

**ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ,  
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ИОН ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ**

**МАХМУДОВ ХИКМАТ МАХАМАТОВИЧ**

**ҚУЁШ НУРИ БИЛАН ИШЛАЙДИГАН ВА ҚУЁШ НУРИ  
ЧАСТОТАСИ ЎЗГАРТИРГИЧЛИ ЛАЗЕРЛАР**

**01.04.11 – Лазер физикаси**

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**ТОШКЕНТ – 2021**

**Физика-математика бўйича докторлик (DSc) диссертацияси автореферати  
мундарижаси**

**Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации по физико-  
математическим наукам**

**Contents of the dissertation abstract of the doctoral (DSc) on physical and  
mathematical sciences**

<b>Махмудов Хикмат Махаматович</b>	
Куёш нури билан ишлайдиган ва куёш нури частотаси ўзгартиргичли лазерлар.....	<b>3</b>
<b>Махмудов Хикмат Махаматович</b>	
Лазеры с солнечной накачкой с частотными преобразователями солнечного излучения.....	<b>30</b>
<b>Makhmudov Khikmat Makhmatovich</b>	
Solar pumped lasers with solar spectrum frequency converters.....	<b>57</b>
<b>Эълон қилинган ишлар рўйхати</b>	
Список опубликованных работ	
Эълон қилинган ишлар рўйхати	
List of published works .....	<b>61</b>

**ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ,  
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ИОН ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ**

**МАХМУДОВ ХИКМАТ МАХАМАТОВИЧ**

**ҚУЁШ НУРИ БИЛАН ИШЛАЙДИГАН ВА ҚУЁШ НУРИ  
ЧАСТОТАСИ ЎЗГАРТИРГИЧЛИ ЛАЗЕРЛАР**

**01.04.11 – Лазер физикаси**

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc) ДИССЕРТАЦИЯСИ  
АВТОРЕФЕРАТИ**

**ТОШКЕНТ – 2021**

**Докторлик (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2018.2.DSc/FM123 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация Ион-плазма ва лазер технологиялари институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифаси (<http://iplt.uz/>) ва “ZiyoNet” ахборот-таълим порталида ([www.ziyounet.uz](http://www.ziyounet.uz)) жойлаштирилган.

**Илмий маслаҳатчи:**

**Пайзиев Шермаҳамат Далиевич**  
физика-математика фанлари доктори

**Расмий оппонентлар:**

**Эшқобилов Напас Бекназарович**  
физика-математика фанлари доктори,  
профессор

**Сапаев Усмон Қаландарович**  
физика-математика фанлари доктори

**Маҳманов Ўрол Қудратович**  
физика-математика фанлари доктори

**Етакчи ташкилот:**

**Ўзбекистон Миллий Университети**

Диссертация ҳимояси Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, ҳузуридаги DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 рақамли Илмий Кенгашнинг 2021 йил « 8 » июль соат 14<sup>00</sup> даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел./факс: (99871) 262-32-54, e-mail: [info@iplt.uz](mailto:info@iplt.uz) (Ион-плазма ва лазер технологиялари институти мажлислар зали).

Диссертация билан Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин ( 6 рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел./факс: (99871) 262-31-69.

Диссертация автореферати 2021 йил « 01 » июль куни тарқатилди.

(2021 йил « 01 » июль даги 6 рақамли реестр баённомаси).



**Х.Б. Ашуров**  
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси, т.ф.д., профессор

**И.Д.Ядгаров**  
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д., катта илмий ходим

**С.А.Бахрамов**  
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф.д., академик

## КИРИШ (докторлик диссертацияси аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Экологик хавфсизлик бугунги кунда жаҳон миқёсида асосий ва энг муҳим муаммолардан бири бўлиб ҳисобланади. Шу нуқтаи назардан тугамайдиган ва экологик тоза манба бўлган қуёш энергиясидан фойдаланиш, долзарб вазифалардан бири ҳисобланади. Қуёш энергиясидан фойдаланишнинг усулларида бири, бу уни лазер нури энергиясига айлантиришдир. Юқорида қайд этилганларга қарамай, қуёш нури энергиясини лазер нури энергиясига айлантириш самарадорлиги, уни электр ва иссиқлик энергиясига айлантириш каби бошқа турларидагига нисбатан ҳали ҳам паст кўрсаткичларда қолиб кетмоқда.

Кенг полосали қуёш нури спектрини монохроматик лазер нури энергиясига самарали айлантириш учун: аниқ физик хусусиятларга эга бўлган янги фаол муҳитларни аниқлаш, лазер актив элементини оптик дамлашда қуёш нури спектрдан максимал фойдаланиш, ушбу фаол муҳитлардан фойдаланиш жараёнида юзага келувчи салбий иссиқлик эффектларининг олдини олиш каби бир қатор физик муаммоларни ечиш талаб этилади. Шу нуқтаи назардан оптимал лазер схемаларини қидириш ва аниқлаш, янги лазер материалларини ва қуёш нурини ўзгартирувчи қурилмаларни қидириш ва тадқиқ этиш, шунингдек ушбу лазер схемаларининг физик параметрларини тадқиқ этиш долзарб масала бўлиб қолади.

Ўзбекистон Республикасида Қуёш энергиясини лазер энергиясига айлантириш соҳасида бир қатор илмий-тадқиқот ишлари амалга оширилган, жумладан, биринчи марта Катта Қуёш Печида лазер нурланиши олинган, энергия айлантириш самарадорлигини ошириш учун янги концепция таклиф қилиб, Nd:YAG ли лазер учун бир қатор муаммоларнинг янги ечимлари таклиф қилинган.

Ҳозирги кунда дунё миқёсида қайта тикланувчи энергия манбалиридан фойдаланишга асосланган қуёш билан ишлайдиган лазерлар соҳасидаги муаммоларни ечишга қаратилган тадқиқотлар, концентрацияланган қуёш нурига нисбатан юқори зичликка эга бўлган ёруғлик оқимларини олиш имкониятининг мавжудлиги сабабли юқори температурали технологияларнинг юзага келишига олиб келиши мумкин. Шунинг учун қуйидаги йўналишлардаги мақсадли илмий тадқиқотлар, шу жумладан илмий лойиҳа ва илмий изланишлар долзарб ҳисобланади: қуёш билан ишлайдиган лазерларнинг янги юқори самарадорликка эга бўлган схемаларини ишлаб чиқиш ва яратиш, қуёш нури спектрининг максимал катта қисмидан фойдаланиб максимал самарадорликка эришадиган лазерларни ишлаб чиқиш ва яратиш, юқори оптик характеристикаларга эга бўлган янги композит лазер материалларини қидириш.

Ўзбекистон Республикаси 2010 йил 15 декабрдаги ПҚ–1442-сон «2011–2015 йилларда Ўзбекистон Республикаси саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги, 2017 йил 7 февралдаги №ПФ-4947-сон

«2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегиясини келгусида амалга ошириш чора-тадбирлари тўғрисидаги», 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаш-тириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти ўзининг муносиб улушини кўшади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши устувор йўналишларига мослиги.** Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялари ривожланишининг АТД-4 – «Қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланиш усулларини ривожлантириш, нанотехнология, фотоника ва бошқа илғор технологиялар асосида технологиялар ва қурилмалар яратиш» устувор йўналишига мувофиқ бажарилди.

**Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи<sup>1</sup>.** Қуёш билан ишлайдиган лазер биринчи марта Z. J. Kiss ва бошқалар томонидан  $Dy^{+3}$  билан легирланган  $CaF_2$  кристалли асосида ишлаб чиқилган. Ўша пайтдан бошлаб шу кунгача ярим аср ўтганига қарамай бу соҳадаги энг асосий муаммо ҳал бўлмаган. Қуёш лазерининг асосий муаммоси бу ҳали ҳам 4-5,1%дан ошмайдиган ўзгартириш самарадорлигидир. Ушбу самарадорлик бошқа муқобил энергия технологиялари, жумладан қуёш технологияларига нисбатан бир неча марта кичикдир. Ушбу муаммони ва бу соҳадаги бошқа муаммоларни ҳал қилиш устида дунёнинг қуйидаги етакчи илмий институтларида қизғин илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда: жумладан: University of Florida (АҚШ), Tohoku University (Япония), American Optical Company (АҚШ), PROMES-CNRS (Франция), Universidade NOVA de Lisboa (Португалия), University of Dundee (Буюк Британия), Institute for Laser Technology (Япония), Ben-Gurion University of the Negev (Исроил) ва бошқалар.

Диссертация тадқиқотининг мавзуси бўйича, дунё миқёсида бир қатор долзарб муаммолар ечилди ва қуйидаги муҳим натижалар олинди: 1966 йилда С.С. Young ва бошқалар таркибида неодим бўлган иттрий-алюминийли гранат (Nd: YAG) кристаллида қаттиқ жисмли қуёш билан ишлайдиган лазер яратилган, 1984 йилда Arashi ва бошқалар Nd: YAG лазериди 18 Вт қувватга эга бўлган генерация олган. D.Jenkins ва бошқалар томонидан концентратор майдонининг бир квадрат метридан олинадиган қувват 4.7 Вт гача оширилган. Сўнгра ушбу кўрсаткич М. Lando ва бошқалар томонидан 6,7 Вт/м<sup>2</sup> га қадар ва Y.Yabe ва бошқалар томонидан Cr: Nd: YAG кристаллида 18,7 Вт/м<sup>2</sup> га қадар яхшиланган. D.Liang ва бошқалар томонидан Nd: YAG актив элементида 19,3 Вт/м<sup>2</sup> ва шундан сўнг 2012 йилда Nd: YAG актив элементида T.Dinh ва бошқалар қувват 30 Вт/м<sup>2</sup> га етказилганлиги тўғрисида маълумот беришган.

<sup>1</sup> Обзор международных научных исследований по теме диссертации проведен на основе: <https://worldwidescience.org/topicpages/s/solar+pumped+laser.html> и др. источников.

Ҳозирги пайтда қуёш билан ишлайдиган лазерлар учун истиқболли бўлган бошқа турдаги фаол мухитлар пайдо бўлди: булар таркибида неодим бўлган композит материаллар, Nd/Cr билан легирланган GSGG, YAG, Nd билан легирланган фторидли шиша ва Nd/Cr:YAG асосидаги керамик материаллардир.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Тақдим этилаётган ишда қуёш билан оптик дамлаш орқали лазер генерациясини олишга қаратилган Z.Kiss, C.Young, H.Arashi ва бошқаларнинг ишлари ўрганиб чиқилди, ушбу ишларда муаллифлар қуёш лазерлари учун муҳим аҳамиятга эга бўлган яхши оптик, иссиқлик ва спектрал параметрларга эга бўлган Nd: YAG актив материалдан фойдаланишган. Муаллифлар M.Weksler ва бошқалар, D.Jenkins ва бошқалар, ҳамда M.Lando ва бошқалар томонидан чоп этилган ишлар Nd: YAG лазери қувватини оширишга қаратилган. Nd: YAG фаол элементида таклиф этилган янги дамлаш усули туфайли максимал қувватдаги генерация олинганлиги тўғрисида маълумот T.Dinh томонидан чоп этилган ишда баён этилган. Nd: YAG фаол элемент сифатида қуёш лазерлари учун энг мос материал бўлишига қарамай, бошқа муаллифлар Nd: YAG билан рақобатлаша оладиган истиқболли материалларни (M.Endo на Cr:Nd:GSGG и Y.Yabe Cr:Nd: YAG) кўрсатдилар. D.Liang ва бошқалар, J.Almeida ва бошқалар, ҳамда P.Xu ва бошқалар томонидан чоп этилган материалларда қуёш нуруни лазер нурига айлантириш самарадорлигини ошириш йўлидаги бўлган уринишлар ҳақидаги маълумотлар берилган.

R.Insuk ва бошқалар, R.Schneider ва бошқалар томонидан чоп этилган ишлардан маълум бўлишича суюқлик, газ, керамика ва бошқалар асосидаги қуёш лазерларининг кўрсаткичлари қаттиқ жисмли лазерлар кўрсаткичидан юқори эмас. P.Beaud ва бошқалар, ҳамда U.Demirbas ва бошқалар томонидан чоп этилган ишларда, оптик дамлашда қуёш нуридан самарали фойдаланиш учун хизмат қиладиган янги материал-сенсублизатор Cr:LiSAF ва Cr:LiCAF ҳақида маълумотлар берилган. P.Reusswig ва бошқалар томонидан эълон қилинган материалларда (CdSe/CdZnS) дан сенсублизатор сифатида фойдаланиш таклиф этилган.

Диссертация мавзуси бўйича чоп этилган материалларнинг кўплигига қарамай қуёш энергиясини лазер нури энергиясига айлаштириш самарадорлигини ошириш вазифаси долзарблигича қолмоқда. Юқорида қайд этилган ишларда қуёш лазерининг самарадорлиги, лазер нури қувватининг қуёш нури концентрация қилинган юзага нисбати орқали кўрсатилган ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), бу эса турли хил об-ҳаво шароитида ва ҳар хил географик кенгликларда турли муаллифлар олган натижаларни таққослашга имкон бермайди.

Қуёш энергиясини лазер нури энергиясига айлантириш самарадорлигини ошириш вазифасини ечиш учун, биз биринчи бўлиб лазер тизимларида ташқи частота ўзгартиргичидан фойдаланиш усулини таклиф этдик.

**Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти ЎзР ФА Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг қуйидаги лойиҳалари: № АЗ-ФА-Ф045 “Катта Қуёш Печида

турли хилдаги актив элементларни синовдан ўтказиш учун мўлжалланган универсал лазер стендини ишлаб чиқиш” (2015-2017), №ОТ-ФЗ-10 “Қуёш энергиясини лазер нури энергиясига айлантириш жараёнларининг физик асосларини тадқиқ этиш ва ривожлантириш” (2017–2020), №MRU-FA-75/2017 “Қуёш энергиясини лазер нури энергиясига самарали ўзгартириш учун қуёш нури спектрини модификация қилиш” (2018–2019), №ФА-Атех-2018-16 “Френел линзасида қуёш билан нақча қилинадиган лазерни ишлаб чиқиш ва яратиш” (2018–2020) тадқиқотлари доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** лазерларнинг оптимал схемасини, улар фаол муҳити учун материалларни аниқлашдан ва қуёш энергиясини лазер нури энергиясига айлантириш самарадорлигини ошириш мақсадида қуёш нури частотасини ўзгартиртирувчи мослама киритилган лазер схемаларини тадқиқ этишдан иборат.

Ушбу мақсадга этиш учун **тадқиқотнинг вазифалари** қуйидагича шакллантирилди:

ютиш самарадорлигини ошириш, нурнинг лазер фаол элементдан кўп марта қайтарилиши таъминлаш усуллари орқали қуёш нури билан лазерларни оптик дамлашнинг оптимал усуллари ишлаб чиқиш;

дамлаш самарадорлигини ошириш мақсадида композит фаол элементда дамлаш энергиясининг иккиламчи концентрациясига эга бўлган лазер схемалари моделини ишлаб чиқиш;

генерация порогини пасайтириш мақсадида церийни ички сенсбилизатор сифатида Nd:YAG киритиш асосидаги лазерлар моделини ишлаб чиқиш;

Cr:LiCAF кристаллидан қуёш спектри частотасини ўзгартирувчи ташқи элемент (сенсбилизатор) сифатида фойдаланилган Nd: YAG лазерларининг имкониятларини тадқиқ этиш;

фаол муҳит лазер характеристикаларининг концентрацияга боғлиқлигини инобатга олган ҳолда, YAG/Nd:YAG диск кўринишидаги композит керамик фаол элементли қуёш лазерлари кувватини ошириш имкониятлари тадқиқ этиш;

Nd:Cr:GSGG кристаллида қуёш ёрдамида оптик дамланадиган ва фаол элементдан иссиқлик самарали олиб ташланадиган лазер схемаларини тадқиқ этиш;

генераци порогини пасайтириш мақсадида бўйлама оптик дамлашли  $Ti^{3+}:Al_2O_3$  лазерининг оптимал геометриясини тадқиқ этиш;

Nd:YAG кристаллига  $Se^{+3}$  ионларини киритиш (легирлаш) қуёш ёрдамида дамланадиган лазер генерациясининг хусусиятларига қандай таъсир этишини тадқиқ этиш;

қуёш ёрдамида дамланадиган қаттиқ жисмли лазер резонаторида иссиқлик майдонлари ва иссиқлик кучланишларини ҳисоблаш учун дастурий код ишлаб чиқиш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида қуёш ёрдамида оптик дамланадиган қаттиқ жисмли лазерлар, лазер фаол элементлари, қуёш нури

тўлкинузунлигини ўзгартириб берувчи материаллар (сенсублизаторлар) ва лазер резонаторлари схемаси танланган.

**Тадқиқотнинг предмети**ни қуёш ёрдамида дамланадиган лазерлар резонаторида содир бўладиган физик жараёнлар, айнан бир неча марта такрорланадиган қайтиш, синиш, ютилиш, фотонлар люминесценцияси, энергиянинг сенсублизатор ионларидан актив ионларга узатилиши ташкил этади.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Диссертация ишида лазер тизимида содир бўладиган жараёнларни фаол муҳитларнинг спектрал характеристикаларини, лазер тизими компонентларини ва қуёш нури спектрини инобатга олган ҳолда моделлаш усули тадбиқ этилган. Моделлаш қуёш нури таркибидаги алоҳида фотонни тасодифий параметрларнинг Монте-Карло усули билан кузатишга асосланган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

қуёш нурунинг фаол элементдан кўп маротаба ўтишини инобатга олиб Nd:YAG қуёш лазерини дамлашнинг янги схемаси таклиф этилган ва ишлаб чиқилган. Таклиф этилган схемага кўра оптик дамлашда анъанавий усулга кўра дамлашдагига нисбатан икки баробар юқори самарадорликка эришиш мумкинлиги кўрсатилган;

бир неча бор такрорланадиган қайтиш, синиш, ютилиш, фотолюминесценция жараёнларини, одатда ишлатилинадиган фотонлар пакети ўрнига алоҳида олинган фотонни оғирлик факторисиз таъқиб қилишга асосланган моделлаштиришнинг универсал услуби ишлаб чиқилган;

ўзига хос кўринишдаги шакли туфайли, фаол элементда қуёш нуруни кўшимча концентрация қила олиш хусусиятига эга бўлган александрит кристалли асосидаги қуёш лазерни ҳисоблаб чиқилган. Юқорида қайд этилган лазер қуёш нуруни фаол ўзгартиришнинг умумий қийматини 15% етказиш имконини беради;

компьютер симуляцияси усули орқали қуёш билан оптик дамланадиган лазерларда энергия узатиш ва сенсублизациянинг янги модели таклиф қилинган. Биринчи марта, Nd:YAG кристаллига  $\text{Ce}^{3+}$  ионларини киритиш порог қувватини 1.7 баробар камайтириши, лазернинг дифференциал самарадорлигини икки баробар ошириши ва мос равишда лазернинг чиқиш қисмидаги қувватини икки баробар ортишига олиб келиши кўрсатилган;

кўндаланг дамлашли лазер тизимида Cr:LiCAFдан қуёш спектри частотасини ўзгартирувчи сифатида фойдаланиш лазер самарадорлигининг сезиларли даражада ошишига имкон бериши кўрсатилди. Nd:YAG лазерларида бу самарадорлик 26 %, Ce:Nd:YAG лазерларида 33 % гачани бўлган қийматни ташкил этиши мумкин;

YAG керамик материалларда неодим концентрациясининг қуёш билан ишлайдиган лазерлар самарадорлигига боғлиқлиги тадқиқ этилди. Nd:YAG керамик лазерларида юқори даражадаги неодим концентрацияси қуёш энергиясини лазер энергиясига айлантириш самарадорлигининг ортишига олиб келиши, неодим концентрацияси юқори даражада бўлган Nd:Ce:YAG керамик материалдан фойдаланиш эса Nd:YAG керамик

лазеридаги самарадорликни тахминан икки баробарга ошириши кўрсатилди. Бундан ташқари, материаллардаги неодим концентрацияси шундай чегаравий қийматга эгаки, унинг бу чегаравий қийматдан ортиши лазер самарадорлигининг пасайишига олиб келади;

Nd:Cr:GSGG материалининг жуда паст иссиқлик ўтказувчанлик хусусиятига эга эканлигига қарамай, ушбу материалдан тайёрланган актив элемент асосида юқори самарадорликка эга бўлган қуёш лазерини яратиш мумкинлиги кўрсатилди. Лазернинг шундай конфигурацияси яратилдики, бу конфигурация лазер қуввати бўйича ҳозирги вақтда эришилган рекорд кўрсаткичларни 3-4 баробар ошириш имконини беради;

биринчи марта  $Ti^{3+}:Al_2O_3$  актив элементи базасида қуёш энергиясини лазер нури энергиясига айлантириш имконияти тадқиқ этилди. Концентрацияланган қуёш нури ёрдамида бўйлама оптик дамлашда кристалл ўлчамларининг оптимал геометриясини танлаш орқали генерация порогини пасайтириш имкониятининг мавжудлиги кўрсатилди;

Ce:Nd:YAG асосида қуёш билан ишлайдиган лазернинг янги самарадор схемаси таклиф этилди. Биринчи марта, Nd:YAG ўрнига Ce:Nd:YAG дан фойдаланиш бўйлама дамлашда самарадорликни 19% ошириши кўрсатилди;

биринчи марта титан-сапфирдан (Ti:Sapphire) қуёш спектри частотасини қоплаш учун ташқи сенсibiliзатор сифатида фойдаланиш таклифи киритилди. Титан-сапфирдан (Ti:Sapphire) ташқи сенсibiliзатор сифатида фойдаланиш Nd:YAG лазерларида оптик дамлаш самарадорлигининг икки баробар ортишига олиб келиши кўрсатилди;

биринчи марта Александрит ( $Cr^{3+}:BeAl_2O_4$ ) ни температура назоратили ташқи сенсibiliзатор сифатида фойдаланиш таклифи киритилди. Александритни кўндаланг дамламали лазер таркибида ишлатилганида Nd:YAG лазерни дамлаш самарадорлигини беш бараваргача ошириш имконияти кўрсатиб берилди.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари.** Қуёш нури ёрдамида оптик дамланадиган лазерлардаги физик жараёнлар учун ишлаб чиқилган компьютер моделларидан, қуёш ёрдамида шунингдек, лампа ёрдамида ва светдиодли оптик дамланадиган янги лазерни яратишда ҳамда янги лазер технологияларини ишлаб чиқишда фойдаланиш мумкин. Таклиф этилаётган қуёш нури спектри частотасини ташқи қайта ўзгартиргичларга, оптик дамлашнинг кўп маротаба ўтишли схемасига асосланган ёндашувлар, ҳамда таклиф этилган бошқа схема ёндашувлар ўзгартириш самарадорлиги юқори бўлган янги қуёш лазерларини яратиш учун кенг имкониятлар очиб беради.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** тадқиқотлар методологиясининг асосланганлиги билан, оптика ва лазер физикасининг асосланган усул ва ёндашувларидан фойдаланилганлиги, ва ишлатилган моделларни қуёш лазерлари бўйича адабиётларда келтирилган маълумотлар билан текширилганлиги, олинган натижалар сифат ва миқдор жиҳатидан баҳоланганлиги, олинган маълумотларнинг аҳамияти статистик тасдиқланганлиги билан таъминланган. Хулосаларнинг ишончлилиги қуёш

энергиясини лазер нури энергиясига айлантириш соҳасида фаолият олиб бораётган бошқа муаллифлар томонидан олинган натижалар билан уйғунлигига асосланган.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Мазкур диссертация тадқиқоти натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти, қуёш лазерларини кўндаланг оптик дамлашда янги ёндашув қуёш нури спектри частотасини ташқи қайта ўзгартиргичлардан фойдаланиш таклифи киритилганлигида ва қуёш билан оптик дамланадиган лазер симуляция моделидан назарий ва амалий тадқиқотлар ўтказиш учун фойдаланиш мумкинлигида.

Таклиф этилган моделлар, оптик дамлаш схемалари ва бошқа назарий ва техник ечимлардан қуёш энергиясини лазер энергиясига айлантириб берувчи юқори самарадорликка эга бўлган лазерларни яратишда фойдаланиш мумкин.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Муаллиф қатнашувида эълон қилинган “Solar pumped Nd: YAG laser efficiency enhancement using Cr: LiCAF frequency down-shifter” номли мақолага таклиф этилган, ташқи қайта ўзгартиргич сифатида Cr:LiCAF элементида фойдаланилган Nd:YAG лазер модели хорижий муаллифлар томонидан ишлатилган ва 20 мартадан оптик ҳаволалар берилган (Dual-rod pumping approach for tracking error compensation in solar-pumped lasers, B. D. Tiburcio, D. Liang, J. Almeida, D. Garcia and C. R. Vistas, *June 2019, Journal of Photonics for Energy* 9(2), IF:2.287; Dual-rod pumping concept for TEM<sub>00</sub>-Mode solar lasers, B.D. Tiburcio, D. Liang, J. Almeida, D. Garcia, C. R. Vistas, *May 2019, Applied Optics* 58(13), IF:1.791; Enhanced near-infrared emission in Yb<sup>3+</sup>-Cr<sup>3+</sup> codoped KZnF<sub>3</sub> glass ceramics excited by a solar simulator, X.Wang, W. Li, K.Tian, E. Lewis, S. Wang, G. Brambilla, Y. Dong, X. Wu, P. Wang, *April 2019, Ceramics International* 45(6), IF: 3.45, ва бошқалар). Олинган натижалардан фойдаланиш, муаллифларга ҳозирги кунда қуёш лазерларининг ўзгартириш самарадорлиги бўйича эришилган натижалардан сезиларли даражада юқори натижалар олиш мумкинлигини исботлаш имконини берди. Ушбу маълумотлардан, яъни янги ёндашув бўлган анъанавий Nd:YAG лазерларида қуёш нури тўлқин узунлигини ўзгартирувчи сифатида Cr:LiCAF дан фойдаланиш таклифидан, иккита хорижий олим ўз докторлик диссертацияларида фойдаланган (Advances in solar-pumped laser efficiency and brightness, J. I. L. Almeida (URI:<http://hdl.handle.net/10362/28836>) ва High-efficiency solar laser pumping by a ring-array concentrator, M. Rodrigo, (URI: <http://hdl.handle.net/10362/75821>)).

Ce:Nd:YAG асосидага лазерларни тадқиқ этишда Nd:YAG га Се қўшиш қуёш ёрдамида накачка қилинадиган лазерларнинг дифференциал самарадорлиги ошириши кўрсатилгани, ҳамда бунинг ўз навбатида лазер самарадорлигини 2 баробар ортишига олиб келиши, хорижий адабиётларда фойдаланилиб (Influence of annealing atmosphere on the optical quality and pulsed laser performance of Ce, Nd: YAG single crystal, MRA Moghaddam, D Razzaghi, JH Barbaran at. All, *Optik*, 2019, Volume 181, March 2019, Pages 941-947, IF: 1.91, Vistas, C. R., Liang, D., Garcia, D., Almeida, J., Tiburcio, B. D., & Guillot,

E. (2020). Ce: Nd: YAG continuous-wave solar-pumped laser. *Optik*, 207, 163795, IF: 2.187, Vistas, C. R., Liang, D., Almeida, J., Tibúrcio, B. D., Garcia, D., Catela, M., ... & Guillot, E. (2021). Ce: Nd: YAG side-pumped solar laser. *Journal of Photonics for Energy*, 11(1), 018001, IF: 2.12) мазкур материалнинг қуёш ёрдамида накачка қилинадиган лазерларда фаол мухит сифатида фойдаланиш учун янги истиқболли материал эканлигини исботланди. Ушбу натижалардан фойдаланиш қуёш ёрдамида накачка қилинадиган лазерлар самарадорлигини 1.6 барабар ошириш имконини берди.

Nd:YAG фаол мухитини Катта қуёш печининг битта гелиостати ёрдамида концентрация қилинган қуёш нури билан накачка қилиш шароитида фаол мухитнинг люминесцент ва лазер характеристикаларини комплекс тадқиқ этиш натижасида олинган натижалар асосида Ўзбекистон Республикаси интеллектуал мулк Агентлигига “Қўндаланг накачкали қуёш лазерларида ўзгартириш самарадорлигини ошириш учун қурилма” номли қурилмага патент олиш учун ариза рўйхатдан ўтказилди (№ IAP 2020 0030, 23.01.2020г.). Ишлаб чиқилган қурилма қуёш энергиясини лазер нури энергиясига юқори самарадорлик билан ўзгартириб берувчи қурилмалар яратиш имконини беради.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Диссертация иши натижалари 9 та халқаро ва республика илмий-амалий конференцияларда маъруза кўринишида баён этилган ва муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши.** Диссертация мазуси бўйича жами 22 та илмий иш чоп этилган. Шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларида 12 та илмий мақола, уларнинг 6 таси нуфузли халқаро ва 6 таси республика журналларида, ЭҲМ учун 1 дастур рўйхатдан ўтказилган, 9 та маъруза халқаро ва республика конференцияларининг тўпламларида нашр этилган.

**Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши.** Диссертация таркиби кириш, бешта боб, хулоса, 112 номдаги фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловадан иборат. Диссертациянинг ҳажми 150 бетни ташкил этади, 70 та расм ва 2 та жадвалдан иборат.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш** қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари тафсифланган, тадқиқотнинг объекти, предмети ва усуллари аниқланган, илмий янгилиги, олинган натижаларнинг илмий амалий аҳамияти баён этилган, олинган натижаларнинг ишончилиги асосланган, натижаларнинг жорий этилиши, ишнинг апробацияси ва диссертациянинг тузилиши бўйича қисқа маълумот берилган.

Диссертациянинг биринчи боби **“Қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерлар ва мавжуд муаммолар”** деб номланиб, диссертация ишининг мавзуси бўйича адабиётларда келтирилган маълумотлар таҳлил қилинган ва хулосалар чиқарилган: диссертация ишининг мавзуси бўйича чоп этилган ишларнинг кўплигига қарамай, қуёш лазерларидаги ўзгартириш самарадорлиги 4-5,1% даражасида қолмоқда. Ушбу соҳада ҳал этилмаган муаммолар аниқланди, ва уларга асосланган ҳолда мазкур илмий ишнинг мақсади ва вазифалари шакллантирилди.

Диссертациянинг иккинчи боби **“Қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерларни моделлаш”** деб номланиб, ушбу бобда фойдаланилган қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерларнинг статистик моделларига, мавжуд моделларни такомиллаштириш учун ишлаб чиқилган янги модулларга тафсиф берилган, фаол элементнинг иссиқлик характеристикаларини ҳисоблаш учун аналитик иборалар келтириб чиқарилган. Мазкур диссертация ишида, оптимал ечимларни аниқлаш, ҳамда қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерлар самарадорлигини оширишнинг турли хил механизмларини назарий жиҳатдан тадқиқ этиш учун, турли конструкциядаги лазерларни моделлаштириш орқали физик жараёнларни симуляция қилишга асосланган усулидан фойдаланилган.

Диссертация мавзуси бўйича олиб борилган тадқиқотларда ишлатилган қуёш лазери схемасини моделлаш Монте-Карло ва нурни кузатиш (трассировка) усули орқали бажарилди. Моделлаштириш методи аввалроқ ишлаб чиқилган эди. Ушбу рақамий моделлашнинг моҳияти кесишиш нуқталари кетма-кетлигини, қайтиш, синиш, ютилиш ва фотон чиқариш каби элементар жараёнларни моделлаш ва геометрик оптикадан фойдаланган ҳолда аниқлашдан иборат. Моделлашнинг охирги натижаси, инверс бандликни яратишда иштирок этадиган фаол муҳитда ютилган фотонлар улушини, яъни оптик дамлаш самарадорлигини  $\eta_p$  ва фаол муҳитда ютилган қувват тақсимотини аниқлашдан иборат.

*Қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерларнинг статистик модели* такомиллаштирилди, хусусан Ce:Nd:YAG асосида икки карра фаоллаштирилган муҳитли қуёш лазерларида энергия узатиш ва сенсбилизация жараёнларини симуляция қилувчи модел қўшилди.

Маълумки, сенсбилизация – шундай жараёнки унда сенсбилловчи ионлар (донорлар) томонидан ютилган қўзғалиш энергияси, фаол ионларга (акцептор) нурланишсиз (радиациясиз узатиш) ёки нур чиқариш (радиациялиузатиш) механизми орқали узатилади. Масалан, Ce:Nd:YAG

холида Се ионлари сенсбилловчи, яъни донор ионлар бўлиб, улар энергияни ютади ва узатади, Nd ионлари бўлса акцептор ионлар ҳисобланади.

Нур чиқариш орқали амалга ошириладиган энергия узатиш кристаллнинг ўлчами ва шаклига боғлиқ. Донор флуоресценция структураси акцептор концентрациясига боғлиқ бўлади, лекин донорнинг радиацияли яшаш вақти акцептор концентрациясининг ўзгаришига боғлиқ эмас. Донор ва акцептор ионлари орасидаги анъанавий бўлмаган энергия узатиш уйғонишнинг тўғридан тўғри узатилиши ёки мураккаброқ жараёнлар, шу жумладан донор ионлар орасидаги уйғониш энергиясининг миграцияси орқали амалга ошиши мумкин. Донор ионлари самарали яшаш вақтининг қисқаришига олиб келувчи нурланишсиз энергия узатиш самарадорлиги донор флуоресценцияси сўниши графигидан қуйидагича аниқланиши мумкин:

$$\eta_{NET} = 1 - \tau_x / \tau_0$$

бу ерда  $\tau_x$  ва  $\tau_0$   $\text{Ce}^{3+}$  намуналарининг мос ҳолда  $\text{Nd}^{3+}$  концентрациясининг  $x$  ва  $x = 0$  бўлгандаги самарали яшаш вақти.

$\text{Ce}^{3+}$  люминесценциясини  $\text{Nd}^{3+}$  ионлари томонидан реабсорбцияси орқали амалга ошувчи  $\text{Ce}^{3+}$  дан  $\text{Nd}^{3+}$  га радиацион энергия узатиш жараёни  $\text{Ce}^{3+}$  нурланиш спектри билан  $\text{Nd}^{3+}$  ютиш спектрларининг устма-уст тушиш даражаси билан аниқланади.

Нурланишли ҳамда нурланишсиз энергия узатиш жараёнларини моделлаштириш учун фотоннинг ютулгунга қадар босиб ўтиши мумкин бўлган йўл узунлиги  $l$  ни қуйидагича аниқлаймиз

$$l = -\frac{\ln \xi}{\mu}$$

(бу ерда  $\xi$  – тасодифий сон,  $\mu$  - берилган тўлқин узунлигидаги ютилиш коэффициенти). Биз Се: Nd: YAG нинг ютилиш спектрини донор ва акцептор ионлар концентрацияси етарлича кичик бўлган ҳол учун қуйидагича кўринишда фойдаланамиз

$$\mu = \mu_1 + \mu_2$$

бу ерда  $\mu_1$  ва  $\mu_2$  - Nd: YAG ва Се: YAG ларнинг мос ҳолда тақиб қилинаётган қуёш нурининг берилган тўлқин узунлигидаги ютилиш коэффициенти. Радиациясиз ва радиацияли энергия узатиш жараёнларини ҳисобга олиш учун ушбу жараёнлар эҳтимолликларини мос ҳолда қуйидагича аниқлаймиз:

$$p_1 = \eta_{NET}(1 - \exp(-\mu_2 l)) \quad \text{ва,}$$

$$p_2 = (1 - \eta_{NET})(1 - \exp(-\mu_2 l))$$

бу ерда  $p_{Ce} = p_1 + p_2 = 1 - \exp(-\mu_2 l)$  - Ce:YAGда ютилиш эҳтимоллиги ва худди шунга ўхшаш Nd:YAGда ютилиш эҳтимоллигини куйидагича аниқлашимиз мумкин:

$$p_{Nd} = 1 - \exp(-\mu_1 l)$$

Сўнгра, ушбу ифодалардан фойдаланган холда энергия узатишнинг радиацияли қисми эҳтимоллигини аниқлаш учун куйидаги ифодани ёзишимиз мумкин:

$$\delta = \frac{p_2}{p_{Nd} + p_{Ce}}$$

Nd: YAG да ютилиш ҳамда Ce: YAG дан радиациясиз энергия узатиш куёш фотони ютилганидан сўнг юқори лазер сатҳида инверс атомларни ҳосил қилишга бевосита ҳисса қўшиши сабабли, модел радиацияли энергия узатиш жараёни содир бўлишинигина текширади. Бунинг учун  $[0...1]$  интервалдаги тасодифий сон генерация қилинади ва  $\delta$  билан солиштирилади. Агар тасодифий сон  $\delta$  дан катта бўлса натижалар регистрация қилиниб, тақиб қилиш жараёни тўхтатилади. Акс холда эса Ce: YAG нинг люминесценция спектридан фойдаланган холда эмиссия жараёни моделлаштирилади ва янги фотонни тақиб қилиш у реабсорбцияга учрамагунча ёки системани тарк этмагунча давом эттирилади.

*Чиқиш қувватини ҳисоблаш.* Шундай қилиб, олидинги бўлимларда дамлаш самарадорлиги  $\eta_p$  ни нурни Монте-Карло усули билан тақиб қилишни моделлаштириш орқали аниқлаш усуллари баён этилган эди. Олинган дамлаш самарадорлиги кейинги босқичларда тўрт-сатҳли лазерлар учун маълум бўлган ифода ёрдамида лазер нури чиқиш қувватининг киришдаги куёш нури қувватига боғлиқлигини аниқлашда фойдаланилади.

*Фаол муҳит температурасини баҳолаш.* Диссертация ишида фаол муҳитдаги температура тақсимотини аниқлаш учун содда холларда кўриб чиқиладиган лазер тизими схемасига хос бўлган аналитик ифодалар келтириб чиқарилди, аналитик усулда ечиш имконияти бўлмаган холларда эса иссиқлик ўтказувчанлик тенгламасини рақамли ечиш усуллари билан фойдаланилди.

Ишлаб чиқилган моделнинг иш қобилиятини ва олинган натижаларнинг ишончлилигини текшириш учун адабиётларда келтирилган мавжуд лазерларни моделлаштириш амалга оширилди. Натижаларни солиштириш қониқарли мосликни ва шу билан бирга моделнинг яроқлилигини, натижаларнинг ишончлилигини кўрсатиб, ишлаб чиқилган моделдан янги самарадор куёш лазерларини тадқиқ этиш, ишлаб чиқиш ва параметрларини оптималлаштиришда фойдаланиш мумкинлигини тасдиқлади.

Шундай қилиб, ишлаб чиқилган модел янги самарадор куёш лазерларини ишлаб чиқиш ва параметрларини оптималлаштиришда қўлланилиши мумкинлиги кўрсатилди.

Юпқа пластинка ёки диск кўринишидаги фаол муҳит, ҳамда шаффоф ташқи қобик ва ажив ионли ўзакка эга бўлган композит фаол муҳитларни бир

текис оптик дамлашда температура майдонини ҳисоблаш учун аналитик ифодалар келтириб чиқарилди.

**“Сенсибилизаторсиз қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерларни оптимал схемасини аниқлаш учун рақамий тажрибалар”** деб номланган учинчи бобда диод ёки лампали оптик дамлашда қўлланилиб келаётган турли хил фаол муҳитлар асосида қуёш лазерлари яратиш бўйича тадқиқотлар натижаси келтирилган. Оптик дамлаш схемаси ва лазер конструкциясининг оптимал вариантларини танлаш мақсадида бир қатор фаол элементлар (Nd:YAG, Ti:сапфир, Александрит) ҳамда оптик дамлаш схемасининг турли вариантлари учун ишлаб чиқилган модел асосида, симуляциявий ҳисоблар орқали самарали лазер генерациясини олиш имкониятлари бўйича кенг таҳлил ишлари амалга оширилди. Nd:YAG фаол элементи ва унинг композит вариантлари асосидаги лазерларнинг кўриб чиқилган конструкциялари учун температура режимлари тадқиқ этилди. Умумий самарадорликни деярли икки баробар ошириш, иш жараёнида фаол муҳит ва ташқи сенсибилизаторлардан фойдаланиш учун энг мақбул иссиқлик шароитларини таъминлаш имконини берувчи қуёш лазерларининг кўндаланг кўп ўтишли дамлаш схемасини амалга ошириш учун янги содда ёндашув таклиф этилди.

Nd:YAG га нисбатан генерация порогои жуда юқори бўлган ва шу сабабли олдин қуёш лазерлари учун фаол элемент сифатида қаралмаган,  $Ti^{3+}:Al_2O_3$  фаол муҳити асосида қуёш нури энергиясини лазер нури энергиясига айлантириш имкониятлари тадқиқ этилди. Компьютер симуляцияси усули билан генерация порогини, концентрацияланган қуёш нури билан бўйлама оптик дамлашда кристалл параметрларининг оптимал геометриясини танлаш ҳисобига камайтириш имконияти аниқланди.

Олинган натижалар асосида  $Ti^{3+}:Al_2O_3$  фаол муҳитли лазерларда Nd:YAG да олиш мумкин бўлган генерация қувватидан кам бўлмаган қувватга эришиш мумкинлиги кўрсатилди.

Ютиш спектри қуёш нури спектрининг катта қисмини қамраб оладиган яна бир лазер материали александрит ( $Cr^{3+}:BeAl_2O_4$ ) бўлиб, унинг иссиқлик ўтказувчанлиги Nd:YAGнинг иссиқлик ўтказувчанлигидан қарийиб икки баробар ортиқ. Лекин, александрит асосидаги лазер юқори генерация порогига эга бўлганлиги сабабли, қуёш энергиясини лазер энергиясига айлантириш соҳасида кенг тарқалмади.

Шу сабабли, александритга ўхшаш фаол муҳит асосидаги қуёш лазерларининг генерация порогини камайтириш учун мазкур ишда, материалларни ишлаб чиқариш технологиялари соҳасида эришилган сўнги ютуқлар туфайли ҳозирги вақтда ишлаб чиқариш имконияти мавжуд бўлган композит лазер материалларидан фойдаланишга асосланган янги ёндашув таклиф этилди. Бу ерда диффуз пайвандлаш технологияси ва шаффоф керамика ишлаб чиқариш технологияларидан фойдаланиш орқали олинган композит материаллар назарда тутилмоқда

Диссертация иши доирасида композит структурали александрит асосидаги қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерлар самарадорлигини

ошириш имкониятлари тадқиқ этилди. Турли хил, ҳусусан бир жинсли стержен, фаоллаштирилган ўзакли стержен, ва парабола кўринишидаги композит структура вариантлари кўриб чиқилди. Моделлаштириш диаметри 1м. ва фокус масофаси 0.5м бўлган парабolik концентратор учун амалга оширилди.

Лазер генерация порогининг энг кўп камайишига, парабола формаси туфайли композит фаол элементнинг ўзида қуёш нурунинг қўшимча концентрациясига эришиш мумкинлиги сабабли, парабола кўринишидаги композит фаол элементдан фойдаланилганда эришилди (1-расм).

Композит фаол муҳит фаол ўзагининг узунлиги ва диаметри, ишчи характеристикаларни оптималлаштириб, оптик дамлаш самарадорлиги ва лазер чиқиш қувватини максимал даражага етказиш учун ўзгартирилди.

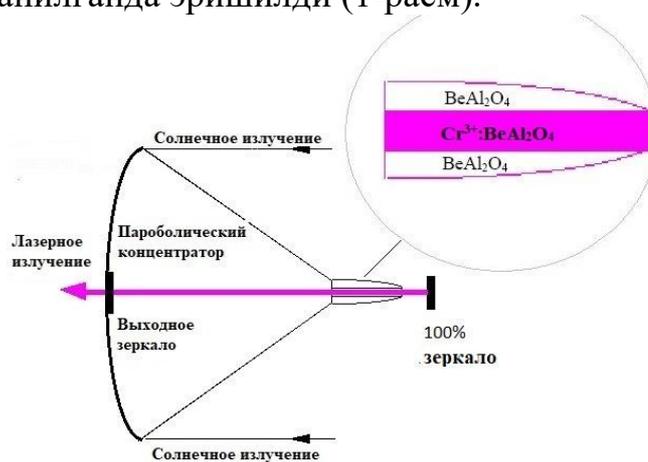
Иккита композит фаол муҳит вариантлари учун олинган натижаларни солиштириш шуни кўрсатдики, олд қисмида шаффоф соҳасининг узунлиги 5мм бўлган композит фаол

муҳитдан фойдаланиш оптик дамлаш тақсимодининг бир текис бўлишига, ва бу эса ўз навбатида олд юзага тушадиган иссиқлик юкласининг камайишига ва шу жумладан кристаллнинг бузилиши каби номақбул иссиқлик эффектларининг олди олинишига олиб келади.

Ҳисоблар қайтариш коэффициенти 90% бўлган чиқиш ойнаси, мажбурий нурланиш кесими  $0.5 \times 10^{-20} \text{ см}^2$  ва флуоресценциянинг яшаш вақти 260 мкс бўлган хол учун амалга оширилди. Лазер чиқиш қувватининг қуёш нурунинг киришдаги қувватига боғлиқлиги Зрасмда келтирилган. Расмдан дифференциал самарадорлик (ФИК) 17,5%ни, тўлиқ ФИК - 14,5%дан ортиқроқ қийматни ташкил этиши кўриниб турипти, бу эса мавжуд қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерлар кўрсаткичидан бир неча баробар юқори.

*Кўп ўтишли кўндаланг оптик дамлаш.* Лазер тизимларида асосан икки хил оптик дамлаш схемаси ишлатилади, булар бўйлама ва кўндаланг дамлаш схемаларидир.

Бўйлама дамлаш схемаси энг самарадор дамлаш схемаси ҳисобланади, лекин бу схема лазер муҳити ичидаги стержн ўқи бўйлаб бир текис ютилишни таъминлайди, бу эса ўз навбатида шу билан унга боғлиқ иссиқлик юкламалари муаммосининг камайишига олиб келади. Кўндаланг дамлаш конфигурацияси билан олинган қуёш лазер нурунинг сифати, бўйлама дамлаш



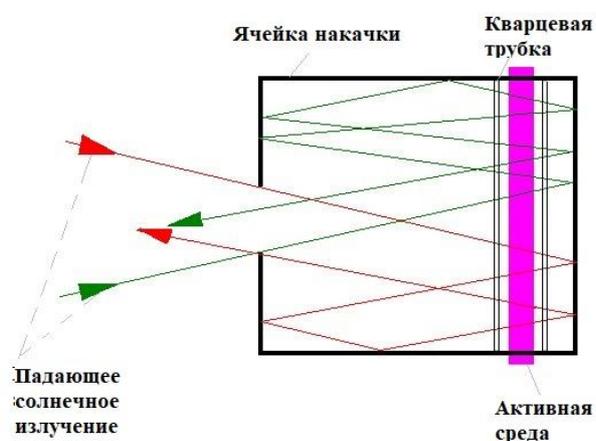
1-расм. Таклиф этилаётган лазер конструкциясининг схематик кўриниши. Киритма-композит фаол муҳит

конфигурацияси билан олинган нур сифатидан яхшироқ бўлиши мумкин. Кўндаланг дамлаш схемаси масштаблаш учун бўйлама дамлаш схемасига нисбатан қулай ҳисобланади. Аммо, фаол муҳит кўндаланг ўлчамларининг бўйлама ўлчамларига нисбатан анча кичиклиги туфайли, одатда кўндаланг дамлаш лазерларидаги ютилиш самарадорлиги, бўйлама дамлаш лазерларидаги кўрсаткичдан икки баробор кичик бўлади. Шусабабли кўндаланг дамлаш лазерларидаги ютилиш самарадорлигини ошириш учун, диод дамлашли қаттиқ жисмли лазерларда фаол муҳитни юқори даражада легирлаш ёки ретро-қайтариш каби ёндашувлардан фойдаланилади. Бу ҳар икки ёндашув ҳам лампавий ва қуёш билан оптик дамлаш орқали лазер олишни амалга оширишда муаммоли ҳисобланади, чунки фаол муҳит неодим билан легирланган хол учун, неодим ионларининг максимал концентрацияси концентрация ўчишлари билан чекланган.

Бошқа томондан, концентрацияланган қуёш нури диодли лазер нури каби параллел бўлмаганлиги туфайли, самарали кўп ўтишли дамлашни таъминлаш ҳам қийин. Шу мақсадда мазкур ишда кўндаланг дамлаш асосидаги қуёш лазерларидаги ютилиш самарадорлигини ошириш учун, юпка-диск лазерларидаги кўп марталаб қайтиш (ретро-рефлектор) усули каби самарадор бўлган, кўп ўтишли оптик дамлаш имкониятини берадиган, янги, оддий ёндашув таклиф этилмоқда. У деворларининг ички қавати юқори даражада қайтаришни таъминлаши учун кумуш билан қопланган маҳсус дамлаш камерасидан фойдаланишга асосланган. Дамлаш камераси тўртбурчак шаклидаги қути бўлиб, унинг олд девори ретро-рефлектор вазифасини ўтайди, ва бу унинг кўндаланг дамлашли қуёш лазерларида ишлатиладиган мавжуд дамлаш камераларидан асосий фарқи ҳисобланади. Дамлаш камерасининг кейинги асосий фарқи, бу унинг фаол муҳит узунлиги бўйлаб дамлашнинг бир текис тақсимланишини таъминлайдиган гомогенизатор (металл световод) вазифасини ҳам бажаришидадир. Олд деворда диафрагма бўлиб, у орқали концентраторнинг (параболик тарелка ёки Френел линзаси) фокал текислигида концентрацияланган қуёш оқими дамлаш камерасига киритилади. Кўп ўтишли дамлашнинг принципал схемаси 2-расмда келтирилган.

Фаол муҳитнинг шакли - текис параллел пластинка бўлиб, кўндаланг дамлашда иссиқликни самарали олиб чиқиб кетиш имконини беради. Концентратор сифати диаметри 1м бўлган параболик концентратор олинди. Кўп ўтишли конфигурация лазер чиқиш қувватини икки баробар ошириши мумкинлиги кўрсатилди.

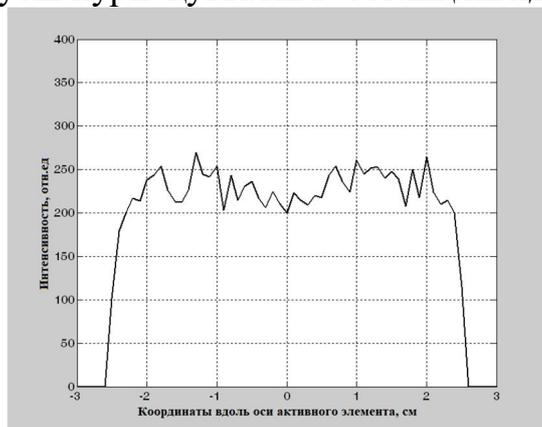
Самарадоликни янада ошириш учун Nd:Ce:YAG фаол муҳитдан



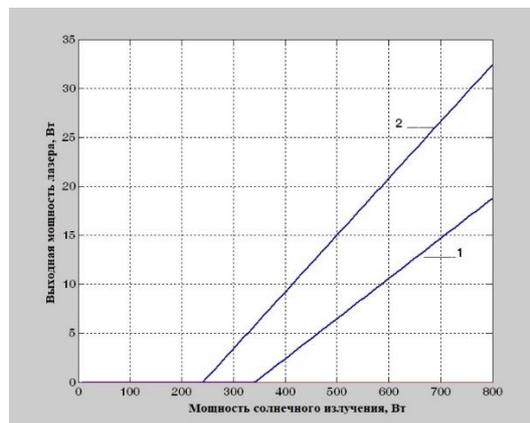
2-расм. Кўп ўтишли кўндаланг дамлаш схемаси

ёки ташқи сенсбилизатордан фойдаланиш мумкин.

Таклиф этилаётган схема умумий самарадорликни деярли икки баробар оширади, фаол мухит ва ишлатилаётган сенсбилизатор учун қулай иссиқлик шароитларини таъминлайди. Кўрилаётган конфигурацияни моделлаштириш натижалари 3 ва 4 расмларда кўрсатилган, булар мос равишда ретро-рефлекторли конфигурация учун фаол мухит ичида ютилган фотонларнинг мухит узунлиги бўйича тақсимооти ва чиқиш қувватининг оптик дамлашдаги қуёш нури қувватига боғлиқлигидир.



3-расм. Кенглиги 50мм, узунлиги 40мм ва баланлиги 10мм бўлган дамлаш камераси учун ютилган фотонларнинг ўлчамлари 50x8x4 мм<sup>3</sup> бўлган фаол мухит узунлиги бўйлаб тақсимооти



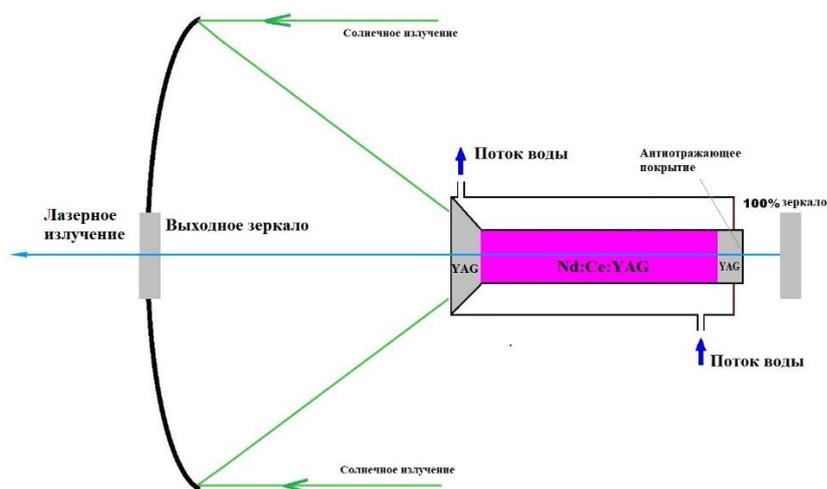
4-расм. Ўлчамлари 50x8x4 мм<sup>3</sup> бўлган Nd:YAG учун лазер чиқиш қувватининг киришдаги қуёш нури қувватига боғлиқлиги. 1-ретро-қайтаргичсиз, 2-ретро-қайтаргич билан

Ушбу бобда асоси тўғри тўртбурчак бўлган кесик пирамида кўринишидаги иккиламчи концентраторлардан фойдаланган холда, Катта қуёш печининг битта гелиостатидан олинадиган концентрацияланган оқим билан дамланадиган лазер яратиш имкониятларини тадқиқ этиш натижалари ҳам келтирилган. Моделлаштириш 7.5x6.5м<sup>2</sup> ўлчамли битта гелиостат учун амалга оширилди. Кўндаланг дамланадиган Nd:YAGлазер схемаси кўрилди ва таклиф этилаётган лазер схемаси иккиламчи концентратор билан биргаликда битта гелиостатдан 400Вт дан ортиқ лазер чиқиш қувватини олиш имконини бериши кўрсатилган.

**“Ички сенсбилизаторли қуёш лазерлари учун рақамли тажрибалар”** деб номланувчи тўртинчи бобда қуёш спектрининг қисқа тўлқинли қисмидан ютиш зонасига энергияни узатувчи қўшимча фаол ионлар билан легирланган фаол мухитлар (Ce:Nd:YAG, Nd:Cr:GSGG) асосидаги лазерлар конструкцияларининг самарадор вариантини ишлаб чиқиш ва яратиш учун турли хил оптик дамлаш схемалари тадқиқ этилди.

Ички сенсбилизаторли қуёш ёрдамида дамланадиган лазерларни тадқиқ этиш учун, Ce: Nd: YAGдан фаол мухит сифатида фойдаланиб, ишлаб чиқилган қуёш лазерининг симуляция қилиш учун мўлжалланган, сенсбилизация жараёнини инобатга олувчи моделдан фойдаланилди. Ўрганилаётган схема 5 расмда кўрсатилган.

Амалга оширилган моделлаштириш натижарининг таҳлили Ce:Nd: YAG ни қўллаш, Ер сиртида одатдаги қуёш радиацияси  $800 \text{ Вт/м}^2$  бўлган ҳолда қуёш нурини лазер нурига айлантириш самарадорлигини 1.5 баробардан кўпроқ ошириб, қилинган таҳминларни тасдиқлади.



5-расм. Лазернинг умумий схемаси

Ҳисоблашлар диаметри 1м ва Nd: YAG параметрларининг стандарт қийматлари, ўлчами  $10 \times 50 \text{ мм}$  ва церий концентрацияси 0.5% бўлган ҳол учун амалга оширилди.

Шундай қилиб, симуляция усулидаги ҳисоблашлар Nd: YAG ўрнига Nd: Ce: YAG дан фойдаланиш дамлаш самарадорлигини 14% (Nd: YAG учун) дан 19%гача ошириш, порог қувватини эса деярли 1.5 баробар камайтириш мумкинлигини кўрсатди.

Ушбу бўлимда қуёш лазерларида айлантириш самарадорлигини ошириш имкониятларини ўрганиш мақсадида таркибида катта миқдорда неодим бўлган керамик YAG асосидаги қуёш лазерларини ҳам моделлаштириш амалга оширилди.

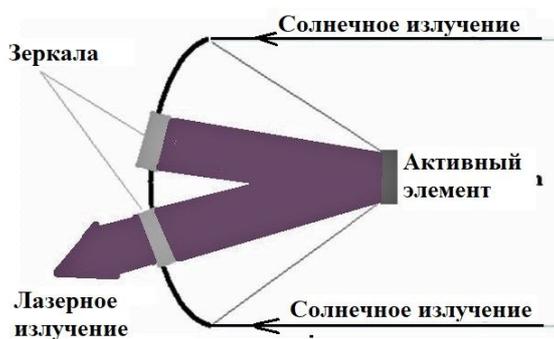
YAG материалларида фаол ионлар концентрациясининг оширилиши одатда лазер юқори сатҳи яшаш вақтининг камайишиги (концентрацион сўнишига) олиб келади. Бундан ташқари, фаол ионлар концентрациясининг оширилишига сочилишдаги йўқолишларнинг ортиши ҳам ҳамроҳлик қилади. Буларнинг иккаласи ҳам лазерни дамлаш қуввати чегаравий қийматини ошириши мумкин. Иккинчи томондан фаол ионлар концентрациясининг ошиши билан концентрацияга пропорционал равишда ютилиш эҳтимоллиги чизикли (биринчи яқинлашишда) ортади.

Ушбу тадқиқотнинг мақсади лазер самарадорлиги ошишига олиб келадиган ютилишнинг ортиш эффекти билан қолган иккита жараёнларнинг умумий эффектидан устунликни таъминлайдиган ўзаро рақобатлашувчи қайд этилган жараёнлар орасидаги компромиссни аниқлашдан иборат эди. Бунинг учун бўйлама ва кўндаланг дамланадиган лазер, шу жумладан диск типидagi лазер конфигурациялари кўриб чиқилди. Лекин дастлабки таҳлиллар шуни кўрсатдики, энг истиқболли конфигурация бу диск типидagi лазер конфигурацияси экан (6 расм).

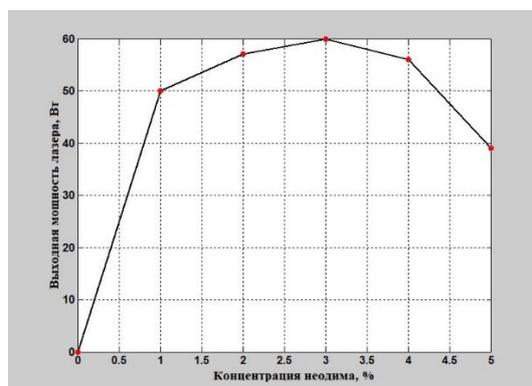
Nd:Ce:YAG фаол муҳити учун олинган моделлаш натижалари 7-расмда келтирилган.

Расмдан кўришиб турибдики рақобатлашувчи учта жараён орасида кутилаётган компромисс мавжуд бўлиб, у ютилишнинг ортиш эффекти концентрацион сўниш ва йўқолишларнинг ортиш умумий эффектидан юқори бўладиган ва бунинг натижасида лазер самарадорлигининг икки марта ошадиган, керамик ва кристалл YAG материалларида неодим концентрациясининг старт қийматларига нисбатан 3%ли концентрациядаги максимумга тўғри келади.

Керамик Nd:YAG лазерда неодимнинг юқори концентрациясидан фойдаланиш куёш энергиясини лазер энергиясига айлантириш самарадорлиги ортишини таъминлаши кўрсатилди. Неодим концентрацияси юқори бўлган керамик Nd:Ce:YAG материалдан фойдаланиш керамик Nd:YAG лазер самарадорлигини икки карра оширади.



6-расм. Фойдаланилган икки ўтишли схема



7-расм. Nd:Ce:YAG асосидаги керамик диск лазер учун лазер чиқиш қувватининг неодим концентрациясига боғлиқлиги

*Паст иссиқлик ўтказувчанлигига эга булган фаол муҳитлар асосидаги куёш лазерлари.* Nd:YAG лазер материаллари етарлича юқори иссиқлик ўтказувчанликка ва дамлаш порогининг паст даражаси туфайли кўп қўлланилаётган бир пайтда, ютилиш спектрининг куёш спектри билан мос тушиши, дамлаш порогининг Nd:YAGникидан пастлиги каби характеристикалари бўйича устунликка эга бўлган Nd:Cr:GSGG лазер материали куёш лазерларида фойдаланиш учун деярли кўриб чиқилмайди.

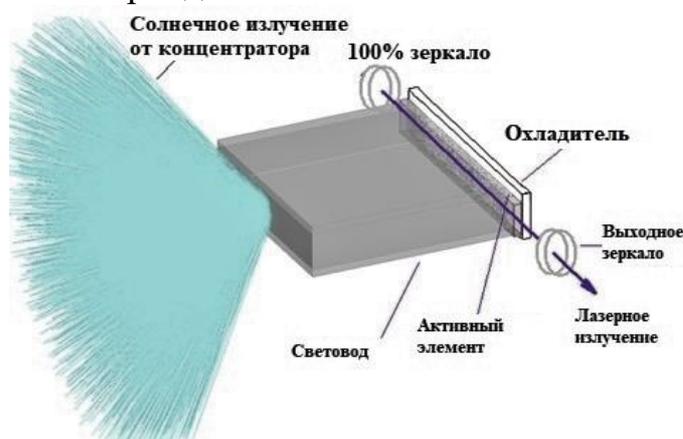
Бунга сабаб Nd:Cr:GSGG лазер материалининг иссиқлик ўтказувчанлиги Nd:YAG материаленикидан деярли икки марта кичик. Шунинг учун мазкур ишда Nd:Cr:GSGG билан боғлиқ бўлган муаммоларини ечиш, айнан самарали иссиқликни олиб чиқиб кетиш ва шу билан бирга куёш энергиясини лазер нури энергиясига самарали айлантириш шароитларини таъминлаш имкониятлари тадқиқ этилди. Nd:Cr:GSGG фаол мухити диаметри 1м бўлган параболик концентратор фокусидаги концентрация қилинган куёш нури билан кўндаланг дамлашда самарали иссиқликни олиб чиқиб кетишни таъминловчи юпқа пластинка кўринишига эга.

Мумкин бўлган турли схемалар кўриб чиқилди. Конструкциянинг юқоридаги талабларга жавоб берадиган оптимал вариантларидан бири 8 расмда кўрсатилган.

Мазкур конфигурацияда ютилиш самарадорлиги бўйича олинган натижа 31%ни ташкил этди.

Сўнгра ютилиш самарадорлигини ҳисобга олган ҳолда бир ўлчовли иссиқлик ўтказувчанлик тенгласини ечиб, фаол муҳитда температура динамикасини ҳисоблашлар амалга оширилди.

Натижалар шуни кўрсатдики, фаол муҳитнинг ўртача температураси  $50^{\circ}\text{C}$  дан паст бўлган чегарада ушлаб турилиши мумкин ва бу Nd:Cr:GSGG фаол муҳити асосидаги лазернинг нормал ишлаши учун етарли бўлган шароитни таъминлайди. Ушбу натижалар асосида ва 90% га яқин деб ҳисобланадиган хромдан недимга энергия



8-расм. Куёш лазер тизимининг схемаси

узатиш самарадорлигини ҳисобга олган ҳолда тўрт сатҳли и лазерлар учун ифодадан фойдаланиб лазер нури чиқиш қувватининг куёш нури қувватига боғлиқлиги ҳисобланди.

Натижалар кўрсатишича, таклиф этилаётган конфигурация лазер қувватини, ҳозирги вақтгача эришилган рекорд қиймати  $30\text{Вт}/\text{м}^2$  га нисбатан сезиларли (3-4 марта) даражада ошириши мумкин экан. Бундан ташқари таклиф этилаётган конфигурация шу вақтга қадар кўрилмаган концентрацияланган куёш нури билан дамлашга яроқсиз деб ҳисобланган, иссиқлик ўтказувчанлиги паст бўлган бошқа лазер материалларидан ҳам фойдаланиш имкониятини бериши мумкин.

**“Куёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерлар самарадорлигини ошириш учун ташқи сенсбилизаторлар ёрдамида куёш спектри частотасини ўзгартириш”** деб номланган бешинчи бобда Cr:LiCAF, Ti:сапфир ва Александритлардан ташқи сенсбилизатор сифатида фойдаланиб Nd:YAGли куёш лазерлари самарадорлигини ошириш имкониятларини тадқиқ этиш натижалари келтирилган. Куёш нури спектрини ўзгартиришнинг асосий механизмлари тафсилоти берилган.

Куёш нури спектрини ўзгартиришдан мақсад лазерни оптик дамлаш самарадорлигини куёш спектрининг ишлатилмай қолган қисми частотасини **ички ва ташқи частота ўзгартиргичлар** ёрдамида фаол муҳитнинг ютиш полосаси томонга суриш ҳисобига оширишдан иборат. Куёш нури спектрини турли усуллар ёрдамида ўзгартириш мумкин, хусусан фаол ионли матрицага турли қўшимча ион-сенсбилизаторларни киритиш орқали ҳосил қилинадиган ички сенсбилизаторлардан фойдаланиб амалга ошириш мумкин. Лекин, бу ҳолда дамлаш самарадорлигининг ортиши билан бир пайтда катта миқдордаги иссиқлик энергияси ажралиб чиқади ва бу фаол элемент лазер характеристикаларининг ёмонлашувига, баъзан унинг ишдан

чиқишига олиб келиши мумкин. Бунга мисол тариқасида самарали лазер материали сифатида қаралган Nd:Cr:YAG асосидаги фаол муҳитда ўтказилган тажрибаларни келтириш мумкин, лекин ушбу фаол муҳитда тажриба маълумотларига кўра қуёшли ёки лампали дамлаш вақтида юзага келган иссиқлик эффектлари олинган ўзгартириш самарадорлигининг ортишига нисбатан салмоқли эканлиги кузатилган. Шу сабабли, яқинда биз томондан ташқи қуёш нури частотасини ўзгартиргичлардан фойдаланишга асосланган янги концепция таклиф қилинган эди.

Янги концепциянинг моҳияти шундан иборатки, унда фаол муҳитга иссиқ юкламасини камайтириш мақсадида сенсбилизатор фаол муҳитдан ажратилади, яъни фаол муҳит ва сенсбилизатор алоҳида ишлатилади. Бу эса фаол ва сенсбилазиция қилувчи ионлар учун турли матрицалардан фойдаланиш имконини беради. Бундан ташқари, турли хил сенсбилизаторларни (частота ўзгартиргичларни) комбинацияларидан шу жумладан турли хил матрицалардан фойдаланиш имкониятларини кенгайтиради.

Қуёш нури спектрининг ишлатилмай қолган қисми частотасини ўзгартиришнинг турли механизмлари мавжуд. Лекин уларнинг ичида энг самаралиси “down-shift” га асосланган механизм бўлиб, унда юқори энергияли фотон бошқа бир паст энергияли фотонга иссиқлик ажратиш орқали айланади.

*Титан-сапфир асосидаги ташқи частота ўзгартиргичли қуёш лазерлари.* Юқорида қайд этилган механизмнинг устунлиги бу ерда Титан-сапфир асосидаги частота конвертери буйлама дамлаш схемасидаги Nd:YAG фаол муҳитли қуёш лазери мисолида намоён этилди.

Композит структурали Титан-сапфирдан қуёш нури спектри частотасини сурувчи элемент сифатида фойдаланиб Nd:YAG лазери дамлаш самарадорлигини икки баравардан ортиқ ошириш имконияти симуляция усули билан кўрсатилди.

Лазернинг асосий фактори бўлган - дамлашнинг умумий самарадорлигини аниқлаш учун симуляцион ҳисоблашлар амалга оширилди. Шундай қилиб олинган натижалар Nd: YAG + Ti: сапфир учун 0.21 тенглиги аниқланди, ушбу курсаткич Nd: YAG учун 0.14 га тенг.

*Cr: LiCAF частота конвертери ва кўндаланг дамлаш схемасидаги Nd:YAG фаол элемент асосидаги лазер.* Лазер стенди конструкциясининг юқори самарадорликка эга бўлган вариантини ишлаб чиқиш учун турли хил схемалар ўрганиб чиқилди, хусусан тадқиқотларнинг биринчи босқичда буйлама дамлаш схемаси кўриб чиқилди

Ташқи қуёш нури спектри частота ўзгартиргичидан фойдаланиб кўндаланг дамлашли Nd:YAG қуёш лазерини дамлаш самарадорлигини ошириш имкониятлари симуляция усули билан ўрганилди. Ташқи частота ўзгартиргичи сифатида Cr<sup>3+</sup>:LiCAF кўриб чиқилди, чунки унинг устун хусусиятлари Cr<sup>3+</sup>:GSGG хусусиятлаги ўхшаш. Cr<sup>3+</sup>:LiCAF 425 нм ва 625 нм соҳасида, қуёш спектрининг кенг соҳасини қоплайдиган иккита кенг ютиш полосасига, ва 780нм соҳасида Nd:YAGнинг кучли ютиш чизиқлари билан устма -уст кенг нуруланиш полосасига эга (9 расм).

Ушбу бўлимда  $\text{Cr}^{3+}:\text{LiCAF}$  дан  $\text{Nd}:\text{YAG}$  қуёш лазери учун ташқи частота ўзгартиргичи сифатида фойдаланиб кўндаланг ва бўйлама дамлашларнинг қиёсий таҳлили амалга оширилди.

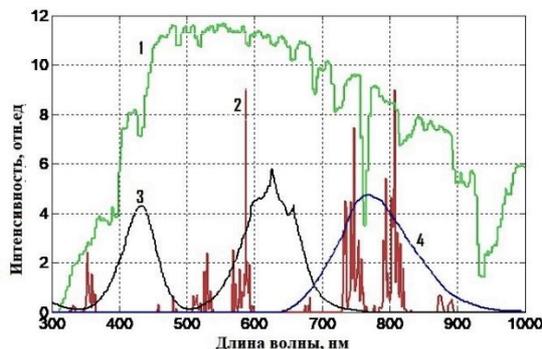
$\text{Cr}:\text{LiCAF}$  дан ташқи частота ўзгартиргичи сифатида фойдаланиш ҳар иккала ҳолда ҳам  $\text{Nd}:\text{YAG}$  фаол мухитини дамлаш самарадорлигини катта миқдорга ошириши кўрсатилди. Бундан ташқари  $\text{Nd}:\text{YAG}$  ни церий Се билан легирланган  $\text{Nd}:\text{YAG}$ га алмаштириш самарадорликни янада ошириш мумкинлигини кўрсатди. Лазер тизими параметрларини оптималлаштириш учун турли хилдаги  $\text{Cr}^{3+}:\text{LiCAF}$  асосидаги частота ўзгартиргичли лазер конструкциялари учун симуляцион ҳисоблашлар амалга оширилди. Кўндаланг дамлаш учун оптималлаштирилган конструкция 10 расмда кўрсатилган.

Моделлаштириш диаметри 2м ва фокус масофаси 0.9 м бўлган парабolik қуёш концентратори учун бажарилди. Эритилган кварцдан ясалган тўғри бурчакли кўндаланг кесимга эга бўлган световод (10 расм) концентрация қилинган қуёш нуруни парабolik концентратор

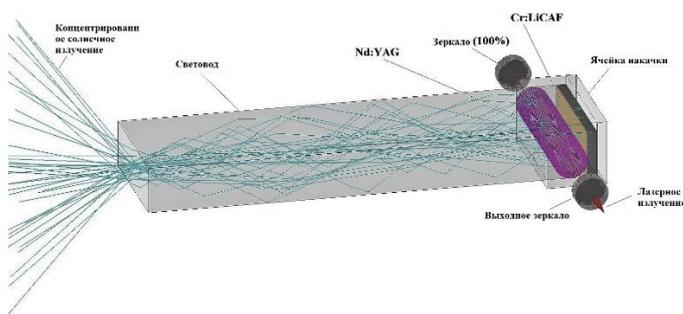
фокал зонасидан сув билан совитиладиган дамлаш камерасининг кириш апертурасига узатиш ва гомогенизация қилиш мақсадида ишлатилади.

$\text{Nd}:\text{YAG}$  фаол мухитининг ўлчамлари: диаметри 10мм, узунлиги 50мм. Солиштириш учун моделлаштириш частота ўзгартиргич билан ва ўзгартиргичсиз ҳоллари учун амалга оширилди. Бўйлама дамлаш холи учун 14 расмда кўрсатилган конфигурацияга ўхшаш конфигурация ишлатилди, бундаги ягона фарқ  $\text{Ti}:\text{сапфир}$  ўрнига  $\text{Cr}:\text{LiCAF}$  ташқи синсибилизатор сифатида ишлатилди.

Натижалар 1 жадвалда келтирилган, таққослаш учун ушбу жадвалда бўйлама дамлаш учун натижалар ҳам келтирилган. Жадвалдан кўриниб турибдики, олинган натижалар ҳам бўйлама ҳам кўндаланг дамлаш схемалари учун  $\text{Cr}:\text{LiCAF}$ дан ташқи частота конвертери сифатида фойдаланилганида  $\text{Nd}:\text{YAG}$  қуёш лазерларининг дамлаш самарадорлиги катта миқдорга ортишини кўрсатапти.



9-расм. 1- Стандарт қуёш спектри, 2-  $\text{Nd}:\text{YAG}$  ютилиш спектри, 3,4- мос равишда  $\text{Cr}:\text{LiCAF}$  ютилиш ва эмиссия спектрлари



10-расм. Кўндаланг дамлашли ва частота конверторли лазер

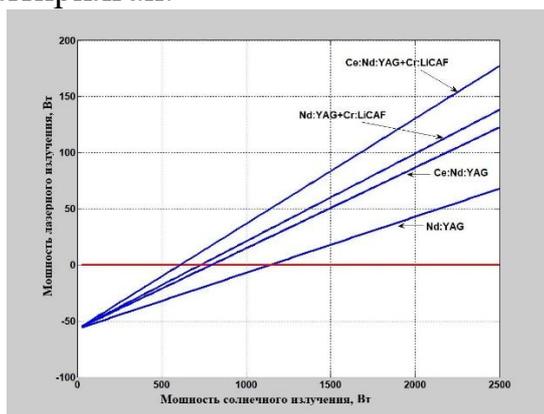
Ушбу натижалар асосида тўрт сатхли лазер ифодасидан фойдаланиб қайтиш коэффициенти 95% бўлган чиқиш кўзгуси учун лазернинг чиқиш қувватини куёш нурунинг кириш қувватига боғлиқлиги ҳисобланди.

1 - жадвал

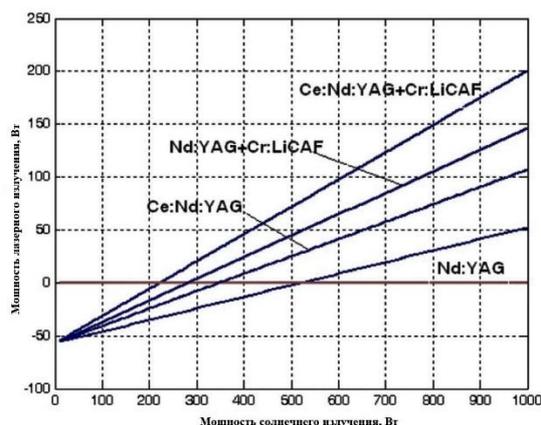
Фаол муҳит ва частота ўзгартиргичларининг турли комбинациялари учун дамлаш самарадорлиги

Актив муҳит	Частота ўзгарткич	Кўндаланг дамлаш самарадорлиги	Бўйлама дамлаш самарадорлиги
Nd:YAG	-	0.08	0.14
Ce:Nd:YAG	-	0.11	0.21
Nd:YAG	Cr:LiCAF	0.12	0.26
Ce:Nd:YAG	Cr:LiCAF	0.15	0.33

Кўндаланг дамлаш конфигурацияси учун ҳисоблаш натижалари 11a расмда келтирилган, унда кўрсатилишича Cr:LiCAF асосидаги куёш нури частотасини ташқи ўзгартиргичидан фойдаланилганда чиқиш қуввати катта миқдорга ортади. 11b расмда бўйлама дамлаш схемаси учун натижалар келтирилган.



11a-расм. Диаметри 2м бўлган параболик концентратор учун кўндаланг дамлашда лазер нури чиқиш қувватининг кириш (куёш нури) қувватига боғлиқлиги



11b-расм. Диаметри 1м бўлган параболик концентратор учун бўйлама дамлашда лазер нури чиқиш қувватининг кириш қувватига боғлиқлиги

Шундай қилиб, Cr:LiCAFдан ютилмай қолган кўп сонли куёш фотонлари частотасини ўзгартиргичи (frequency down-shifter) сифатида қўллашга асосланган янги содда ёндошиш ёрдамида Nd:YAG куёш лазерлазерларининг самарадорлини ошириш имкониятлари тадқиқ этилди. Ҳам бўйлама ҳам кўндаланг дамлаш конфигурациялари кўриб чиқилди.

Энг юқори дамлаш самарадорлиги бўйлама дамлаш холи учун 33%ни ташкил этди. Лекин, бўйлама дамлаш конфигурацияси юқори самарадорликка эга бўлишига қарамай, кўндаланг дамлаш схемаси манипуляциялар ва қувватни ошириш (масалан куёш концентратори ўлчамларини ошириш ҳисобига), ҳамда дамлаш самарадорлигини янада ошириш (масалан мульти-элементли конфигурациядан фойдаланиб) учун қулай ҳисобланади

Бу турдаги ташқи ўзгартиргичларининг афзалликлари қуйидагилар бўлиши мумкин:

фаол муҳитга иссиқлик юкламасининг камайиши;

фаол муҳит ва частота ўзгартиргичлари учун турли хил материалардан фойдаланиш имконияти;

частота ўзгартиргичининг термик хоссаларига (термик-индукцияланган икки хил синиш, линза эффекти) қўйиладиган талабнинг қатъий эмаслиги;

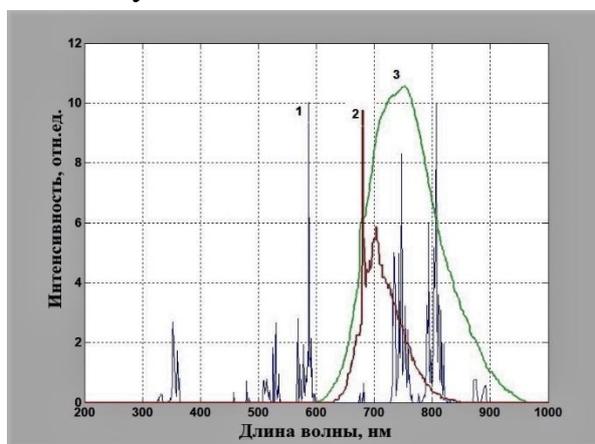
зарур бўлган холларда фаол муҳит ва частота ўзгартиргич температураларини мустақил бошқариш (совутувчи суюқлик оқимини бошқариш орқали) имкониятлари мавжудлиги.

*Александрит ташқи сенсбилизатор-қуёш нури частотаси ўзгартиргичи сифатида.* Александрит фаол муҳити ўзининг юқори иссиқлик ўтказувчанлиги ва температура ортиши билан лазер характеристикаларининг яшиланиши билан таниқлидир. Александрит асосидаги частотаси ўзгартириладиган лазерлар асосан 100°Сдан юқори температураларда ишлайди. Бу кристалл температураси ортиши билан унинг юқори лазер сатҳининг бандлик даражасининг ортиши ва унга мос холда лазер тўрт сатҳли схемада ишлаган пайтда 750 нм атрофидаги люминисценция кесимининг ортиши билан боғлиқ. Шуни қайд этиш керакки александрит лазери рубин лазери каби генерация тўлқин узунлиги 680 нм бўлган уч сатҳли режимда ҳам, частотаси кенг ўзгартириш полосасига эга бўлган 700нм дан 820нм оралиғида максимуми 750 нм бўлган тўлқин узунликларида тўрт сатҳли режимда ҳам ишлаши мумкин.

Яқинда адабиётларда 25-450°С температура оралиғида александрит асосидаги кучайтирувчи муҳит люминисценцияси эффектив кесими спектрини батафсил ўлчаш натижалари келтирилган ва температура ортиши билан александрит люминисценция спектрининг узун тўлқинлар томонига силжиши кўрсатилаган эди. Шунингдек александритнинг радиацион квант эффективлиги паст температураларда бирга яқин ( $0,95 \pm 0,05$ ) бўлади ва 400°С температурагача деярли ўзгармай қолиши маълум.

12-расмда 25°С ва 325°С температуралардаги люминисценция спектрлари Nd:YAG фаол элементининг ютилиш спектри билан солиштирилган. Расмдан кўриш мумкинки, 325°С температурада александритнинг люминисценция спектри 750нм ва 808нм оралиғида 25°С температурадаги люминисценция спектрига нисбатан Nd:YAGнинг асосий ютилиш полосалари билан кўпроқ мос тушади.

Яна бошқа бир муҳим сабаблардан бири температурасини



12-расм. Александритнинг люминисценция спектри ва Nd:YAGнинг ютилиш спектри. 1- Nd:YAGнинг ютилиш спектри, 2- Александритнинг 25°С люминисценция

осон бошқариш(масалан совутувчи суюқлик сарфини бошқариш орқали)

спектри, 3-Александритнинг 325°С люминесценция спектри

имконини берадига александритнинг юқори иссиқлик ўтказувчанлигидир.

Шундай қилиб, александритдан ташқи сенсбилизатор (қуёш спектрининг ишлатилмай қолган қисми частотасини ўзгартиргичи) сифатида фойдаланиш имкониятлари юқорида баён этилган модел рамкасида симуляция усули билан ўрганилди.

Моделлаштиришда ретро-рефлекторли конструкциядан фойдаланилди ва ҳисоблашлар диаметри 1м , фокус масофаси 0.5м бўлган параболик концентратор учун амалга оширилди. Бунда фаол мухит ва ташқи сенсбилизатор алоҳида совутилади ва тўғри бурчакли пластинка шаклига эга бўлган, металл иссиқлик олувчи орқали совутиладиган сенсбилизаторнинг температурасини бошқариш иссиқлик олувчи орқали ўтказиладиган сув сарфини бошқариш билан амалга оширилади деб фараз қилинди.

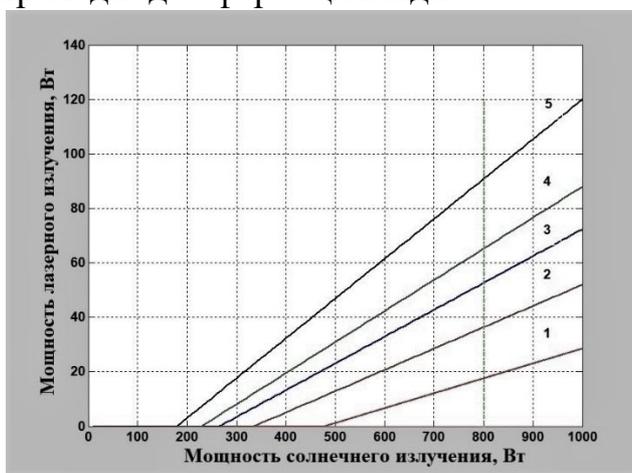
13- расмда солиштириш учун симуляция усули билан олинган барча натижалар келтирилган.

Биринчи яқинлашишда биринчи линия қуёш нури билан кўндаланг дамланадиган лазерлар соҳасида эришилган ҳозирги даражасига мос келади. Расмдаги 2 боғланишдан таклиф этилган ретро-рефлектордан фойдаланиш қуёш нури қувватининг 800Вт атрофида лазер чиқиш қувватининг деярли икки карра орт кўриниб турибди.

Александрит асосидаги ташқи сенсбилизаторни қўшиш 25°С, ҳамда 325°С температуранинг иккала холи учун янада ортишини кўрсатябди, лекин 325°С да (4-линия) 25°С (3-линия)дагига қараганда 2-линияга нисбатан катта миқдорда ортиши кузатилмоқда. Бу ортиш тушаётган 800Вт қувватда икки мартани ташкил этмоқда.

Бундан сўнг янада ошириш учун Се:Nd:YAG+Александрит (325°С) комбинациясидан фойдаланганда чиқишдаги лазер қувватининг ҳамда мазкур тадқиқотларда кўрилган бошқа вариантларга нисбатан энг катта ортиши, ҳамда энг юқори самарадорлик кузатилди.

Такқослашлар ретро-рефлектор схемасидан александрит асосидаги ташқи сенсбилизатор билан биргаликда фойдаланиш лазер чиқиш қувватини ва мос холда айлантириш самарадорлигини қуёш нури билан кўндаланг дамлашдаги ҳозирги пайтда эришилган қувват даражасига нисбатан 5 мартагача (800Вт қувватда 1- ва 5- боғланишларни солиштиринг, 13 расм) ошириш мумкинлигини кўрсатди.



13-расм. Ўлчамлари 6x6x50мм<sup>3</sup> бўлган фаол элементлар учун симуляция натижалари. 1- Nd:YAG (ретро-рефлекторсиз), 2- Nd:YAG, 3-Nd:YAG+Александрит (25°С), 4-Nd:YAG+Александрит (325°С), 5- Се:Nd:YAG+Александрит (325°С), 2-5 боғлиқликлар ретро-рефлектор билан

Мазкур ишланишлар александритнинг Nd:YAG ва Ce:Nd:YAG асосидаги лазерларга ташқи сенсбилизатор сифатида истиқболли номзод эканлигини кўрсатди. Бундан ташқари Ce:Nd:YAG+Александрит схемаси қуёш лазерлари учун энг яхши вариант бўлиб, 100Вт гача лазер қувватини олиш имконини беради. Бунда александрит температурасини 300-350 °С оралиғида ушлаб туриш муаммосини ҳал қилиш зарур.

## ХУЛОСАЛАР

1. Биринчи марта ён тарафдан оптик дамланадиган Nd:YAG-қуёш лазери учун ўзгартириш самарадорлигини ошишига олиб келувчи янги кўп ўтишли схема таклиф этилган. Таклиф этилган кўп ўтишли конфигурация лазернинг чиқишдаги қувватини икки баробар ошириши кўрсатилган.

2. Александрит асосидаги қуёш лазериди юқори самарадорликка эришишнинг содда усули таклиф этилган. Самарадорликни таҳлил қилиш, александрит асосидаги қуёш лазерини моделлаш усули ва ўзаги легирланган параболик кўринишдаги фаол муҳит учун ўтказилган. Моделлаш учун Монте-Карло нурни кузатиш усулидан фойдаланилди. Биринчи марта александрит асосидаги қуёш лазериди самарадорлик 15% ташкил этиши, ва бу ҳозирда мавжуд қуёш лазерларидаги кўрсаткичдан анча юқори эканлиги кўрсатилган.

3. Ce:Nd:YAG фаол муҳити асосидаги қуёш лазерларида юзага келувчи энергия узатиш ва сенсбилизация жараёнларини симуляция қилиш учун янги модел таклиф этилган. Таклиф этилган модел ёрдамида, биринчи марта Nd:YAG кристаллига Се қўшиш, қуёш билан ишлайдиган лазернинг дифференциал самарадорлигини икки баробар ошишига ва бу ўз навбатида чиқиш қувватининг икки баробар ортишига, ва оптик дамлаш порог қувватининг 1.7 баробар камайишига олиб келиши кўрсатилган.

4. Биринчи марта Nd:YAG қуёш лазерларида самарадорликни ошириш учун қуёш нури спектри частотасини ташқи ўзгартирувчи сифатида Cr:LiCAF фойдаланиш имконияти мавжудлиги кўрсатилди. Компьютер симуляцияси усули билан бўйлама ва кўндаланг оптик дамлаш схемаларининг қиёсий таҳлили ўтказилган. Nd:YAG ва Cr:LiCAF фаол муҳитлар комбинацияси учун ҳам кўндаланг, ҳам бўйлама оптик дамлашлар ҳоли учун рақамий тажрибалар ўтказилди. Ташқи частота ўзгартирувчи сифатида Cr:LiCAF асосдан фойдаланиш ҳар икки ҳолда ҳам оптик дамлаш самарадорлигини сезиларли даражада ошириши кўрсатилган. Бундан ташқари Nd:YAG ни Ce:Nd:YAGга алмаштириш самарадорликнинг янада ортишига олиб келиши кўрсатилган.

5. Монте–Карло ва нурларни таъкиб қилиш усули билан, қуёш энергиясини лазер нури энергиясига ўзгартириш жараёнида ишлатиш учун неодим билан легирланган шаффоф керамик YAG тадқиқ этилган. Биринчи марта юқори даражада легирланган Nd:YAG керамик материални қуёш ёрдамида оптик дамланадиган диск лазерларида фаол муҳит сифатида ишлатиш, одатда ишлатиладиган таркибидаги неодим 1% ташкил этган Nd:YAG нисбатан қуёш энергиясини лазер нури энергиясига ўзгартириш самарадорлигини ошириши кўрсатилган.

6. Компьютер симуляцияси усули билан, диаметри 1м бўлган параболик концентратор фокусида концентрацияланган қуёш нури ёрдамида кўп ўтишли кўндаланг оптик дамлаш вақтида иссиқликни самарали олиб ташлаш имконини берувчи юпка плёнка кўринишидаги Nd:Cr:GSGG актив элемент базасидаги лазер тизимининг қуёш нури энергиясини лазер нури энергиясига самарали ўзгартириш имконияти тадқиқ этилди. Биринчи марта, лазер қувватини ҳозирги вақтда эришилган рекорд қувватлардан 3-4 баробар кўпроқ ошириш имкониятини берувчи лазер конфигурацияси таклиф этилган.

7. Биринчи марта  $Ti^{3+}:Al_2O_3$  фаол элемент базасидаги қуёш энергиясини лазер нури энергиясига айлантириш имконияти тадқиқ этилган. Компьютер симуляцияси усули орқали, қуёш нури ёрдамида кўндаланг оптик дамлаш вақтида генерация порогини кристалл параметрлари геометриясини танлаш ҳисобига камайтириш имконияти кўрсатилган.

8. Қуёш нури ёрдамида оптик дамланадиган Ce:Nd:YAG лазерининг юқори самарадорликка эга бўлган янги схемаси таклиф этилган. Биринчи марта Nd:YAG ўрнига Ce:Nd:YAG дан фойдаланиш кўндаланг оптик дамлаш вақтида самарадорлик 19% гача ортиши кўрсатилган.

9. Катта Қуёш Печининг (БСП) алоҳида олинган гелиостатида концентрацияланган қуёш нури билан ишлайдиган юқори самарадорликка эга бўлган лазерни яратиш имконияти тадқиқ этилган. Таклиф этилган, иккиламчи концентраторга эга, аммо ташқи сенсibiliзатори бўлмаган лазер схемаси алоҳида олинган гелиостатда 400Вт лазер қувватини, ташқи сенсibiliзатордан фойдаланиш эса бу кўрсаткични 1 кВт га етказиш имконини бериши кўрсатилган.

10. Биринчи марта титан-сапфирдан (Ti:Sapphire) қуёш спектри частотасини суриш учун ташқи сенсibiliзатор сифатида фойдаланиш таклифи киритилган. Компьютер симуляцияси усули орқали титан-сапфирдан (Ti:Sapphire) фойдаланганда қуёш ёрдамида оптик дамланадиган Nd:YAG лазеридеги оптик дамлаш самарадорлигини икки баробар ошириш имконияти мавжудлиги кўрсатилган.

11. Биринчи марта александритдан (chromium-doped chrysoberyl,  $Cr^{3+}:BeAl_2O_4$ ) ҳароратни бошқариш билан ташқи сенсibiliзатор сифатида фойдаланиш таклифи киритилган. Александритдан ( $Cr^{3+}:BeAl_2O_4$ ) кўндаланг оптик дамлаш схемасига эга Nd:YAG лазерларида фойдаланиш оптик дамлаш самарадорлигини беш баробардан ортиқроқ ошириши кўрсатилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ  
СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК DSc.02/30.12.2019.FM.65.01  
ПРИ ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ  
И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

---

**ИНСТИТУТ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ**

**МАХМУДОВ ХИКМАТ МАХАМАТОВИЧ**

**ЛАЗЕРЫ С СОЛНЕЧНОЙ НАКАЧКОЙ С ЧАСТОТНЫМИ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**01.04.11 – Лазерная физика**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ  
ДОКТОРА (DSc) ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

**ТАШКЕНТ – 2021**

Тема докторской (DSc) диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2018.2.DSc/FM123

Диссертация выполнена в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А.Арифова

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (<http://iplt.uz>) и на Информационно-образовательном портале "ZiyoNet" ([www.ziyo.net.uz](http://www.ziyo.net.uz)).

**Научный консультант:**

**Пайзиев Шермахамат Далиевич,**  
доктор физико-математических наук

**Официальные оппоненты:**

**Эшкobilов Напас Бекназарович,**  
доктор физико-математических наук,  
профессор

**Сапаев Усман Каландарович,**  
доктор физико-математических наук

**Махманов Урол Кудратович,**  
доктор физико-математических наук

**Ведущая организация:**

**Национальный Университет  
Узбекистана**

Защита диссертации состоится « 8 » июля 2021 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 при Институте Ионно-плазменных и лазерных технологий по адресу: 100125, Ташкент, Дурмон йули, 33. Тел/Факс: (998-71) 262-32-54, E-mail: [info@iplt.uz](mailto:info@iplt.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ионно-плазменных и лазерных технологий (зарегистрирована за № 6) по адресу: 100125, Ташкент, Дурмон йули, 33. Тел: (998-71) 262-31-69

Автореферат диссертации разослан « 01 » июля 2021 года  
(протокол реестра № 6 от « 01 » июля 2021 года).



**Х.Б. Ашуров**  
Председатель одnorазового  
научного совета по присуждению  
ученых степеней, д. ф.-м. н.,  
профессор

**И.Д. Ядгаров**  
Ученый секретарь одnorазового  
научного совета по присуждению  
ученых степеней, д. ф.-м. н., с.н.с.

**С.А. Бахрамов**  
Председатель научного семинара при  
одnorазовом научном совете по  
присуждению ученых степеней,  
д. ф.-м. н., академик

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация к докторской диссертации)**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В настоящее время в мире одним из важнейших проблем является проблема экологической безопасности. В этой связи актуальным является использование солнечной энергии, которая является неисчерпаемым и экологически чистым источником энергии. Одним из способов использования энергии Солнца является ее преобразование в энергию лазерного излучения. Не смотря на вышесказанное, эффективность такого преобразования все еще остается низким по сравнению с другими видами преобразования такими как преобразование солнечной энергии в электрическую или в тепловую.

Для эффективного преобразования широкополосного спектра солнечного излучения в энергию монохроматического лазерного излучения необходимо решить ряд физических проблем, таких как выявление новых активных сред, обладающих определенными физическими свойствами, максимальное использование солнечного спектра для накачки лазерного активного элемента, предотвращение негативных термических эффектов, возникающих в процессе эксплуатации этих активных сред. С этой точки зрения поиск и выявление оптимальных схем лазеров, поиск и исследование новых лазерных материалов и преобразователей солнечного излучения, а также исследование физических параметров этих лазерных схем становится актуальным.

На сегодняшний день мировые исследования в области решения проблем лазеров с солнечной накачкой, благодаря возможности получать световые потоки с высокой плотностью по сравнению с концентрированным солнечным излучением, могут привести к появлению новых высокотемпературных технологий, основанных на использовании возобновляемых источников энергии. Поэтому следующие направления целевых научных исследований, в том числе реализация в проекты и научные изыскания являются актуальными:

разработка и создание новых высокоэффективных лазерных схем с солнечной накачкой;

разработка и создание лазеров, использующих максимальную часть солнечного спектра для максимальной эффективности преобразования;

поиск новых композитных лазерных материалов с высокими оптическими характеристиками.

Данное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлениях Президента Республики Узбекистан №ПП–1442 «О приоритетных направлениях развития индустрии Республики Узбекистан на 2011–2015 гг.» от 15 декабря 2015 года, № УП–4947 «О мерах по дальнейшей реализации Стратегии действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан в 2017-2021 годах» от 7 февраля 2017 года и № ПП–2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организаций, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017

года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Исследовательская работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан: ППИ-4 «Развитие методов использования возобновляемых источников энергии, создание технологий и устройств на основе нанотехнологий, фотоники и других передовых технологий».

**Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации<sup>1</sup>.** Первый лазер с солнечной накачкой был разработан на кристалле  $\text{CaF}_2$  легированным  $\text{Dy}^{+3}$  Z. J. Kiss и другими. Но не смотря на то что, прошло полувека главная проблема в этой области не решена. Главной проблемой лазеров с солнечной накачкой является эффективность преобразования, которая не превышает 4-5.1%. Это эффективность несколько раз меньше эффективности других технологий альтернативных источников энергии в том числе и солнечных.

Над решением данной проблемы и других проблем в этой области работают в следующих ведущих институтах мира: University of Florida (США), Tohoku University (Япония), American Optical Company (США), PROMES-CNRS (Франция), Universidade NOVA de Lisboa (Португалия), University of Dundee (Великобритания), Institute for Laser Technology (Япония), Ben-Gurion University of the Negev (Израиль) и др.

По тематике исследований диссертации, на мировом уровне был решен ряд актуальных проблем и получены следующие важнейшие научные результаты: в 1966 году С.G.Young, и др. был создан твердотельный лазер на неодимосодержащем кристалле иттрий-алюминиевого граната (Nd: YAG) с солнечной накачкой, в 1984 году Arashi и др. получили мощности генерации в 18 Вт на Nd: YAG лазере. D.Jenkins и другими достигнуто 4.7 Вт мощности с квадратного метра площади концентратор. Затем этот параметр достиг значения 6.7 Вт/м<sup>2</sup> в работе M.Lando и других и 18,7 Вт/м<sup>2</sup> в работе Y.Yabe и др. на активном элементе Cr:Nd:YAG. D.Liang и др. на активном элементе Nd: YAG достигли мощности 19.3 Вт/м<sup>2</sup>, затем Dihn и др. сообщили о достижении мощности 30 Вт/м<sup>2</sup> в 2012 году.

В настоящее время появились и другие виды активных элементов для лазеров с солнечной накачкой, такие как: неодимосодержащие композитные материалы, тонкая платина из Nd/Cr-легированного GSGG из тонкой пластины Nd: YAG, фторидные стекла легированные Nd и керамический материал на основе Nd/Cr:YAG, которые являются перспективными материалами в рассматриваемой области.

---

<sup>1</sup> Обзор международных научных исследований по теме диссертации проведен на основе: <http://worldwidescience.org/topicpages/s/solar+pumped+laser.html> и др. источников.

**Степень изученности проблемы.** В представленной работе изучены материалы работ, посвященные исследованиям накачки лазера солнечным излучением авторов Z.Kiss, C.Young, H.Arashi и др. в которых использован активный элемент Nd: YAG, т.к. он имеет хорошие оптические тепловые и спектральные параметры необходимые для солнечных лазеров. Работы авторов M.Weksler и др., D.Jenkins и др., а также M.Lando и др. посвящены увеличению мощности лазера на Nd: YAG. На активном элементе Nd: YAG максимальная мощность получена в работе автора T.Dinh где предложена новая схема накачки лазера. Не смотря на то, что Nd: YAG является наиболее подходящим материалом в качестве активного элемента для лазеров с солнечной накачкой другие авторы показали, что и другие материалы могут конкурировать наравне с Nd: YAG как перспективные материалы (M.Endo на Cr:Nd:GSGG и Y.Yabe Cr:Nd: YAG). В работах авторов D.Liang и др., J.Almeida и др., а также P.Xu и др. сделаны попытки повысить эффективность преобразования солнечной энергии в лазерную.

Эффективность солнечных лазеров на жидких, газовых, керамических и др. не превышает значений для твердотельных лазеров, что видно из работ авторов R.Insuk и др. и R.Schneider и др. В работах P.Beaud и др. а также U.Demirbas и др. сообщаются о новых материалах – сенсбилизаторах Cr:LiSAF and Cr:LiCAF, которые способствуют более эффективному использованию солнечного излучения при накачке. В работе P.Reusswig и др. CdSe/CdZnS предлагается в качестве сенсбилизатора.

Не смотря на большое количество опубликованных работ по теме диссертации задача эффективного преобразования солнечной энергии в лазерную остается актуальным. Вышеуказанных работах эффективность солнечного лазера указывается в мощности излучения лазера на площадь концентрируемого солнечного излучения ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), что не дает возможность сравнивать экспериментальные результаты разных авторов, проведенных в различных погодных условиях и на различных географических широтах.

Для решения вопроса эффективности преобразования солнечную энергию в лазерную энергию нами впервые была предложена схема лазера с внешним преобразователем частоты.

**Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами научно-исследовательского учреждения, в котором выполнена диссертационная работа.** Диссертационное исследование было выполнено в рамках исследований следующих проектов института Ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз: № АЗ-ФА-Ф045 «Разработка универсального стенда лазера для проведения испытаний различных активных элементов на Большой Солнечной Печи» (2015–2017), № ОТ-ФЗ-10 «Исследование и развитие физических основ процессов преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения» (2017–2020), № MRU-FA-75/2017 «Модификация спектра солнечного излучения для эффективного преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения» (2018–

2019), № Атех-2018-16 «Разработка и создание лазера с солнечной накачкой на линзе Френеля» (2018–2020)

**Целью исследования** является выявление оптимальных схем лазеров, материалов для их активных сред и исследование схем лазеров с преобразователями частоты солнечного излучения для повышения эффективности преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения.

Для достижения этой цели сформулированы следующие **задачи исследования:**

разработка методов оптимизации накачки лазера солнечным излучением, путем увеличения эффективности поглощения, за счет обеспечения многократного прохождения луча через активный элемент лазера;

разработка модели лазерной схемы с вторичной концентрацией энергии накачки в композитном активном элементе с целью повышения эффективности накачки;

разработка модели лазера на основе Nd: YAG с внедрением ионов церия в качестве внутреннего сенсibilизатора с целью уменьшения порога генерации;

исследование возможностей лазера на Nd: YAG с использованием Cr:LiCAF в качестве внешнего элемента (сенсibilизатора), преобразующего частоту солнечного спектра;

исследование возможности увеличения мощности лазера с солнечной накачкой на дисковом композитном керамическом активном элементе YAG/Nd:YAG, с учетом концентрационной зависимости лазерных характеристик активной среды;

исследование лазерной схемы на кристалле Nd:Cr:GSGG с солнечной накачкой и эффективным теплосъемом с активного элемента;

исследование оптимальной геометрии лазера на  $Ti^{3+}:Al_2O_3$  с продольной накачкой с целью снижения порога генерации;

исследование влияния внедрения (легирования)  $Ce^{+3}$  ионов в Nd:YAG на характеристики генерации лазера с солнечной накачкой;

разработка программного кода для расчета тепловых полей и термонапряжений в резонаторе твердотельного лазера с солнечной накачкой.

**Объектами исследования** являются твердотельные лазеры с солнечной накачкой, лазерные активные элементы, материалы, преобразующие длину волны солнечного излучения (сенсibilизаторы) и схемы лазерных резонаторов.

**Предметом исследования** являются физические процессы, происходящие в резонаторе лазера с солнечной накачкой, а именно многократные отражения, преломления, поглощения, люминесценция фотонов, передача энергии из ионов сенсibilизаторов в активные ионы, процесс генерации лазерного излучения в различных активных средах при накачке широкополосным спектром солнечного излучения.

**Методы исследования.** В диссертационной работе применены методы, основанные на моделировании процессов, происходящих в лазерной системе

с учетом спектральных характеристик активных сред, компонентов лазерной системы и спектра солнечного излучения. Моделирование основано на прослеживании отдельных квантов солнечного излучения со случайными параметрами методом Монте-Карло.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

разработана и предложена новая схема накачки солнечного лазера на Nd:YAG с многократным прохождением солнечного излучения через активный элемент. Показано, что благодаря предложенной схеме эффективность такого лазера в два раза выше чем лазера с традиционной схемой накачки;

разработан универсальный метод моделирования процессов многократного отражения, преломления, поглощения, фотолюминесценции, основанный на прослеживании одиночных фотонов без весовых факторов вместо обычно используемых фотонных пакетов. Метод позволяет рассчитывать тепловые процессы, влияющие на оптические характеристики активного элемента;

рассчитан солнечный лазер на александрите, имеющий специальную форму, позволяющую дополнительно концентрировать солнечное излучение на активном элементе. Указанный лазер позволяет достичь общую эффективность преобразования солнечного излучения около 15%;

путем компьютерной симуляции предложена новая модель передачи энергии и сенсбилизации в лазерах с солнечной накачкой. Впервые показано, что эффект добавления ионов  $Ce^{3+}$  в Nd:YAG уменьшает пороговую мощность 0,6 раза, увеличивает дифференциальную эффективность лазера в два раза и соответственно увеличивает выходную мощность лазера в два раза;

показано, что использование Cr:LiCAF в качестве внешнего преобразователя частоты солнечного спектра в лазерной схеме с поперечной накачкой приводит к значительному увеличению эффективности лазера. В случае лазера на Nd:YAG эффективность может достигать до 26 % а в случае Ce:Nd:YAG до 33 %;

исследована зависимость эффективности лазера с солнечной накачкой от концентрации неодима в керамическом YAG материале. Показано, что использование высокой концентрации неодима в керамическом Nd:YAG-лазере обеспечивает повышение эффективности преобразования солнечной энергии в энергию лазера, использование керамического материала Nd:Ce:YAG с повышенной концентрацией неодима увеличивает эффективность керамического Nd:YAG – лазера примерно, в два раза. Кроме этого показано, что концентрация неодима имеет предельное значение, после которого эффективность лазера понижается;

показано, что можно создать эффективный солнечный лазер на основе активного элемента из Nd:Cr:GSGG, не смотря на его низкую теплопроводность. Создана конфигурация лазера, которая имеет возможность увеличить лазерную мощность в 3-4 раза по сравнению с рекордной мощностью достигнутой к настоящему времени;

впервые исследована возможность преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения на базе активного элемента  $Ti^{3+}:Al_2O_3$ . Показана возможность снижения порога генерации за счет выбора оптимальной геометрии параметров кристалла при продольной накачке концентрированным солнечным излучением;

предложена новая эффективная схема лазера с солнечной накачкой на Ce:Nd:YAG. Впервые показано, что при продольной схеме накачки использование Ce:Nd:YAG вместо Nd:YAG может повысить эффективность накачки до 19%;

впервые предложена использование титан-сапфир (Ti:Sapphire) в качестве внешнего сенсibilизатора для смещения частоты солнечного спектра. Показана, что использование титан-сапфир (Ti:Sapphire) как внешний сенсibilизатор приводит к возможности увеличения эффективности накачки лазера на Nd:YAG более чем в два раза;

впервые предложена использование Александрита ( $Cr^{3+}:BeAl_2O_4$ ) в качестве внешнего сенсibilизатора с температурным контролем. Показана возможность более чем пятикратное повышения эффективности накачки Nd:YAG лазеров с солнечной накачкой с использованием александрита в схеме с поперечной накачкой.

**Практические результаты исследования.** Разработанные компьютерные модели физических процессов в лазерах с солнечной накачкой могут использоваться при разработке и создании новых лазеров с солнечной, ламповой, а также диодной и светодиодной накачкой и в разработке лазерных технологий. Предложенные подходы, основанные на использовании внешних преобразователей частоты солнечного спектра, многопроходная схема накачки, а также другие предложенные схемы и подходы позволяют создание солнечных лазеров с высокой эффективностью преобразования.

**Достоверность результатов исследований** обеспечена обоснованностью методологии исследования, применением обоснованных методов и подходов оптики и лазерной физики, и валидации использованных моделей воспроизведением литературных данных по солнечным лазерам, использованием качественной и количественной оценки результатов; статистическим подтверждением значимости полученных данных. Достоверность сделанных выводов основывается согласованностью с результатами других авторов, работающих в области преобразования солнечной энергии в лазерную.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная и практическая значимость результатов исследований диссертационной работы заключается в предложении нового подхода для поперечной накачки солнечных лазеров с использованием внешних сенсibilизаторов и возможности использования симуляционной модели лазера с солнечной накачкой для проведения теоретических и экспериментальных исследований.

Предложенные модели, схемы накачки, и другие теоретические и технические решения могут быть применены для создания лазеров с высокой эффективностью преобразования солнечной энергии в лазерную.

**Внедрение результатов исследования.** Предложенная модель солнечного лазера на Nd:YAG с использованием Cr:LiCAF в качестве внешнего преобразователя частоты солнечного спектра, в работе опубликованном в соучастии автора “Solar pumped Nd: YAG laser efficiency enhancement using Cr:LiCAF frequency down-shifter” использована в зарубежных научных публикациях и имеет 19 ссылок (Dual-rod pumping approach for tracking error compensation in solar-pumped lasers, B.D.Tiburcio, D. Liang, J.Almeida, D.Garcia and C. R. Vistas, *June 2019, Journal of Photonics for Energy* 9(2), IF:2.287; Dual-rod pumping concept for TEM<sub>00</sub>-Mode solar lasers, B.D. Tiburcio, D. Liang, J. Almeida, D. Garcia, C. R. Vistas, *May 2019, Applied Optics* 58(13), IF:1.791; Enhanced near-infrared emission in Yb<sup>3+</sup>-Cr<sup>3+</sup> codoped KZnF<sub>3</sub> glass ceramics excited by a solar simulator, X.Wang, W.Li, K. Tian, E. Lewis, S. Wang, G. Brambilla, Y. Dong, X.Wu, P.Wang, *April 2019, Ceramics International* 45(6), IF: 3.45 и др.). Использование данных позволило авторам доказать, что эффективность преобразования солнечных лазеров может быть намного больше достигнутых на сегодняшний день результатов. Указанные данные также использованы в двух зарубежных докторских диссертациях («Advances in solar-pumped laser efficiency and brightness», J. I. L. Almeida (URI:<http://hdl.handle.net/10362/28836>) и «High-efficiency solar laser pumping by a ring-array concentrator», M. Rodrigo, (URI: <http://hdl.handle.net/10362/75821>)) для использования предложенного нового подхода при создании схемы лазера на традиционном Nd:YAG с преобразователем длины волны солнечного излучения из Cr:LiCAF.

Результаты работы по исследованиям лазера на Ce:Nd:YAG, где показано, что добавление Ce в Nd:YAG увеличивает дифференциальную эффективность лазера с солнечной накачкой и соответственно, увеличивает эффективность лазера в 2 раза, использован в зарубежной литературе (Influence of annealing atmosphere on the optical quality and pulsed laser performance of Ce, Nd: YAG single crystal, MRA Moghaddam, D Razzaghi, JH Barbaran et al., *Optik*, 2019, Volume 181, March 2019, Pages 941-947, IF: 1.91, Vistas, C. R., Liang, D., Garcia, D., Almeida, J., Tiburcio, B. D., & Guillot, E. (2020). Ce: Nd: YAG continuous-wave solar-pumped laser. *Optik*, 207, 163795, IF: 2.187, Vistas, C. R., Liang, D., Almeida, J., Tiburcio, B. D., Garcia, D., Catela, M., ... & Guillot, E. (2021). Ce: Nd: YAG side-pumped solar laser. *Journal of Photonics for Energy*, 11(1), 018001, IF: 2.12) как доказательство перспективности нового материала в качестве активной среды для солнечного лазера. Использование этих результатов позволило увеличить выходную мощность лазера с солнечной накачкой в 1.6 раз.

На основе результатов комплекса исследований люминесцентных, лазерных характеристик лазерных активных сред Nd:YAG в условиях накачки концентрированным солнечным излучением от одного гелиостата большой

солнечной печи получено свидетельство о регистрации заявки на патент на изобретение Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан на устройство «Устройство для повышения эффективности преобразования солнечных лазеров с поперечной накачкой» (№ IAP 2020 0030, 23.01.2020г.). Разработанное устройство позволяет создать высокоэффективных преобразователей солнечной энергии в энергию лазерного излучения.

**Апробация результатов исследования.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 10 международных и республиканских конференциях.

**Опубликованность результатов исследований.** Полученные результаты по теме диссертации изложены в 22 научных трудах, из них 12 научные статьи, в том числе 6 в международных, 6 в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, 9 докладов опубликованы в трудах международных и республиканских конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа содержит 150 страниц машинописного текста, включая 70 рисунков и 2 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность и востребованность темы диссертации, формулируются цель и задачи исследования, определяется объект, предмет и методы исследования, излагается научная новизна, научно-практическая значимость полученных результатов, обосновывается достоверность результатов, приведены краткие сведения о внедрении результатов, апробация работы и структура диссертации.

В первой главе диссертации «**Лазеры с солнечной накачкой и существующие проблемы**» анализируются литературные данные по теме диссертационной работы и делается вывод: не смотря на большое количество опубликованных работ по теме диссертации, эффективность преобразования солнечных лазеров остается на уровне 4-5,1%. Определены нерешенные проблемы в этой области, на основе которых сформулированы цель и задачи данной работы.

Во второй главе «**Моделирование лазеров с солнечной накачкой**» приведено описание использованной статистической модели для лазеров с солнечной накачкой, разработанные новые модули для усовершенствования существующих моделей, выведены аналитические выражения для расчета тепловых характеристик активного элемента. В данной диссертационной работе были использованы методы, основанные на симуляции физических процессов моделированием различных конструкций лазеров для определения оптимальных решений, а также теоретические исследования различных механизмов повышения эффективности лазеров с солнечной накачкой.

Моделирование для схемы солнечного лазера, в исследованиях по теме диссертации, было выполнено с использованием метода Монте-Карло и прослеживания (трассировки) лучей. Методика моделирования была разработана ранее. Суть данного численного моделирования заключается в определении последовательности точек пересечения, используя геометрическую оптику и моделирование элементарных процессов, таких как отражение, преломление, поглощение и испускание фотона. Конечным результатом моделирования является доля поглощенных в активной среде фотонов, которые участвуют в создании инверсии населенности, то есть эффективность накачки  $\eta_p$ , и распределение поглощенной мощности в активной среде.

*Статистическая модель лазеров с солнечной накачкой* была усовершенствована, в частности добавлена модель для симуляции процессов передачи энергии и сенсibilизации в лазерах с солнечной накачкой на двойной активированной среде на основе Ce:Nd:YAG.

Известно, что сенсibilизация - это процесс, при котором энергия возбуждения, поглощенная сенсibilизирующими ионами (донорами), передается активным ионам (акцепторам) с помощью механизмов безизлучательной (нерадиационной передачи) и/или посредством излучения (радиационная передача). Например, в случае Ce:Nd:YAG ионы Ce являются

сенсibiliзирующими ионами, т.е. донорами, которые поглощают и передают энергию, а ионы Nd акцепторами. Передача энергии посредством излучения зависит от размера и формы кристалла. Структура донорной флуоресценции зависит от концентрации акцептора, но радиационное время жизни донора не изменяется с концентрацией акцептора. Нерадиационный перенос энергии между донорными и акцепторными ионами может сопровождаться прямой передачей возбуждения или более сложными процессами, включая миграцию энергии возбуждения между донорными ионами. Эффективность безизлучательной передачи энергии, приводящего к укорочению времени жизни донора, может быть выведена из кривого затухания донорской флуоресценции как:

$$\eta_{NET} = 1 - \tau_x / \tau_0$$

где  $\tau_x$  и  $\tau_0$  представляют время распада  $\text{Ce}^{3+}$  образцов с концентрацией легирования  $\text{Nd}^{3+x}$  и  $x = 0$  соответственно.

Процесс радиационной передачи энергии от  $\text{Ce}^{3+}$  к  $\text{Nd}^{3+}$  посредством реабсорбции люминесценции  $\text{Ce}^{3+}$  ионами  $\text{Nd}^{3+}$  определяется перекрытием между спектром излучения  $\text{Ce}^{3+}$  и спектром поглощения  $\text{Nd}^{3+}$  в YAG.

Чтобы смоделировать процессы переноса как посредством излучения, так и без излучения, мы выбираем длину пути, пройденной фотоном до поглощения  $l$  как

$$l = - \frac{\ln \xi}{\mu}$$

(где  $\xi$  - случайное число, а  $\mu$  - коэффициент поглощения для данной длины волны). Мы используем спектр поглощения Ce: Nd: YAG в предположении, что

$$\mu = \mu_1 + \mu_2$$

при малых концентрациях донорных и акцепторных ионов, где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  - коэффициенты поглощения Nd: YAG и Ce: YAG соответственно для данной длины волны прослеживаемого солнечного света. Для учета радиационных и нерадиационных процессов передачи энергии мы определяем вероятность этих процессов следующим образом:

$$p_1 = \eta_{NET}(1 - \exp(-\mu_2 l)) \quad \text{и,}$$

$$p_2 = (1 - \eta_{NET})(1 - \exp(-\mu_2 l))$$

Соответственно, где  $p_{Ce} = p_1 + p_2 = 1 - \exp(-\mu_2 l)$  вероятность поглощения в Ce:YAG и аналогично мы можем определить вероятность поглощения в Nd:YAG как

$$p_{Nd} = 1 - \exp(-\mu_1 l)$$

Затем, используя эти определения вероятности для части излучательной передачи энергии, мы можем написать:

$$\delta = \frac{p_2}{p_{Nd} + p_{Ce}}$$

Поскольку как поглощение в Nd: YAG, так и нерадиационная часть поглощения в Ce: YAG вносят непосредственный вклад в создание инверсных атомов на верхнем лазерном уровне после того, как солнечный фотон

поглощается, модель проверяет возникновение процесса радиационной передачи. Для этого генерируется случайное число в интервале  $[0..1]$  и сравнивается с  $\delta$ . Если случайное число окажется больше  $\delta$ , процесс отслеживания завершается с регистрацией результатов. В противном случае процесс эмиссии моделируется с использованием спектра люминесценции  $\text{Ce:YAG}$ , и отслеживание нового фотона продолжается до тех пор, пока фотон не будет реабсорбирован или не покинет систему.

*Расчет выходной мощности.* Таким образом, в предыдущих разделах была описана методика определения эффективности накачки посредством моделирования трассировки лучей методом Монте-Карло. Полученные эффективности накачки далее используются на следующем этапе для расчета зависимостей выходной мощности лазерного излучения от входной мощности солнечного излучения с использованием известного выражения для четырехуровневого лазера.

*Оценка температуры активной среды.* Для определения температурного распределения в активной среде в диссертационной работе были выведены соответствующие выражения, характерные для рассмотренных схем лазерной системы в простых случаях, а в случаях, когда аналитическое решение невозможно, использовались численные методы решения уравнения теплопроводности.

Для проверки работоспособности разработанной модели и достоверности полученных результатов, проводились моделирование существующих лазеров, приведенных в литературе. Сравнение результатов показали хорошее совпадение, что подтверждает работоспособность модели и достоверность результатов, и возможность использования разработанной нами модели для исследования, разработки и оптимизации параметров новых эффективных лазеров с солнечной накачкой

Таким образом, показано, что разработанная нами модель может быть использована для разработки и оптимизации параметров новых эффективных лазеров с солнечной накачкой.

Выведены аналитические выражения для расчета температурного поля при однородной накачки активных элементов в виде тонкой пластины или диска, а также композитного активного элемента с прозрачной оболочкой и сердцевиной с активными ионами.

В третьей главе **«Численные эксперименты для определения оптимальных схем лазеров с солнечной накачкой без сенсibilизаторов»** приведены результаты исследований по созданию лазеров на основе различных активных сред, используемых в лазерах с диодной или ламповой накачкой. Для выбора оптимального варианта схемы накачки и конструкции лазера проведен обширный анализ возможности получения эффективной генерации лазерного излучения проведением симуляционных расчетов на основе разработанной модели для ряда активных элементов ( $\text{Nd:YAG}$ ,  $\text{Ti:сапфир}$ , Александрит) и различных вариантов схемы накачки. Исследовались температурные режимы использованных конструкций лазеров

на Nd:YAG активных элементах, а также композитных вариантов этих активных элементов. Предложен новый простой подход к реализации многопроходной схемы накачки для солнечных лазеров с поперечной накачкой, который позволяет повысить общую эффективность почти в два раза, обеспечить наилучшие тепловые условия для активной среды в работе и для использования внешних сенсбилизаторов.

Исследована возможность преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения на базе активного элемента  $Ti^{3+}:Al_2O_3$ , который имеет существенно превосходящий порог генерации по отношению с Nd:YAG и по этой причине он не рассматривался ранее как лазерный материал для лазеров с солнечной накачкой. Методом компьютерной симуляции выявлена возможность снижения порога генерации за счет выбора оптимальной геометрии параметров кристалла при продольной накачке концентрированным солнечным излучением.

На основании полученных результатов показано, что для лазера с активным элементом из  $Ti^{3+}:Al_2O_3$  можно достичь мощности генерации не ниже чем у Nd:YAG.

Еще одним лазерным материалом, спектр поглощения которого охватывает широкую полосу солнечного излучения, является лазерный материал на александрите ( $Cr^{3+}:BeAl_2O_4$ ) с теплопроводностью почти в два раза превышающей теплопроводность Nd:YAG. Однако, из-за того, что лазер на александрите имеет высокий порог генерации, этот материал не нашел широкое применение в области преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения.

В связи с этим, для уменьшения порога генерации лазеров с солнечной накачкой на активных элементах, подобных александриту в данной работе предлагается новый подход, основанный на использование композитных лазерных материалов, производство которых стало возможным благодаря недавним достижениям в области развития технологии производства материалов. Имеются в виду композитные лазерные материалы, полученные с применением технологий диффузионной сварки и технологии производство прозрачной керамики. В рамках диссертационной работы исследована возможность увеличения эффективности лазера с солнечной накачкой на александрите с композитной структурой. Рассмотрены различные варианты, в частности однородный стержень, стержень с активированной сердцевиной, и композитная структура параболической формы. Моделирование проводилось для параболического концентратора с диаметром 1 м и фокусным расстоянием 0.5 м.

Наибольшее снижение порога генерации лазера достигалось при использовании композитного активного элемента параболической формы (рис.1), который позволяет достижение дополнительной концентрации солнечного излучения в самом композитном активном элементе за счет параболической формы.

Длина и диаметр активной сердцевины композитной активной среды варьируются для оптимизации рабочих характеристик, чтобы эффективность накачки и выходная мощность лазера были максимальными.

Сравнение результатов для двух вариантов композитных активных сред показывают, что использование композитной активной среды с прозрачной областью длиной 5 мм на передней части приводит к более равномерному распределению накачки, что снижает тепловую нагрузку на поверхность переднего торца и может предотвратить

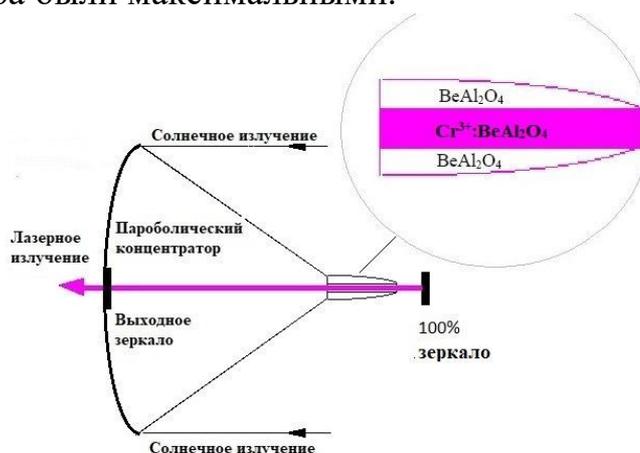


Рис. 1. Схематическое изображение предлагаемой конструкции лазера. Вкладыш - композитная активная среда

нежелательные тепловые эффекты включая разрушение кристалла.

Расчеты проведены для коэффициента отражения выходного зеркала 90%, сечении вынужденного излучения  $0.5 \times 10^{-20}$  см<sup>2</sup> и времени жизни флуоресценции 260 мкс. Результат для выходной мощности лазера в зависимости от входной мощности солнечного излучения показал, что дифференциальная эффективность (КПД) составляет 17,5%, а полный КПД - более 14,5%, что в несколько раз выше, чем у существующих лазеров с солнечной накачкой.

*Многопроходная схема с поперечной накачкой.* В лазерных системах используются в основном два типа схем накачки - схемы с торцевой (продольной) и боковой (поперечной) накачкой.

Схема торцевой накачки считается наиболее эффективной, но схема боковой накачки обеспечивает более равномерное поглощение вдоль оси стержня внутри лазерной среды, тем самым уменьшая связанные с этим проблемы тепловой нагрузки. Качество луча солнечного лазера с конфигурацией боковой накачки может быть лучше, чем конфигурация торцевой накачки. Также считается, что схема боковой накачки более удобна, чем схема торцевой накачки для масштабирования. Однако из-за того, что поперечные размеры активной среды намного меньше, чем продольные размеры, эффективность поглощения в лазерах с боковой накачкой, как правило, в два или более раза меньше, чем в лазерах с торцевой накачкой. Поэтому, чтобы повысить эффективность поглощения лазеров с боковой накачкой, в твердотельных лазерах с диодной накачкой используются подходы с высокой степенью легирования активных сред или система ретро-отражения. В реализации лазеров с ламповой или солнечной накачкой оба эти подхода проблематичны, потому что, например, в случае активной среды, легированной неодимом, максимальная концентрация ионов неодима ограничена концентрационным тушением. С другой стороны, из-за того, что

концентрированное солнечное излучение не может быть таким же параллельным, как диодный лазерный луч, обеспечение эффективной многопроходной накачки также затруднительно. С этой целью в этой работе мы предлагаем новый, простой подход для повышения эффективности поглощения солнечных лазеров с боковой накачкой, который позволяет обеспечить многопроходную накачку, такую же эффективную, как метод многократного отражения (ретро-рефлектор) в тонко-дисковых лазерах. Он основан на использовании специальной камеры (полости) накачки, внутренняя поверхность стенок которой покрыта серебром для обеспечения высокой отражательной способности. Камера накачки представляет собой прямоугольную коробку, передняя стенка которой выполняет роль ретро-рефлектора, что является основным отличием от существующих полостей накачки, используемых в солнечных лазерах с поперечной накачкой.

Другой отличительной особенностью полости накачки является то, что он также играет роль гомогенизатора (металлического световода), который обеспечивает равномерное распределение накачки по длине активной среды. На передней стенке имеется окно, через которое концентрированный солнечный поток в фокальной плоскости концентратора (параболическая тарелка или линза Френеля) вводится в полость накачки.

Принципиальная схема многопроходной накачки представлена на рис.2.

Форма активной среды – плоскопараллельная пластина, обеспечивающая эффективный отвод тепла при боковой накачке. В качестве концентратора рассматривался параболический концентратор диаметром 1м. Показано, что многопроходная конфигурация удваивает выходную мощность лазера. Для дальнейшего повышения эффективности можно использовать активный элемент Nd:Ce:YAG или внешние сенсibilизаторы.

Использование предложенной схемы повышает общую эффективность почти в два раза, обеспечивает наилучшие тепловые условия для активной среды и используемых сенсibilизаторов.

Результаты моделирования указанной конфигурации показаны на рис. 3 и 4, распределение поглощенных фотонов внутри активной среды по ее длине для конфигурации с ретро-отражателем и зависимость выходной мощности от мощности накачки солнечным излучением соответственно.

В данной главе также приведены результаты исследования возможности создания лазера с использованием

вторичного концентратора (ВК) в виде усеченной пирамиды с прямоугольными основаниями с накачкой концентрированным потоком от одного гелиостата Большой Солнечной Печи.

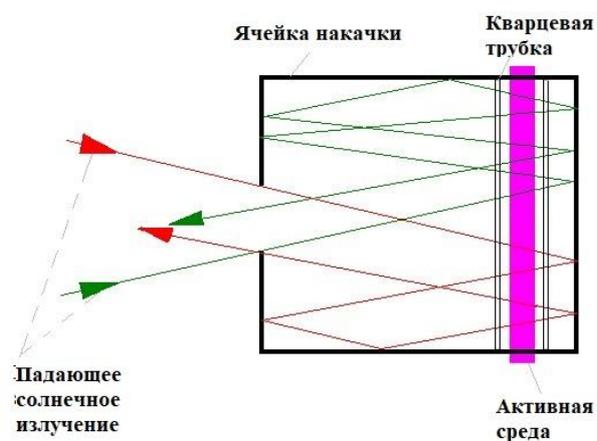


Рис.2. Многопроходная поперечная схема накачки

Моделирование проводилось для одного гелиостата размерами 7.5x6.5м<sup>2</sup>. Рассматривалась схема лазера на Nd:YAG с поперечной накачкой, и показано, что предлагаемая схема лазера с рассмотренным вторичным концентратором позволяет получить выходную лазерную мощность более 400Вт с одного гелиостата.

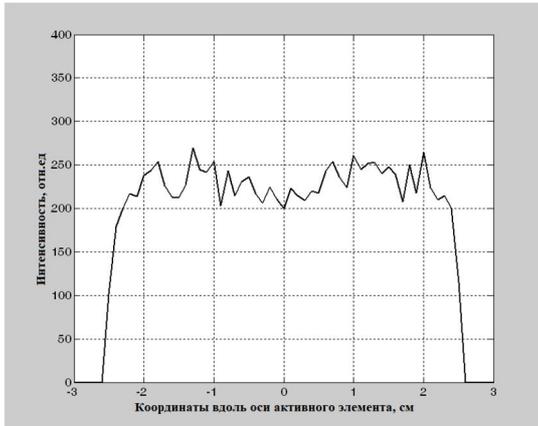


Рис. 3. Распределение поглощенных фотонов вдоль активной среды с размерами 50x8x4 мм<sup>3</sup>, для камеры накачки шириной 50 мм, длиной 40 мм и высотой 10 мм

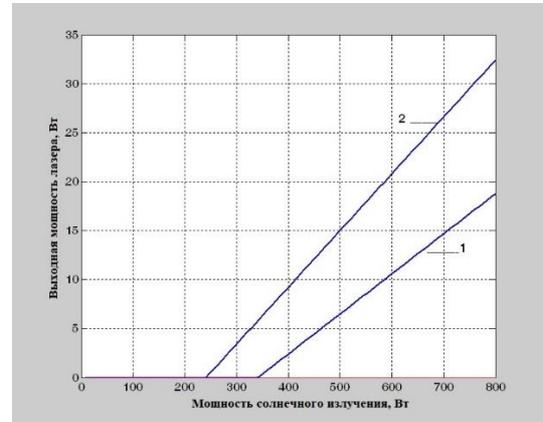


Рисунок 4. Выходная мощность лазера в зависимости от входной мощности солнечного излучения для Nd:YAG с размерами 50x8x4 мм<sup>3</sup>. 1- без ретро-отражателя, 2- с ретро-отражателем

В четвертой главе «**Численные эксперименты для лазеров с солнечной накачкой с внутренними сенсibilизаторами**» для разработки и создания эффективного варианта конструкции лазера нами были исследованы различные схемы накачки, для активных сред (Ce:Nd:YAG, Nd:Cr:GSGG) с легированием дополнительных активных ионов для передачи энергии в зону поглощения с коротковолновой части солнечного спектра.

Для проведения исследований лазеров с солнечной накачкой с внутренними сенсibilизаторами используется разработанная симуляционная модель солнечного лазера, учитывающая процесс сенсibilизации, с использованием Ce: Nd: YAG в качестве активной среды.

Рассматриваемая схема изображена на рис.5.

Анализ результатов проведенного моделирования подтвердил предположение об увеличении КПД преобразования солнечного излучения в лазерное излучение, продемонстрировав возможность увеличения более чем в 1.5 раза при использовании

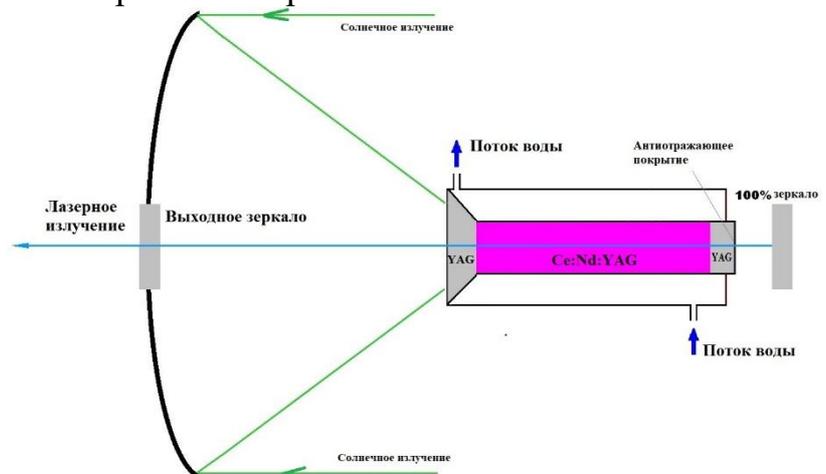


Рис. 5. Общая схема лазера

Ce: Nd: YAG для типичной солнечной радиации  $800 \text{ Вт/м}^2$  на поверхности Земли. Расчеты были проведены для параболического концентратора диаметром 1 м и стандартных значений параметров Nd: YAG размером  $10 \times 50 \text{ мм}$  и концентрацией церия 0.05%. церия.

Таким образом, симуляционные расчеты показали, что использование Nd: Ce: YAG вместо Nd: YAG может повысить эффективность накачки до 19% по сравнению с 14% Nd: YAG, что снижает пороговую мощность почти в 1,5 раза.

В данном разделе, с целью изучения возможности увеличения эффективности преобразования лазеров с солнечной накачкой, также проведено моделирование солнечного лазера на YAG керамике с высоким содержанием неодима.

Увеличение концентрации активных ионов в YAG материалах обычно приводит к уменьшению времени жизни верхнего лазерного уровня (концентрационное тушение). Кроме того, увеличение концентрации активных ионов также сопровождается повышенными потерями на рассеяние. Оба из них могут повысить пороговую мощность накачки лазера. С другой стороны, с увеличением концентрации активных ионов вероятность поглощения возрастает линейно (в первом приближении) пропорционально концентрации. Цель этого исследования состояла в том, чтобы найти некоторый компромисс между этими конкурирующими процессами, в которых эффект увеличения поглощения превосходит совокупный эффект двух других процессов, обеспечивая тем самым повышение эффективности лазера. Для этого были рассмотрены различные конфигурации с торцевой и боковой накачкой, включая лазеры дискового типа, но предварительный анализ показал, что наиболее перспективной конфигурацией является дисковая лазерная конфигурация (рис.6).

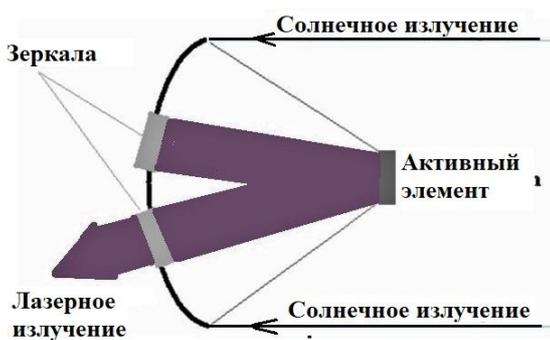


Рис. 6. Используемая двухпроходная схема

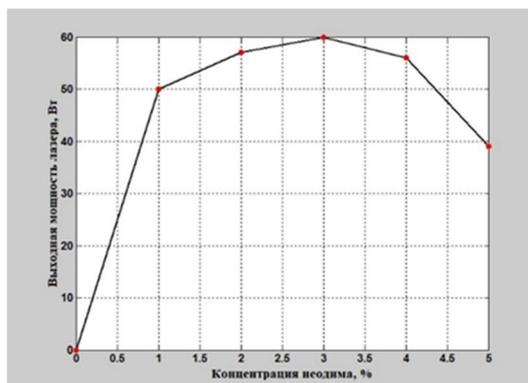


Рис. 7. Зависимость выходной мощности лазера от концентрации неодима для керамического дискового лазера на основе Nd:Ce:YAG

Результаты моделирования, полученные для активной среды Nd:Ce:YAG представлены на рис.7. Как видно из рисунка, существует ожидаемый компромисс между тремя конкурирующими процессами, где эффект увеличения поглощения превосходит совокупный эффект концентрационного тушения и увеличение потерь, обеспечивающее тем самым повышение почти в два раза эффективности лазера при максимуме, который соответствует

концентрации 3% относительно стандартной концентрации неодима в керамических или кристаллических матрицах YAG.

Показано, что использование высокой концентрации неодима в керамическом Nd:YAG -лазере обеспечивает повышение эффективности преобразования солнечной энергии в энергию лазера.

Использование керамического материала Nd:Ce:YAG с повышенной концентрацией неодима удваивает эффективность керамического Nd:YAG - лазера.

*Лазеры с солнечной накачкой на активных элементах с низкой теплопроводностью.* В то время как Nd:YAG лазерные материалы часто используются благодаря относительно высокой теплопроводности и низкого уровня порога накачки, лазерный материал Nd:Cr:GSGG, превосходящий по некоторым характеристикам, таким как лучшее перекрытие спектра поглощения со спектром солнечного излучения, порог накачки ниже, чем в Nd:YAG практически не рассматривается для накачки солнечным излучением. Это связано с тем, что теплопроводность Nd:Cr:GSGG лазерного материала почти в два раза ниже, чем у Nd:YAG. В связи с этим, в данной работе была исследована возможность решения проблемы Nd:Cr:GSGG, а именно обеспечение условия, при котором осуществляется эффективный теплосъем и вместе с этим эффективное преобразование солнечной энергии в энергию лазерного излучения с высокой эффективностью. Активный элемент Nd:Cr:GSGG имел форму в виде тонкой пластины, позволяющей обеспечить эффективный теплосъем при поперечной накачке концентрированным солнечным излучением в фокусе параболического концентратора с диаметром 1м<sup>2</sup>. Исследование проводилось методом компьютерной симуляции работы лазерной системы.

Рассматривались различные возможные схемы. Один из оптимальных вариантов конструкции, отвечающих вышеотмеченным требованиям, приведена на рисунке 8.

Полученный результат для эффективности поглощения составлял 31% для данной конфигурации. Далее проводились расчеты динамики температуры на активном элементе решением одномерного уравнения теплопроводности с учетом эффективности поглощения. Результаты показывают, что средняя температура активного

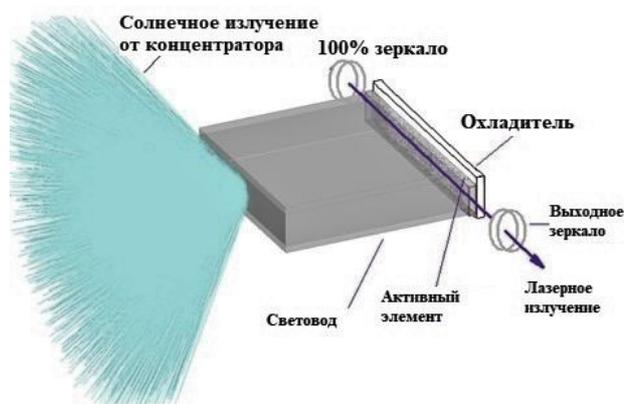


Рис.8. Схема солнечной лазерной системы

элемента может быть поддержана в пределах ниже 50<sup>0</sup>С, что обеспечивает условие для нормального функционирования лазера на основе активного элемента Nd:Cr:GSGG. На основе этих результатов и с учетом эффективности передачи энергии от хрома к неодиму, которая считается близкой к 90%

расчитывалась зависимость выходной мощности лазерного излучения от мощности солнечного излучения с использованием выражения для четырех уровневого лазера.

Как показывают результаты, предложенная конфигурация могла бы существенно увеличить лазерную мощность (в 3-4 раза) по сравнению с рекордной мощностью, которая составляет около  $30\text{Вт/м}^2$ , полученная до настоящего времени. Более того предложенная конфигурация также могла бы позволить использовать другие лазерные материалы, имеющие относительно низкую теплопроводность и которые считались непригодными для накачки концентрированным солнечным излучением до настоящего времени.

В пятой главе «**Частотное преобразование солнечного спектра с применением внешних сенсбилизаторов для увеличения эффективности лазеров с солнечной накачкой**» представлены результаты исследования возможности увеличения эффективности с применением Cr:LiCAF, Ti:сапфир и Александрита в качестве внешних сенсбилизаторов для Nd:YAG лазеров с солнечной накачкой. Описаны основные механизмы преобразования спектра солнечного излучения

Цель преобразования спектра солнечного излучения заключается в увеличении эффективности накачки лазера путем сдвига частоты неиспользуемой части солнечного спектра **внутренними или внешними преобразователями частоты** в сторону полос поглощения активного элемента. Преобразование спектра солнечного излучения можно осуществить различными способами, в частности использованием внутренних сенсбилизаторов, которые создаются введением различных дополнительных ионов-сенсбилизаторов в матрицу с активными ионами.

Однако, при этом увеличение эффективности накачки сопровождается выделением большого количества тепловой энергии, что может привести к ухудшению лазерных характеристик активного элемента, иногда даже к его разрушению. Примером этому может служить эксперименты с активным элементом на основе Nd:Cr:YAG, который предполагался эффективным лазерным материалом, но согласно экспериментальным данным, возникающие тепловые эффекты при солнечной или ламповой накачке оказались существенными, по сравнению с полученным эффектом увеличения эффективности преобразования. В связи с этим недавно, нами было предложена новая концепция, основанная на использовании внешних преобразователей солнечного излучения.

Суть новой концепции заключается в том, что сенсбилизатор отделяется от активного элемента для уменьшения влияния тепловой нагрузки на активный элемент, то есть активный элемент и сенсбилизатор используются раздельно. Это позволяет также использование различных матриц для активного иона и сенсбилизующего. Кроме того, расширяется возможность также для использования комбинацию различных сенсбилизаторов (частотных преобразователей), в том числе в различных матрицах. Существуют различные механизмы преобразования неиспользуемой части спектра солнечного излучения. Но наиболее

высокоэффективным является механизм, основанный на “down-shift” где один высокоэнергетический фотон преобразуется в другой низкоэнергетический фотон с выделением тепла.

*Лазер с солнечной накачкой с внешними преобразователями частоты из Титан-сапфира.* Преимущество вышеотмеченного механизма здесь демонстрируется на примере лазера на Nd:YAG активном элементе с продольной накачкой и конвертером частоты на основе Титан-сапфира.

Методом симуляций показана возможность более чем двукратного повышения эффективности накачки Nd:YAG лазеров с солнечной накачкой с использованием Титан-сапфир с композитной структурой в качестве элемента для смещения частоты солнечного спектра.

Проведены симуляционные расчеты для определения главного фактора лазера - общую эффективность накачки. Таким образом, полученный результат был равен 0.21 для Nd: YAG + Ti: сапфир против эффективности накачки 0.14 для Nd: YAG.

*Лазер на Nd:YAG активном элементе с поперечной накачкой и конвертером частоты из Cr: LiCAF.* Для разработки эффективного варианта конструкции лазерного стенда нами были рассмотрены различные схемы, в частности на первом этапе исследований была рассмотрена торцевая схема накачки.

Методом симуляции изучена возможность повышения эффективности накачки лазеров с солнечной поперечной накачкой Nd:YAG с использованием внешнего преобразователя частоты солнечного спектра. В качестве внешнего преобразователя частоты рассматривается  $\text{Cr}^{3+}:\text{LiCAF}$ , поскольку его превосходные свойства аналогичны свойствам  $\text{Cr}^{3+}:\text{GSGG}$ .  $\text{Cr}^{3+}:\text{LiCAF}$  имеет две широкие полосы поглощения в области 425 нм и 625 нм, которые хорошо перекрывают широкий диапазон солнечного спектра и широкую полосу излучения в области 780 нм, которая попадает в область сильных линий поглощения Nd:YAG(рис.9).

В данном разделе проведен сравнительный анализ схем боковой и торцевой накачки с применением  $\text{Cr}^{3+}:\text{LiCAF}$  в качестве внешнего преобразователя частоты для Nd:YAG лазера с солнечной накачкой. Показано, что использование частотного преобразователя Cr:LiCAF значительно повышает эффективность накачки активной среды Nd: YAG в обоих случаях. Кроме того, замена Nd:YAG на Nd:YAG, легированным

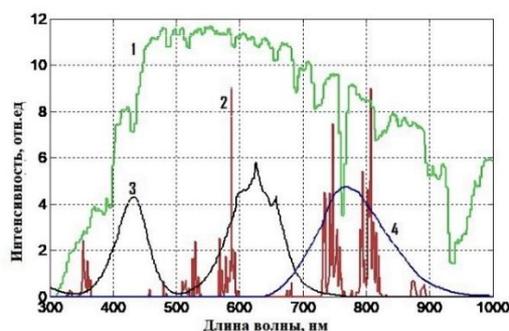


Рис.9. 1 - стандартный спектр Солнца, 2 - спектр поглощения Nd: YAG, спектры поглощения и эмиссии 3,4-Cr: LiCAF соответственно

цирем - Се, показала возможность дальнейшего повышения эффективности.

Для оптимизации параметров лазерной системы были проведены симуляционные расчеты для различных конструкций с преобразователем

частоты на Cr<sup>3+</sup>:LiCAF. Оптимизированная конструкция для поперечной накачки показана на рис.10.

Моделирование было выполнено для параболического солнечного концентратора с диаметром 2м и фокусным расстоянием 0.9м.

Световод (рис.10) из плавленного кварца с прямоугольным поперечным сечением использовался для

передачи и гомогенизации сконцентрированного потока солнечного излучения из фокальной зоны параболического концентратора к входной апертуре охлаждаемой камеры накачки.

Размеры Nd:YAG активной среды: диаметр 10мм, длина 50мм. Для сравнения моделирование проводилась с и без частотного преобразователя. В случае торцевой накачки использовалась конфигурация аналогичная с схемой, показанной на рис. 8 с единственным отличием, что вместо Ti:Sapphire использовалось Cr:LiCAF в качестве внешнего сенсбилизатора.

Результаты приведены в таблице I, для сравнения в этой таблице также приводятся результаты для конфигурации с торцевой накачкой. Как видно из таблицы, полученные результаты показывают существенное увеличение эффективность накачки Nd:YAG лазеров с солнечной накачкой, при использовании Cr:LiCAF в качестве внешнего конвертера частоты, как для торцевой накачки, так и для поперечной накачки.

Таблица I.

Эффективность накачки для различных комбинаций активных элементов и преобразователя частоты

Активная среда	Преобразователь частоты	Эффективность при поперечной накачке	Эффективность при торцевой накачке
Nd:YAG	-	0.08	0.14
Ce:Nd:YAG	-	0.11	0.21
Nd:YAG	Cr:LiCAF	0.12	0.26
Ce:Nd:YAG	Cr:LiCAF	0.15	0.33

На основе этих результатов, используя выражение для мощности четырехуровневого лазера проводились расчеты зависимости выходной лазерной мощности от входной солнечной мощности для выходного зеркала с коэффициентом отражения 95%.

Результаты расчетов для конфигурации с поперечной накачкой приведены на рис.11а, который показывает существенное увеличение выходной мощности при использовании внешнего преобразователя частоты солнечного спектра на основе Cr:LiCAF. На рис. 11b приведены результаты для схемы с торцевой накачкой.

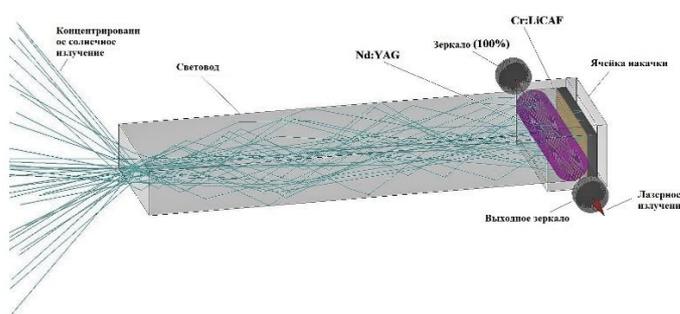


Рис.10. Лазер с поперечной накачкой и с конвертером частоты

Таким образом, исследована возможность увеличения эффективности Nd:YAG лазеров с солнечной накачкой, использованием нового простого подхода, основанного на использовании Cr:LiCAF как внешнего преобразователя частоты (frequency down-shifter) большого количества непоглощенных солнечных фотонов. Рассматривались конфигурации лазеров, как с торцевой, так и поперечной накачкой.

Самая высокая эффективность накачки 33% была рассчитана в случае торцевой накачки. Однако, хотя конфигурация с торцевой накачкой имеет более высокую эффективность, поперечная схема накачки является более удобной конфигурацией для манипуляции и повышения мощности (например, увеличением размера солнечного концентратора) так же как для дальнейшего увеличения эффективности накачки (например, использованием мульти-элементной конфигурации).

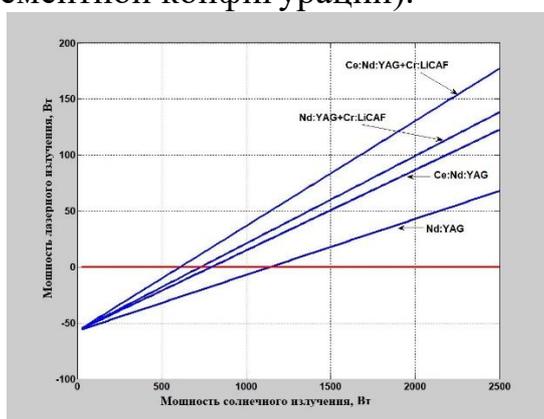


Рис. 11а. Зависимости выходной мощности лазерного излучения от входной мощности (солнечного излучения) при поперечной накачке для параболического концентратора с диаметром 2м

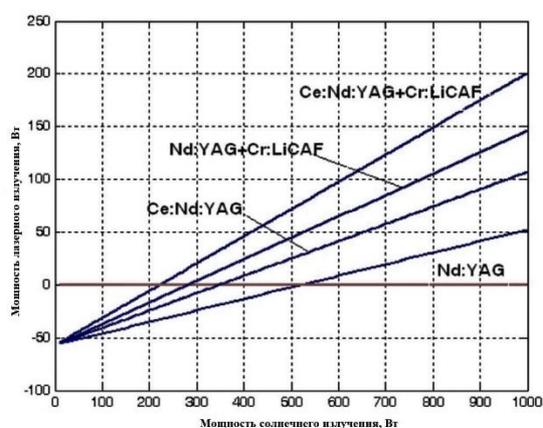


Рис. 11b. Зависимости выходной мощности лазерного излучения от входной мощности при торцевой накачке для параболического концентратора с диаметром 1м

Главными преимуществами использования таких внешних преобразователей частоты были бы:

уменьшение тепловой нагрузки на активную среду;

возможность использования различных материалов для активной среды и преобразователя частоты;

менее жесткие требования для тепловых свойств (термически - наведенное двойное лучепреломление, эффект линзы) преобразователя частоты;

возможность независимого регулирования температуры (регулировкой потока охлаждающей жидкости) активной среды и преобразователя частоты, при необходимости.

*Александрит в качестве внешнего сенсбилизатора - преобразователя частоты солнечного излучения.* Активная среда на александрите известно, благодаря своей высокой теплопроводности и улучшению лазерных характеристик с повышением температуры. Перестраиваемые лазеры на основе александрита часто работают при температурах свыше 100 °С. Это связано, с тем что с повышением температуры кристалла увеличивается

заселенность его верхнего лазерного уровня и соответственно сечение люминесценции в области 750нм, когда лазер работает в четырехуровневом режиме.

Отметим, что лазер на александрите может работать как в трехуровневом режиме с длиной волны генерации 680нм, как рубиновый лазер, так и в четырехуровневом режиме с широкой полосой перестройки в диапазоне от 700нм до 820нм с максимумом в окрестности 750нм (рис.12).

В литературе недавно были представлены подробные измерения спектров эффективного сечения люминесценции усиливающей среды на александрите в диапазоне температур 25-450°С показано, что с увеличением температуры спектр люминесценции александрита сдвигается в сторону больших длин волн. Известно также, что радиационная квантовая эффективность александрита при низких температурах остается близкой к единице ( $0,95 \pm 0,05$ ) и практически не изменяется до температуры до 400°С.

На рис.12 сравниваются спектры люминесценции при температурах 25°С и 325°С со спектром поглощения Nd:YAGактивного элемента. Как видно из рисунка спектр люминесценции александрита при температурах 325°С лучше перекрывается с основными полосами поглощения Nd:YAG в области 750нм и 808нм по сравнению со спектром люминесценции при 25°С, что являлось поводом для рассмотрения в данной диссертации александрита в качестве внешнего сенсibilизатора с температурным контролем.

Другая, немало важная причина – это высокая теплопроводность александрита, которая дает возможность легко управлять температурой, например, путем регулировки расхода охлаждающей жидкости.

Таким образом, изучалась возможность использования александрита в качестве внешнего

сенсibilизатора (преобразователя неиспользуемой части частоты солнечного спектра) методом симуляции в рамках изложенной выше модели.

Для моделирования использовалась конструкция с ретро-рефлектором и расчеты проводились для параболического концентратора с диаметром 1м и фокусным расстоянием 0.5м. Предполагалось, что активный элемент и внешний сенсibilизатор охлаждаются отдельно и температурный контроль сенсibilизатора, имеющего форму прямоугольной пластины, охлаждаемого через металлический тепло-съемник, осуществляется регулировкой расхода воды, пропускаемой через тепло-съемник.

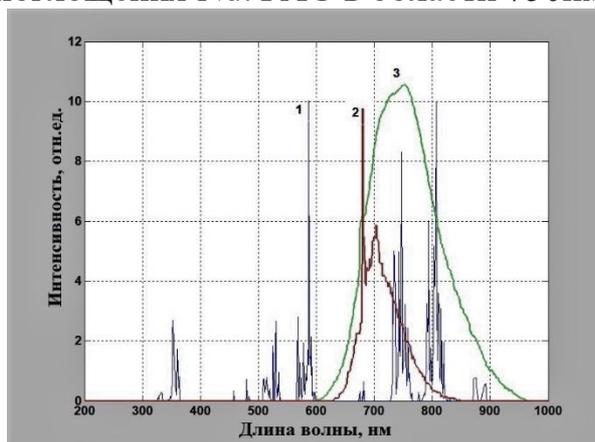


Рис.12. Спектры люминесценции александрита и спектр поглощения Nd:YAG. 1- спектр поглощения Nd:YAG, 2- Спектр люминесценции александрита при температуры 25°С, 3- Спектр люминесценции александрита при температуры 325°С

На рис. 13 представлены все результаты, полученные методом симуляции, для сравнения.

Первая линия в первом приближении соответствует современному уровню достижений в области лазеров с поперечной накачкой солнечным излучением. Как видно из рисунка 2-я зависимость показывает почти двукратное увеличение выходной мощности лазера в районе 800Вт мощности солнечного излучения, при использовании предложенного нами ретро-рефлектора.

Добавление внешнего сенсibilизатора на основе александрита показывает дальнейшее увеличение как при температуре сенсibilизатора 25°C, так и 325°C, однако при температуре 325°C наблюдается существенное увеличение по сравнению с линией 2 чем 25°C. Это увеличение составляет около двух раз при падающей мощности 800Вт, Далее для дальнейшего увеличения мы использовали комбинацию Ce:Nd:YAG+Александрит(325°C), где было получено самое большое увеличение выходной мощности лазерного излучения по сравнению с другими вариантами, рассмотренными в данном исследовании а также самую высокую эффективность преобразования по сравнению со всеми результатами исследований проведенных в рамках диссертационной работы.

Сравнение показывает, что использование схемы с ретро-рефлектором в комбинации с внешним сенсibilизатором на основе александрита позволяет увеличить выходную мощность лазерного излучения и соответственно эффективность преобразования до пяти раз по сравнению с текущим уровнем мощности, достигнутом при поперечной накачке с солнечным излучением.

Данное исследование показало также, что александрит является перспективным кандидатом в качестве внешнего сенсibilизатора для лазера на Nd:YAG и Ce:Nd:YAG.

Причем схема Ce:Nd:YAG+Александрит является наилучшим вариантом лазера с солнечной накачкой, выходная мощность, которого может достигнуть 100 Вт. При этом необходимо решить поддержания температуры александрита в области 300-350 °C.

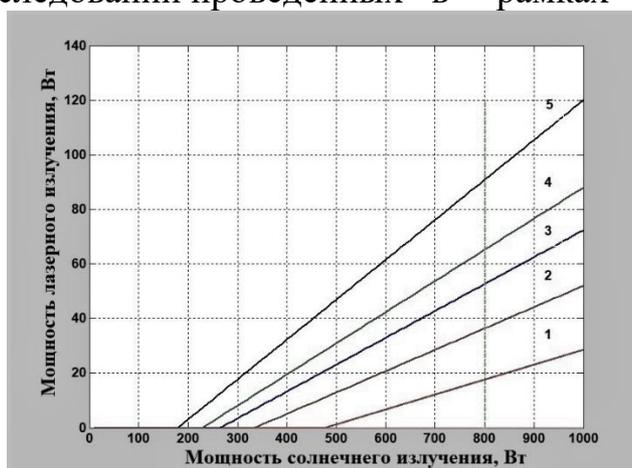


Рис.13. Результаты симуляции для активных элементов размерами 6x6x50мм<sup>3</sup>. 1- Nd:YAG (без ретро-рефлектора), 2- Nd:YAG, 3- Nd:YAG+Alexandrite (25°C) , 4- Nd:YAG+Alexandrite (325°C), 5- Ce:Nd:YAG+Alexandrite (325°C). Зависимости 2-5 с ретро-рефлектором

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые предложена новая многопроходная схема для солнечного Nd:YAG-лазера с поперечной накачкой для повышения эффективности преобразования. Показано, что предложенная многопроходная конфигурация удваивает выходную мощность лазера.

2. Предложен простой подход для достижения высокой эффективности работы лазера с солнечной накачкой на александрите. Анализ эффективности проводился путем моделирования лазера на александрите с солнечной накачкой и активной средой параболической формы с легированным сердцевинной. Для моделирования использовался метод трассировки лучей Монте-Карло. Впервые показано, что общая эффективность лазера на александрите может составлять около 15%, что значительно выше, чем у существующих лазеров с солнечной накачкой.

3. Предложена новая статистическая модель для симуляции процессов передачи энергии и сенсбилизации в лазерах с солнечной накачкой на активной среде на основе Ce:Nd:YAG. С помощью предложенной модели впервые показано, что добавление Ce к Nd:YAG увеличивает дифференциальную эффективность лазера с солнечной накачкой в два раза и соответственно, увеличивает выходную мощность в два раза, и снижает пороговую мощность накачки в 0,6 раза.

4. Впервые предложена возможность использования Cr:LiCAF в качестве внешнего преобразователя частоты солнечного спектра для повышения эффективности накачки лазеров с солнечной накачкой на Nd:YAG. Методом компьютерной симуляции проведен сравнительный анализ схем с продольной и поперечной накачкой. Были проведены численные эксперименты для комбинаций активной среды Nd:YAG и Cr:LiCAF как для поперечной, так и для продольной накачек. Показано, что использование внешнего частотного преобразователя на основе Cr:LiCAF значительно повышает эффективность накачки активной среды Nd:YAG в обоих случаях. Кроме того, показано что, замена Nd:YAG на Ce:Nd:YAG приводит к дальнейшему повышению эффективности.

5. С помощью метода Монте-Карло и трассировки лучей был исследован прозрачный керамический YAG, легированный неодимом для применения в преобразовании солнечной энергии в лазерную. Впервые показано, что использование высоколегированных керамических Nd:YAG лазерных материалов в качестве активной среды в дисковых лазерах с солнечной накачкой повышает эффективность преобразования солнечной энергии в лазерную по сравнению с обычно используемым Nd:YAG с концентрацией неодима в 1%.

6. Исследование методом компьютерной симуляции работы лазерной системы рассмотрена возможность достижения высокой эффективности преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения на базе активного элемента Nd:Cr:GSGG в виде тонкой пластины, позволяющая обеспечить эффективный теплосъем при многопроходной поперечной накачке

концентрированным солнечным излучением в фокусе параболического концентратора с диаметром  $1\text{ м}^2$ . Впервые предложена конфигурация лазера, которая имеет возможность существенно увеличить лазерную мощность, в 3-4 раза по сравнению с рекордной мощностью достигнутой к настоящему времени.

7. Впервые исследована возможность преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения на базе активного элемента  $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ . Методом компьютерной симуляции показана возможность снижения порога генерации за счет выбора оптимальной геометрии параметров кристалла при продольной накачке концентрированным солнечным излучением.

8. Предложена новая эффективная схема лазера с солнечной накачкой на  $\text{Ce:Nd:YAG}$ . Впервые показано, что при продольной схеме накачки использование  $\text{Ce:Nd:YAG}$  вместо  $\text{Nd:YAG}$  может повысить эффективность накачки до 19%.

9. Исследована возможность создания эффективного лазера, работающего на концентрированном потоке солнечного излучения, создаваемого отдельным гелиостатом БСП. Показано, что предлагаемая схема лазера с вторичным концентратором позволяет получить выходную лазерную мощность более 400Вт с одного гелиостата без внешнего сенсibilизатора, а при использовании внешнего сенсibilизатора порядка 1 кВт.

10. Впервые предложена использование титан-сапфир ( $\text{Ti:Sapphire}$ ) в качестве внешнего сенсibilизатора для смещения частоты солнечного спектра. Методом симуляции показана возможность более чем двукратное повышение эффективности накачки  $\text{Nd:YAG}$  лазеров с солнечной накачкой с использованием титан-сапфир.

11. Впервые предложена использование александрита ( $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ ) в качестве внешнего сенсibilизатора с температурным контролем. Показана возможность более чем пятикратное повышение эффективности накачки  $\text{Nd:YAG}$  лазеров с солнечной накачкой с использованием александрита ( $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ ) в схеме с поперечной накачкой.

**SCIENTIFIC COUNCIL No.DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 ON AWARDING  
OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF ION-PLASMA AND  
LASER TECHNOLOGIES**

---

**INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES**

**MAKHMUDOV KHIKMAT MAKHAMATOVICH**

**SOLAR PUMPED LASERS WITH SOLAR SPECTRUM FREQUENCY  
CONVERTERS**

**01.04.11 – Laser physics**

**ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION (DSc)  
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

**TASHKENT – 2021**

**The subject of doctoral dissertation is registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2018.2.DSc/FM123.**

The dissertation has been prepared at the Institute of Ion-plasma and laser technologies.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) has been posted on the website of the Scientific Council (<http://iplt.uz/>) and on Information-educational portal "ZiyoNet" (<http://www.ziynet.uz/>).

**Scientific consultant:**

**Shermakhamat Payziyev**

doctor of physical and mathematical sciences

**Official opponents:**

**Eshkobilov Napas Beknazarovich,**

doctor of physical and mathematical sciences, professor

**Sapaev Usman Kalandarovich**

doctor of physical and mathematical sciences

**Makhmanov Urol Kudratovich**

doctor of physical and mathematical sciences

**Leading organization:**

**National University of Uzbekistan**

The defense will take place on « 8 » July 2021 at 14<sup>00</sup> at the meeting of the Scientific Council number DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 at the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent city, 33, Durmon yuli str. Phone: (99871) 262-42-54, e-mail: info@iplt.uz.

The doctoral dissertation is can be looked throughin the Information-Resource Centre of theInstitute of Ion-Plasma and Laser Technologies (is registered № 6 ) (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent city, 33, Durmon yuli str. Phone: (99871) 262-42-54 Phone: (99871) 262-32-54.)

The abstract of the dissertation is sent out on « 01 » July 2021.

(mailing report № 6 on « 01 » July 2021).



**K.B.Ashurov**

Chairman of Scientific Council on Award of Scientific Degrees, Doctor of Technical Sciences, Professor

**I.D.Yadgarov**

Scientific Secretary of Scientific Council on Award of Scientific Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

**S.A.Bakhramov**

Chairman of Scientific Seminar under Scientific Council on Award of Scientific Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician

## INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

**Topicality and necessity of the thesis.** Today, research in the field of solving the problems of solar-pumped lasers, due to the ability to obtain light fluxes with a high density compared to concentrated solar radiation, can lead to the emergence of new high-temperature technologies based on the use of renewable energy sources. In this regard, research in the field of development and creation of new highly efficient solar-pumped lasers, lasers using the maximum part of the solar spectrum for maximum conversion efficiency and the search for new composite laser materials with high optical characteristics represents the important scientific and practical tasks and substantiates the relevance of the dissertation subject.

**Conformity of the research to the priority areas of science and technology development of the Republic of Uzbekistan.** The present research work has been carried out in accordance with the priority areas of science and technology of the Republic in the framework of PAR-4 “Development of methods of use of renewable energy sources, creation of technologies and devices on the base of nanotechnology, photonics and other advanced technologies.

**The goal of the research** is to identify the optimal laser schemes, materials for the active media and the study of laser schemes with solar frequency converters to increase the efficiency of converting solar energy into laser radiation energy.

**The objects of the research** are solar-pumped solid-state lasers, laser active elements, materials that convert the wavelength of solar radiation (sensitizers), and laser resonator circuits.

**The scientific novelty of the research** is as follows:

A new scheme for pumping a Nd: YAG solar laser with multi-pass pumping of solar radiation through the active element was developed and proposed.

A new model of energy transfer and sensitization in solar-pumped lasers is proposed.

An alexandrite solar laser is designed, which has a special shape that allows to further concentrate solar radiation on the active element and allows to achieve a total conversion efficiency of solar radiation of about 15%.

It was shown for the first time that the effect of adding Ce 3+ ions to Nd: YAG reduces the threshold power by a factor of 1.7, doubles the differential efficiency of the laser, and, accordingly, doubles the output power of the laser.

It was shown that the use of Cr: LiCAF as an external frequency converter of the solar spectrum in a transverse-pumped laser scheme leads to a significant increase in the laser efficiency.

The dependence of the efficiency of a solar-pumped laser on the concentration of neodymium in a ceramic YAG material is studied. It is shown that the use of a high concentration of neodymium in a ceramic Nd: YAG laser provides an increase in the efficiency of converting solar energy to laser energy.

It was shown the possibility of creation of an effective solar laser based on an active element from Nd: Cr: GSGG, despite its low thermal conductivity. A laser configuration has been created, which has the ability to increase laser power by 3-4 times compared with the record power achieved to date.

The possibility of converting solar energy into laser energy based on the active element  $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$  had been studied and it was shown that the lasing threshold could be reduced by choosing the optimal geometry of the crystal parameters during end pumping by concentrated solar radiation.

A new efficient scheme of a Ce: Nd: YAG solar-pumped laser was proposed. It was shown for the first time that with an end-pumping scheme, the use of Ce: Nd: YAG instead of Nd: YAG can increase the pumping efficiency by 19%.

The use of titanium sapphire (Ti: Sapphire) as an external sensitizer for shifting the frequency of the solar spectrum was first proposed.

For the first time, the use of Alexandrite ( $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ ) as an external sensitizer with temperature control is proposed.

**Implementation of the research results.** The proposed model of a Nd: YAG solar laser using Cr: LiCAF as an external frequency converter for the solar spectrum was used in more than 15 scientific publications (Dual-rod pumping approach for tracking error compensation in solar-pumped lasers, Bruno D. Tiburcio, Dawei Liang, Joana Almeida, Dario Garcia and Cláudia R. Vistas, June 2019, Journal of Photonics for Energy 9 (2), IF: 2.287; Enhanced near-infrared emission in  $\text{Yb}^{3+} - \text{Cr}^{3+}$  codoped  $\text{KZnF}_3$  glass ceramics excited by a solar simulator, XinWang, Wenhao Li, KeTian, Elfed Lewis, Shunbin Wang, Gilberto Brambilla, Yongkang Dong, Xiao Wu, Pengfei Wang, April 2019, Ceramics International 45 (6), IF: 3.45, Side-pumped continuous-wave Nd: YAG solar laser with 5.4% slope efficiency, Dawei Liang, Cláudia R. Vistas, Joana Almeida, BrunoD. Tiburcio, Dario Garcia, Apr 2019, SOL ENERG MAT SOL C, IF: 6.019, A donut-shaped Nd: YAG solar laser beam with 4.5 W / m<sup>2</sup> collection efficiency, Cláudia R. Vistas, Dawei Liang, Joana Almeida, Bruno D. Tiburcio, Dário Gracia, Apr 2019, SOL ENERGY, IF: 4.674, and so on). Using the data allowed the authors to prove that the conversion efficiency of solar lasers can be much greater than the results achieved to date. These data were also used in two doctoral dissertations [Advances in solar-pumped laser efficiency and brightness, Joana Isabel Lázaro Almeida (High-efficiency solar laser pumping by a ring-array concentrator, Matos Rodrigo)].

The result of research on a Ce:Nd:YAG laser, where it was shown that the addition of Ce to Nd: YAG increases the differential efficiency of a solar-pumped laser and, accordingly, increases the pump efficiency by more than 30%, is used in literature (Influence of annealing atmosphere on the optical quality and pulsed laser performance of Ce:Nd:YAG single crystal, MRA Moghaddam, D Razzaghi, JH Barbaran at. all, Optik, 2019, Volume 181, March 2019, Pages 941-947, IF:1.91) as evidence of promise new material as an active medium for a solar laser.

On the base of the results of the dissertation it was received one certificate of registration of a software product (No: DGU 20191017, 2019) and one patent application was registered (No: IAP20200030/1 of 29 April 2020).

**Structure and volume of dissertation.** Dissertation consists of introduction, five chapters, conclusion and a list of references. The dissertation contains 152 pages of printed text including 88 figures and 3 tables.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ

### I бўлим (I часть; part I)

- 1A. Sh. Payziyev, Kh. Makhmudov and Yasser A. Abdel-Hadi, Simulation of a New Solar Ce:Nd:YAG Laser System, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 156, 891–895, 2018 [№3.Scopus, IF: 3.7]
- 2A. Sh. Payziyev, Kh. Makhmudov. “Enhancing of solar pumped Nd:YAG laser efficiency using Cr:LiCAF frequency down-shifter”, *Optics Communications*, 380, pp. 57-60, 2016 [№3.Scopus, IF: 4.1]
- 3A. Bakhrarov S. A., Sherniyozov A. A., Payziyev SH. D., Zikrillayev KH. F., Khalikov G. A., Makhmudov KH. M., Ismailov M. Z., Payzieva D. E., Khottchenkova T. G., Feasibility of Luminophores in Solar-Pumped Laser Heads, *Journal of applied spectroscopy*, Vol. 88, issue 2, p. 370-372, 2021 [№3.Scopus, IF: 1.0]
- 4A. Sh. Payziyev, Kh. Makhmudov, A simple multi-pass side-pumping scheme for solar powered lasers *Recent Advances in Photonics and Optics*, v.2, issue 1, p.30-35, 2019, [№35, Crossref],
- 5A. Sh. Payziyev, Kh. Makhmudov and A. Kasimov, Performance analysis of solar pumped alexandrite laser: A new way for lowering the threshold power, *Recent Advances in Photonics and Optics*, v.2, issue 1, p.26-30, 2019, [№35, Crossref],
- 6A. A.A. Sherniyozov, Sh.D. Payziyev, Kh.F. Zikrillayev, G.A. Khalikov, S.A. Bakhrarov, Kh.M. Makhmudov, M.Z. Ismailov, D.E. Payziyeva, Effect of color converters on the performance of solar or light-emitting diode pumped solid-state lasers, *Uzbek journal of physics*, Vol. 22, No. 5, p. 287-290, 2020 [01.00.00, №5]
- 7A. Sh. Payziyev, Kh. Makhmudov and F. Shayimov, Simulation of solar pumped highly neodymium-doped ceramic YAG disc laser, *Uzbek Journal of Physics*, V21, No: 3, p. 168-171, 2019 [01.00.00, №5]
- 8A. Sh. Payziyev, S. Bakhrarov, Kh. Makhmudov and A. Fayziev, Highly efficient Nd: Cr: GSGG laser with side-pumping by solar radiation, *Uzbek Journal of Physics*, V20, No: 3, 197-199, 2018. [01.00.00, №5]
- 9A. Sh. Payziyev, Kh. Makhmudov, S. Bakhrarov and A. Kasimov, Solar pumped laser based on composite titanium-sapphire active medium, *Uzbek Journal of Physics*, V20, No: 5, p. 321-323, 2018. [01.00.00, №5]
- 10A. Sh. Payziyev, S. Bakhrarov, Kh. Makhmudov and F. Shayimov, Solar pumped Ce:Nd:YAG laser, *Uzbek Journal of Physics*, No 4, pp.194-198, 2016 [01.00.00, №5]
- 11A. М.Д. Хоменко, Ш.Д. Пайзиёв и Х. М. Махмудов, Численное моделирование термонапряжений в твердотельных лазерах с солнечной накачкой, *Ученые записки МГУ*, №2, 1920401, 2019 [№52]
- 12A. Sh. Payziyev, Kh. Makhmudov, K. Khusanav and A. Fayziev, Simulation of new type solar powered laser, *АСТА ТТПУ*, No:4, pp.34-37, 2018 [05.00.00, №25]

## II бўлим (II часть; part II)

13А. Ш.Д. Пайзиев, Х.М. Махмудов, Статистическая модель процесса сенсбилизации в лазерных активных средах. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, Заявка № DGU 20191017, 2019

14А. Ш. Д. Пайзиев, Х.М.Махмудов, А.А.Шерниёзов, «Александрит в качестве внешнего сенсбилизатора- преобразователя частоты солнечного излучения», Республиканская научная конференция по физической электронике и фотонике, Ташкент, Узбекистан, 23 октября 2019 года.

15А. Ш.Д.Пайзиев, Ю.Б.Собиров, Х.М.Махмудов, «Фокон для равномеризации концентрированного солнечного потока», Республиканская научная конференция по физической электронике и фотонике, Ташкент, Узбекистан, 23 октября 2019 года.

16А. Ш.Д.Пайзиев, С.А. Бахрамов, А.К. Касимов, Х.М. Махмудов, Лазер с солнечной накачкой на титан-сапфировом активном элементе, Международная конференция IPES-7, Ташкент, 18-19 мая 2018, стр.117

17А. Ш.Д.Пайзиев, С.А. Бахрамов, Х.М. Махмудов, А.Ш. Файзиев, О возможности высокоэффективного преобразования энергии солнечного излучения в энергию лазерного излучения, Республиканская конференция, Андижан, 20-21 апреля, 2018

18А. Sh. Payziyev, Kh. Makhmudov and Yasser A. Abdel-Hadi, Ti:sapphire as a frequency converter for solar pumped Nd:YAG lasers, Международная конференция, «фундаментальные и прикладные вопросы физики», 13-14 июня, 2017

19А. Ш. Д. Пайзиев, Х. М. Махмудов, Ф.Ф. Шайимов “О возможности создания лазера на александрите с солнечной накачкой”. Республиканская конференция “Оптические методы в современной физике”, Ташкент, 26-27 май, 2016

20А. С. А. Бахрамов, Х. М. Махмудов, А. Ш. Файзиев, Д. Э. Пайзиева, «Исследование возможности создания Nd:YAG лазера, работающего на отдельном гелиостате БСП», Научная конференция «Возобновляемые источники энергии: технологии и установки», 14-15 июня, Ташкент, 2016

21А. С.А. Бахрамов, Х.М. Махмудов, Ф.Ф. Шаимов, Д.Э. Пайзиева, «Исследование возможности создания жидкостного лазера с накачкой солнечным потоком от отдельного гелиостата БСП», Международная конференция по актуальным проблемам молекулярной спектроскопии конденсированных сред, 22-24 сентября, Самарканд, 2016

22А. Sh. Payziyev, S. Bakhramov, Kh. Makhmudov and F. Shayimov «End pumped Cerium codoped Nd:YAG solar laser», International conference “Fundamental and Applied Problems of Physics”, Tashkent, Uzbekistan, November 5-6, 2015

Автореферат «Til va adabiyot ta'limi» журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек, рус ва инглиз тилидаги матнлар ўзаро мувофиқлаштирилди.

Босишга рухсат этилди: 01.06.2021 йил  
Бичими 60x84 1/8 , «Times New Roman»  
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.  
Шартли босма табағи 4,3. Адади: 100. Буюртма: № 05.05  
Тел.: (99) 832 99 79; (97) 815 44 54  
«IMPRESS MEDIA» МЧЖ босмахонасида чоп этилди.  
Манзил: Тошкент ш., Яккасарой ткмани, Кушбеги кўчаси, 6 уй.