoliams, $\delta_l = 0.028$, chaotinio režimo zona išsiplečia, ir aukštesnės eilės bifurkacijų zona pasislenka į mažesnių IPD bei mažesnio apėjimų skaičiaus sritį (4.2 pav.). Mažiausia būtina užkrato energija, kuri užtikrina stabilų darbo režimą, padidėja iki $\varepsilon_s = 3.5 \times 10^{-3}$.

Regeneraciniams stiprintuvams, su pasyviu (per išėjimo veidrodį) išvedimu iš rezonatoriaus, stabilumo kriterijus $|\hat{F}'_{\Sigma}(g_1)| < 1$ yra visada tenkinamas. Todėl tokios sistemos visada yra stabilios, ir 3 skyriaus formulės puikiai tinka visose parametru srityse.

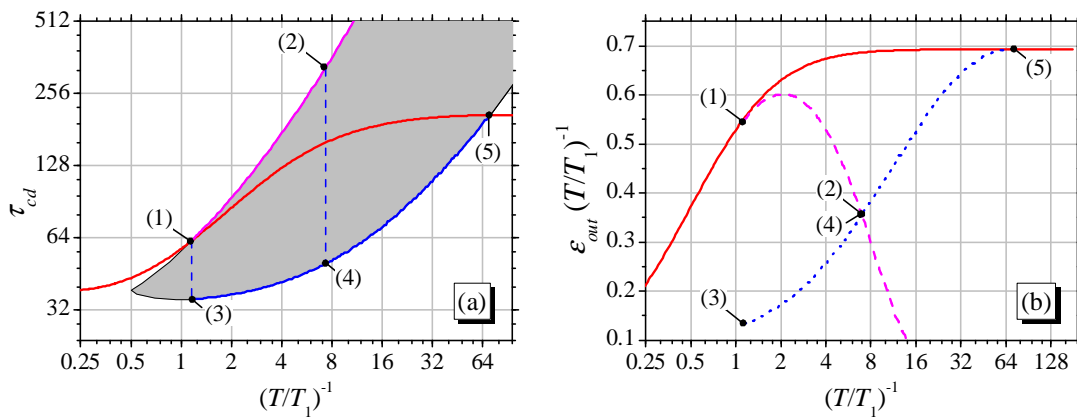
5 skyriuje aptariami specifiniai darbinių charakteristikų apribojimai, sukelti nestabilumo efekto. Pristatomas stabilumo diagramų metodas, kurio pagalba galima visapusiškai optimizuoti regeneracinių stiprintuvų veikimą. Skaitmeniškai gautų diagramų rinkinys leidžia numatyti išėjimo charakteristikų vertes, kurias įmanoma pasiekti stabiliam darbo režimui.

Paviršius $|\hat{F}'_{\Sigma}(g_1)| = 1$ (bifurkacijos taškų $1T-2T$ visuma) atskiria stabilaus ir nestabilaus veikimo zonas keturmatėje parametru erdvėje ($T_1/T, \tau_{cd}, \delta_l, \varepsilon_s$). Šis paviršius tampa stabilumo ribos kreive pasikartojimo dažnio - apėjimų skaičiaus ($T_1/T, \tau_{cd}$) plokštumoje. Apribojimus sąlygoja tai, kurioje plokštumos vietoje yra darbinis taškas (τ_{cd}^{opt}), galimai duodantis didžiausią išėjimo energiją. IPD diapazone,

kur τ_{cd}^{opt} kreivė yra nestabilumo zonos viduje, maksimali energija ε_{out}^{max} negali būti pasiekta stabilioje impulsų sekoje. Šis dažnių diapazonas vadinamas „kritiniu“. 5.1 paveiksle pateiktas stabilumo diagramų pavyzdys tam tikroms nuostolių faktoriams ir kelioms užkrato impulso energijos vertėms. Didėjant užkrato impulso energijai, kritinis dažnių diapazonas siaurėja. Kai $\varepsilon_s > 2.46 \times 10^{-4}$, kreivė τ_{cd}^{opt} iš viso nekerta nestabilumo zonos.



5.1 pav. Stabilumo diagramos, kai parazitiniai nuostoliai $\delta_l=0.028$. Stabilumo ribos kreivės (ištininė linija) ir τ_{cd}^{opt} kreivės (brūkšninė linija), esant skirtingoms užkrato energijoms.



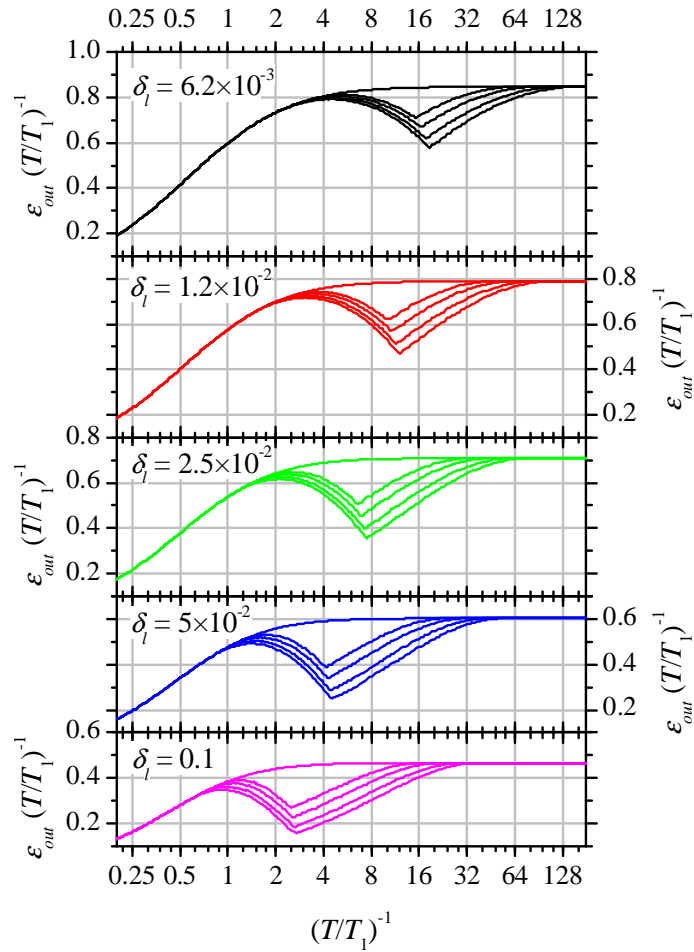
5.2 pav. (a) τ_{cd}^{opt} kreivės (ištininė linija) padėtis nestabilumo zonos (užpildytas laukas) atžvilgiu. (b) Išėjimo galios priklausomybė nuo impulsų pasikartojimo dažnio: atraminė $\varepsilon_{out}^{max} (T/T_1)^{-1}$ kreivė (ištininė linija), viršutinės atšakos išėjimas (brūkšninė linija), apatinės atšakos išėjimas (taškinė linija). Abi diagramos atspindi $\delta_l=0.025$, $\varepsilon_s=3 \times 10^{-15}$ atvejį.

Tai reiškia, kad įmanoma pilnai išnaudoti regeneracinio stiprintuvo galios galimybes. Kritinio diapazono viduje didžiausia stabili išėjimo energija yra pasiekama viršutinėje, arba apatinėje stabilumo zonų ribų atšakose. Tipinė situacija silpnam užkratui iliustruojama stabilumo diagramoje su logaritmine skale (5.2a pav.). Viršutinę ir apatinę stabilumo ribos kreivės atšakas atitinka 1-2 ir 4-5 segmentai. Viršutinės atšakos galia [nuo taško (1) link taško (2) 5.2b paveiksle] iš pradžių didėja, o paskui tolygiai mažėja. Dažniui didėjant, apatinės atšakos galia laipsniškai auga nuo taško (3) link taško (5), kuriame pasiekama ε_{out}^{\max} vertė.

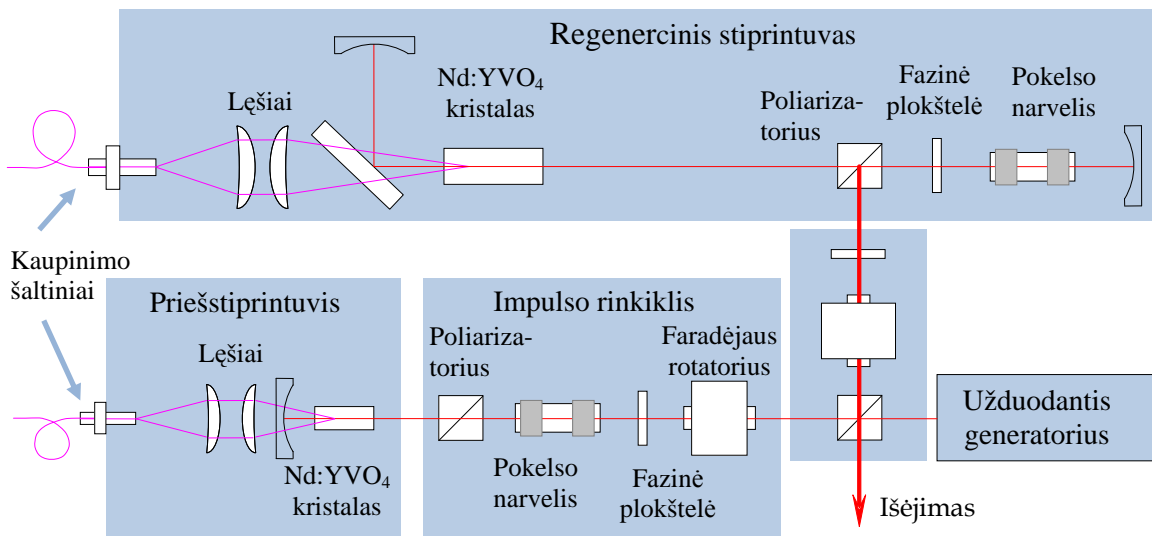
Žemuose ir labai aukštuose dažniuose aukščiausia vidutinė galia, kurią įmanoma pasiekti stabiliam režime sutampa su analitiškai išvesta verte $\varepsilon_{out}^{\max} (T/T_1)^{-1}$. Tarpinėje dažnių srityje pastebimas galios sumažėjimas. Galios kreivės turi V formos įdubą, kurios charakteristikos priklauso nuo užkrato impulso energijos bei parazitinių nuostolių dydžio (5.3 pav.). Darbas ant viršutinės stabilumo ribos reiškia, kad stiprinamas impulsas atlieka daug lėkių rezonatoriuje, o tai padidina galios išbarstymą rezonatoriaus viduje bei B -integralo dydį. Šie efektai gali riboti darbą ties viršutine stabilumo zonų riba. Spėjama, kad galios sumažėjimas kritiniame IPD diapazone realiose sistemose būtų dar stipresnis negu matomas 5.3 pav.

6 skyriuje aprašomi regeneracinio stiprinimo eksperimentai pikosekundinėje Nd:YVO₄ sistemoje, kurie buvo atlikti norint patikrinti teorinius rezultatus. Pademonstruota, kad padidėjus užkrato impulso energijai pagerėja stiprinimo dinamika ir kad papildomas priešstiprintuvis yra efektyvi priemonė užkrato energijai padidinti.

Eksperimentinės sistemos schema pavaizduota 6.1 paveiksle. Pradinė nuolatinė pikosekundinių impulsų seka gauta užduodančiu generatoriumi, kurio išėjime vidutinė spinduliuotės galia siekia 300 mW, o impulsų pasikartojimo dažnis lygus 82 MHz. Tolimesniam stiprinimui iš pradinės impulsų sekos išrenkami pavieniai impulsai. Kad būtų sumažinti arba išvis panaikinti nestabilumai, į sistemą įvestas dviejų praėjimų Nd:YVO₄ priešstiprintuvis, kuris padidina užkrato impulso energiją.



5.3 pav. Bedimensinės išėjimo galios priklausomybė nuo normuotojo impulsų pasikartojimo dažnio. Apatinės kreivės kiekvienoje kreivių šeimoje atitinka keturias užkrato energijos vertes (nuo apačios į viršų: $\epsilon_s = 10^{-16}$, 10^{-13} , 10^{-10} , 10^{-8}); viršutinė yra $\epsilon_{out}^{max} (T/T_1)^{-1}$ kreivė.

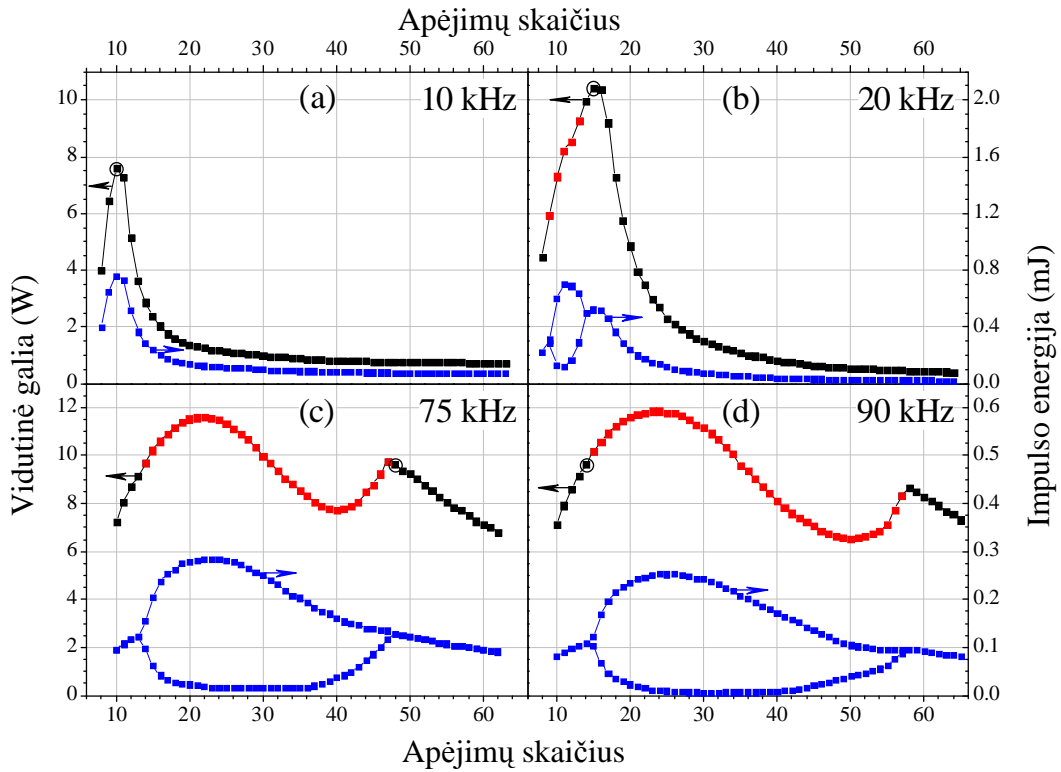


6.1 pav. Eksperimentinės sistemos schema.

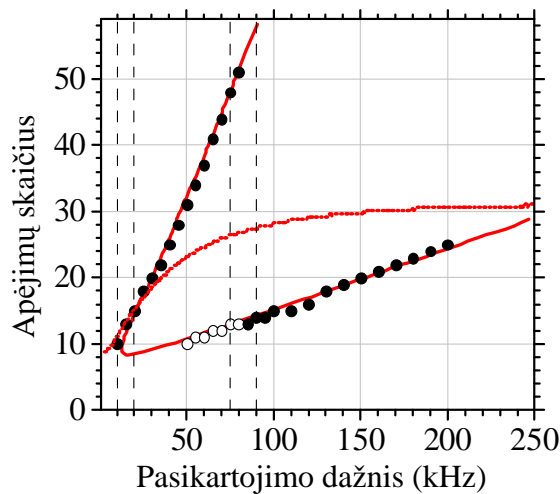
Pakako 2 W kaupinimo galios, kad impulso energija išaugtų daugiau nei dviem eilėmis. Esant 10 kHz, energija siekė 1.1 μJ ; pasikartojimo dažniui augant iki 200 kHz, energija tolygiai mažėjo iki 370 nJ. Regeneracinio stiprintuvo kaupinimui naudoti lazeriniai diodai su skaiduliniu išėjimu. Maksimali galia TEM₀₀ modeje pasiekta esant 44 W kaupinimo galiai.

Kad būtų gauta didžiausia įmanoma stabilaus režimo vidutinė galia, apėjimų skaičius buvo derinamas kiekvienam IPD. Aktualiausių atvejų derinimo kreivės pateiktos 6.2 pav. Juos atitinkančios darbinų taškų trajektorijos pažymėtos vertikaliomis brūkšninėmis linijomis 6.3 pav. stabilumo diagramoje. Darbinio taško trajektorija esant 10 kHz nekerta nestabilumo zonos. Optimalus 20 kHz darbinis taškas yra virš nestabilumo zonos. Didžiausia išėjimo energijos vertė 75 kHz ir 90 kHz dažniams (patenkantiems į kritinį dažnių diapazoną) pasiekama atitinkamai viršutinėje ir apatinėje stabilumo zonų riboje. Eksperimentiniai stebėjimai patvirtino teorines prognozes, kad kritiniams impulsų pasikartojimo dažniams: (i) kai vidutinė spinduliuotės galia yra didžiausia, išėjimo impulso energija demonstruoja nepriimtinas fliktuacijas; (ii) didžiausia stabili impulso energija pasiekama ties nestabilumo zonos riba.

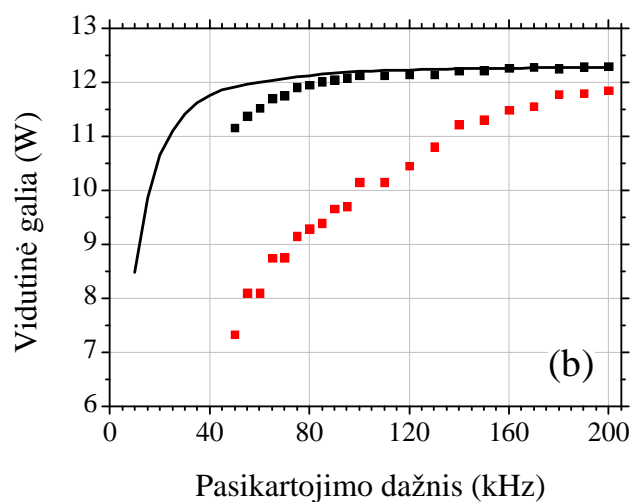
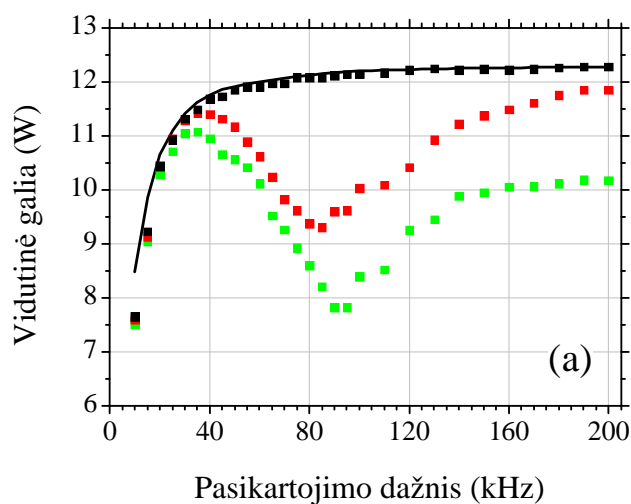
Buvo ištirti trys regeneracinio stiprinimo atvejai: kai užkrato impulso energija padidinama priešstiprintuvio (700 nJ), nekeičiama (3.2 nJ) ir sumažinama (32 pJ). Mažesnėms užkrato energijos vėrtėms pastebėtas V formos galios sumažėjimas kritiniame pasikartojimo dažnių diapazone (6.4a pav.). Pastiprinto užkrato impulso energijos pakako, kad būtų visiškai išvengta nestabilumų sukulto galios sumažėjimo. Šie eksperimentai atlikti su 58 ps impulsais siekiant sumažinti Kerr'o efekto įtaką. Eksperimentai su 9 ps impulsais parodė (6.4b pav.), kad trumpesnių impulsų stiprinimui priešstiprintuvio įvedimas į sistemą duoda dar daugiau naudos. Žemų dažnių srityje (t.y., didelių intensyvumų srityje) neįmanoma dirbti ant viršutinės stabilumo zonų ribos dėl Kerr'o efekto įtakos. Priverstinis darbas ant apatinės stabilumo ribos (žiūr. 6.3 pav.) lemia žemesnę, negu teoriškai numatyta, išėjimo galią.



6.2 pav. Eksperimentinės vidutinės galios (juodi ir raudoni taškai žymi stabilų ir nestabilų režimą, atitinkamai) bei impulso energijos (mėlyni taškai) priklausomybė nuo rezonatoriaus apėjimų skaičiaus, esant skirtingiems IPD. Apskritimu apvesti taškai atitinka maksimalios stabilios energijos režimą.



6.3 pav. Stabilumo diagrama, kai užkrato energija lygi 3.2 nJ. Darbinio taško trajektorijos (vertikalios brūkšninės linijos) ir optimalūs darbiniai taškai 58 ps (pilnaviduriai apskritimai) bei 9 ps (tuščiaviduriai apskritimai) trukmės impulsams.



6.4 pav. Eksperimentinės (taškai) ir teorinės (ištisinė linija) galios kreivės 58 ps (a) ir 9 ps (b) impulsams. Juodi, raudoni ir žali taškai atitinka tris skirtingas užkrato energijas: 700 nJ, 3.2 nJ ir 32 pJ.

Stiprinimo eksperimentai, atlikti Nd:YVO₄ regeneraciniu stiprintuvu, parodė, kad šiame darbe išvystyto teorinio modelio sprendiniai gerai sutampa su eksperimentiniais duomenimis. Todėl pasiūlytas modelis gali būti naudojamas praktinės sistemos projektavimui.

Išvados

1. Nuolatinio kaupinimo, aukšto impulsų pasikartojimo dažnio regeneraciniams stiprintuvams yra būdinga sudėtinga impulsų vystymosi dinamika. Veikimo stabilumas yra lemiamas balanso tarp užpildos apgražos eikvojimo ir jos atstatymo kaupinimo metu. Sistemos dinamika pakankamai tiksliai gali būti aprašyta supaprastintu, erdvinių efektų neįskaitančiu modeliu, kuriame stiprintuvo savybės (įskaitant stabilumą) yra charakterizuojamos tik keturiais bedimensiniais valdančiaisiais parametrais, tiesiogiai susietais su realiais fizikiniais dydžiais: pasikartojimo dažniu, rezonatoriaus apėjimų skaičiumi, užkrato energija ir rezonatoriaus nuostoliais.

2. Pagrindinės optimizuotų ir stabiliam režime veikiančių stiprintuvų charakteristikos yra aprašomos analitiškai. Aprašyme įskaityti optimalūs pradinis ir galutinis stiprinimo koeficientai, išėjimo impulso energija, rezonatoriuje išsklaidytoji galia, optimalaus rezonatoriaus apėjimų skaičius ir daugelio praėjimų sąlygotas B integralas. Pateikiamos analitinės išraiškos yra funkcijos, priklausančios nuo bedimensinių valdančiųjų parametru, padaugintų iš koeficiento, kuris susideda iš plačiai vartojamų optinio rezonatoriaus, lazerinės terpės ir kaupinimo parametru.

3. Stabilus veikimas reikalauja, kad užpildos apgražos nuskurdinimas būtų tiksliai kompensuojamas kaupinimu kiekviename veikimo periode ir sistema evoliucionuotų į tokią stabilią būseną (fiksotą tašką) per baigtinį periodų skaičių. Unikalaus fiksuoto taško egzistavimas yra fundamentali regeneracinio stiprinimo savybė, kuri nulemia valdančiųjų parametru nusakomą vienareikšmišką dinamikos elgseną. Stabilus veikimas, periodo dvigubėjimas su įvairiu atsikartojamumu ir deterministinio chaoso režimas yra regeneraciniam stiprinimui būdingos dinamikos savybės. Siekiant suprasti sistemos elgseną, buvo nustatyta stabilių ir nestabilių sričių vieta parametru erdvėje. Sistema yra stabili, kai pasikartojimo dažnis yra mažesnis už užpildos

apgražos relaksacijos spartą. Už šios ribos atsiranda nestabilumo zona, kuri, didėjant pasikartojimo dažniui, tolygiai plečiasi išilgai apėjimų skaičiaus ašies. Užkrato energijos ašies kryptimi nestabilumo zona tęsiasi tik iki tam tikro apibrėžto lygio. Ši savybė suteikia galimybę optimizuoti sistemą padidinus užkrato impulsų energiją.

4. Stiprūs išėjimo impulsų energijos svyravimai paprastai pasireiškia ties rezonatoriaus apėjimų skaičiais, leidžiančiais pasiekti maksimalią vidutinę galią. Maksimali stabilių impulsų energija yra pasiekama ties nestabilumo zonos riba. Pasikartojimo dažnio diapazonas, kuriame nestabilumai reikšmingai blogina darbinės charakteristikas (kritinis diapazonas), apima 3-5 oktavas, nuo vieneto iki kelių dešimčių normuotų vienetų. Nestabilumų poveikis leidžia išlaikyti pastovios energijos išėjimo impulsus tik vidutinės galios mažinimo sąskaita. Kritinių dažnių srityje išėjimo galios priklausomybė nuo pasikartojimo dažnio turi V raidės formą. Didžiausias galios kritimas stebimas, kai užkrato energija yra maža. Didinant užkrato energiją, sistemos nestabilumų įtaka silpnėja ir darbinės charakteristikos artėja prie savo maksimalios vertės.

5. Diodais kaupinamų Nd:YVO_4 regeneracinių stiprintuvų eksperimentiniai rezultatai gerai atitiko teorinius duomenis tiek kiekybine, tiek kokybine prasme. Įrodyta, kad užkrato energijos didinimas susiaurina kritinę pasikartojimo dažnio sritį, tokiu būdu pagerindamas stiprintuvo veiką iš esmės. Tai akivaizdžiausiai stebima trumpesnėms impulsų trukmėms. Priešstiprintuvio naudojimas yra paprastas ir efektyvus būdas pasiekti reikalingą užkrato energiją, siekiant maksimaliai išnaudoti sistemos galimybes. Eksperimentų metu buvo pademonstruota stabili stiprintuvo veiką iki 200 kHz dažnio, o gauta vidutinė išėjimo galia buvo artima idealizuotos stacionarios veikos ribai.

Literatūros sarakšas

1. T. Metzger, A. Schwarz, C. Teisset, D. Sutter, A. Killi, R. Kienberger, and F. Krausz, High-repetition-rate picosecond pump laser based on a Yb:YAG disk amplifier for optical parametric amplification, *Opt. Lett.* **34** (14), 2123-2125 (2009).
2. H. Sayinc, U. Buenting, D. Wandt, J. Neumann, and D. Kracht, Ultrafast high power Yb:KLuW regenerative amplifier. *Opt. Express*, **17** (17), 15068-15071 (2009).
3. N. Ishii, C.Y. Teisset, T. Fuji, A. Baltuska, and F. Krausz, Seeding of an eleven femtosecond amplifier and its Nd picosecond pump laser from a single broadband Ti:sapphire oscillator, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **12** (2), 173-180 (2006).
4. J. Dörring, A. Killi, U. Morgner, A. Lang, M. Lederer, and D. Kopf, Period doubling and deterministic chaos in continuously pumped regenerative amplifiers, *Opt. Express*, **12** (8), 1759-1768 (2004).
5. W. Lowdermilk and J. Murray, The multipass amplifier: theory and numerical analysis, *J. Appl. Phys.*, **51** (5), 2436-2444 (1980).
6. J. Murray and W. Lowdermilk, Nd:YAG regenerative amplifier, *J. Appl. Phys.* **51** (7), 3548-3555 (1980).
7. J. J. Degnan, Theory of the Optimally Coupled Q-Switched Laser, *IEEE J. Quantum Electron.* **25** (2), 214-220 (1989).
8. O. Svelto, *Principles of Lasers* (Plenum Press, 1998)
9. D. Brawn, *High Peak Power Nd:Glass Laser Systems*, (Springer-Verlag, New-York, 1981).
10. K. T. Alligood, T. D. Sauer, and J. A. Yorke, *Chaos. An Introduction to Dynamical Systems*, (Springer, 1996).

Publikacijų sąrašas

- [A1]. M. Grishin, V. Gulbinas, and A. Michailovas, Dynamics of high repetition rate regenerative amplifiers, *Optics Express* **15** (15), 9434-9443 (2007).
- [A2]. M. Grishin, V. Gulbinas, and A. Michailovas, Bifurcation suppression for stability improvement in Nd:YVO₄ regenerative amplifier, *Optics Express* **17** (18), 15700-15708 (2009).
- [A3]. M. Grishin, Cavity dumping versus stationary output coupling in repetitively Q-switched solid-state laser, *Journal of the Optical Society of America B - Optical Physics*, **28** (3), 433-444 (2011).
- [B1]. M. Grishin and A. Michailovas, Dynamics of Continuously Pumped Solid-State Regenerative Amplifiers, in *Advances in Solid State Lasers: Development and Applications*, M. Grishin (Ed.) (INTECH, Vukovar, 2010) ISBN: 978-953-7619-80-0.
- [P1]. M. Grishin, A. Michailovas, Stable Picosecond Laser at High Repetition Rate, Patent nr.: WO2008016287; EP2064784.
- [P2]. M. Grishin, A. Michailovas, Multiple Output Repetitively Pulsed Laser, Patent nr.: US2010135341.

Pranešimai konferencijose:

1. M. Grishin, V. Gulbinas, A. Michailovas and J. Verseckas, Operation Features of Regenerative Amplifiers at High Repetition Rate, *Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO-08, San-Chose, CA, USA, May 4-9, 2008*. Technical digest in CD, paper CFB7.
2. S. Balickas, M. Grishin, S. Jacinavičius, J. Kolenda, A. Michailovas, Picosecond lasers for science and industry, *International Conference "Laser Optics 2008", St. Petersburg, Russia, June 23-28, 2008*. Invited talk WeR1-27.

3. M. Grishin, J. Verseckas, Diode-pumped picosecond laser with 1 MHz electro-optical cavity dumping, International Conference “*Laser Optics 2008*”, *St. Petersburg, Russia, June 23-28, 2008*. ThR1-p46.
4. M. Grishin, A. Michailovas, Inherent instabilities of Q-switched cavity-dumped solid-state lasers, *International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2010) and International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (LAT 2010)*, Kazan, Russia, August 23-26, 2010. LTuL17.
5. M. Grishin, Operation Features of Q-switched Cavity Dumped Solid-State Lasers Caused by Inherent Instabilities, *4th EPS-QEOD Europhoton Conference on Solid-State Fiber and Waveguide Coherent Light Sources, Hamburg, Germany, 29 August – 3 September, 2010*. ThP20

Apie autorių

Mikhail Grishin gimė 1960 m. rugpjūčio 19 d. Donecke, Ukrainoje.

1977-1983 m. studijavo kietojo kūno fiziką ir kvantinę elektroniką Maskvos Fizikiniame-inžineriniame institute Eksperimentinės ir teorinės fizikos fakultete. Baigęs studijas, (1983-1985) dirbo tyrimų inžinieriumi Vilniaus radijo matavimo prietaisų mokslinio tyrimo institute. Po to persikėlė į Šaturą (Maskvos sritis), kur prisijungė prie mokslininkų grupės Rusijos mokslų akademijos Industrinių lazerių mokslinių tyrimų centre. (1985-1993) ten dirbo moksliniu darbuotoju Lazerinės optikos laboratorijoje. Mikhail Grishin buvo vienas iš UAB "GEOLA" Vilniuje įkūrėjų ir dirbo ten nuo 1995 iki 2000 metų technikos, vėliau vykdančiuoju direktoriumi. Nuo 2000-ųjų iki dabar jis dirba UAB „EKSPLA“ tyrimų ir plėtros programų vadovu. Taip pat nuo 2007 m. jis dirba Fizikos instituto (dabar Fizinių ir Technologijos mokslų centro Fizikos instituto) lazerinių taikymų laboratorijoje jaunesniuoju mokslo darbuotoju. 2006-2010 m. studijavo bendroje Fizikos instituto ir Vilniaus universiteto doktorantūros studijų programoje. Dabartinė mokslinės veiklos jų interesų sritis apima kietojo kūno lazerius ir stiprintuvus, lazerių dinamiką bei ultratrumpųjų impulsų generavimą.

Summary

Dynamics of continuously pumped regenerative laser amplifiers

This thesis presents a detailed study of continuously pumped regenerative amplifiers based on long-relaxation-time laser media. The goal of the research was to develop a general pattern of complex dynamics peculiar to such systems at high repetition rates and to find a way to improve performance characteristics affected by instabilities. Basic parameters of the optimally coupled regenerative amplifier operating in stable regime were derived in analytical form. They include optimum initial and final gains, the maximum output pulse energy, the power dissipation, the multi-pass B -integral and the roundtrip number providing the maximum output energy. A comprehensive pattern of existing dynamic regimes (stable, quasi-periodic and chaotic) was represented in space of controlling parameters. It has been found that the space of unstable operation decreases as the seed pulse energy increases. A method of stability diagrams, which forms a systematic approach to the optimization of regenerative amplification dynamics and in particular allows one to determine the seed pulse level sufficient to maintain the operation stable, has been developed. Performance characteristics were determined in the critical range of repetition rates, where instabilities are pronounced at the most and analytical solutions are unavailable. The experiments, carried out using the diode pumped picosecond Nd:YVO₄ laser system, exhibited a good agreement with theoretical inferences. It has been demonstrated that increase in the seed pulse energy reduces the critical range of repetition rates and thus allows the system capabilities to be exploited to full extent.