

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ, САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017.ҒМ/Т.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ИОН ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

**ПАЙЗИЕВ ШЕРМАХАМАТ ДАЛИЕВИЧ
ҚАТТИҚ ЖИСМЛИ ҚУЁШ НУРИ БИЛАН ИШЛАЙДИГАН
НЕОДИМ ЛАЗЕРЛАРИ**

01.04.11 – Лазер физикаси

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

ТОШКЕНТ – 2017

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси
Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации
Contents of the of Doctoral (DSc) Dissertation Abstract

Пайзиев Шермахамат Далиевич

Қаттиқ жисмли куёш нури билан ишлайдиган неодимлазерлари..... 3

Пайзиев Шермахамат Далиевич

Твердотельные неодимовые лазеры с солнечной накачкой..... 27

Payziyev Shermakhamat Daliyevich

Solar pumped solid state neodymium lasers..... 51

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works 55

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ, САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017.ҒМ/Т.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ИОН ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

ПАЙЗИЕВ ШЕРМАХАМАТ ДАЛИЕВИЧ

**ҚАТТИҚ ЖИСМЛИ ҚУЁШ НУРИ БИЛАН ИШЛАЙДИГАН
НЕОДИМ ЛАЗЕРЛАРИ**

01.04.11 – Лазер физикаси

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

ТОШКЕНТ – 2017

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий Аттестация комиссиясида В2017.2.DSc/FM52 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Ион-плазма ва лазер технологиялари институтида бажарилган. Диссертация автореферати икки тилда (ўзбек, рус) Илмий кенгашнинг веб-саҳифаси (fti-kengash.uz) ва “ZiyoNet” ахборот-таълим порталига (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:

Бахрамов Сагдилла Абдуллаевич
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Ашуров Мухсин Хурамович
физика-математика фанлари доктори, академик

Кодиров Мумин Кодирович
физика-математика фанлари доктори

Нематов Шерзод Каландарович
физика-математика фанлари доктори

Етакчи ташкилот:

Ўзбекистон Миллий университети

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти, Ион плазма ва лазер технологиялари институти, Самарқанд давлат университети ҳузуридаги фан доктори илмий даражасини берувчи DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2017 йил «_14_»_ноябр_____соат 15⁰⁰даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net, Физика-техника институти мажлислар зали).

Докторлик диссертацияси билан Физика-техника институти Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (14 рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй, Физика-техника институти. Тел./факс: (99871) 235-30-41.

Диссертация автореферати 2017 йил «____» _____ куни тарқатилди.
(2017 йил «____» _____ даги 22 рақамли реестр баённомаси)

С.Л. Лутпуллаев

Илмий даражалар берувчи бир марталик илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

А.В. Каримов

Илмий даражалар берувчи бир марталик илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д., профессор

С.С. Қурбанов

Илмий даражалар берувчи бир марталик илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси,
ф.-м.ф.д

КИРИШ (докторлик диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳон миқёсида бугунги кунда жадал ривожлананаётган йўналишлардан бири бўлган қуёш нури энергиясини лазер энергиясига айлантирувчи қурилмаларни яратиш соҳасида муҳим физик муаммолардан бири, кенг полосали қуёш спектрини лазер нурига айлантириш самарадорлигини ошириш имконини берувчи маълум физик хоссаларга эга бўлган янги актив материалларни танлаш ва уларни қўллаш жараёнида келиб чиқадиган салбий термик эффектларни олдини олишдан иборат. Шу нуқтаи назардан материалшунослик ва бошқа замонавий оптика ва лазер физикаси соҳасида эришилган ютуқлар асосида қуёш нури энергиясини лазер нури энергиясига айлантириш жараёнининг янги самарали йўллари тадқиқ этиш муҳим вазифалардан бири бўлиб қолмоқда.

Ҳозирги кунда жаҳонда қуёш нури билан оптик дамланадиган лазерлар, яъни кенг полосадаги қуёш нурини когерент, монохроматик ва йўналтирилган лазер нурига айлантирувчи қурилмаларнинг муаммоларини тадқиқ қилиш лазер нурининг санаб ўтилган хусусиятлари туфайли қуёш нури энергиясини лазер энергиясига айлантириш, қуёш концентраторлари фокусида олиш мумкин бўлган зичликлардан сезиларли даражада катта бўлган ёруғлик оқимини олиш ва амалиётга қўллаш имконини беради. Бу борада мақсадли илмий тадқиқотларни амалга ошириш, жумладан, юқори самарадорликка эга бўлган қуёш нури ёрдамида оптик дамланадиган лазерларни ишлаб чиқиш ва яратиш; материалшунослик ва бошқа замонавий фанлар соҳасида эришилган ютуқлар асосида қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерлар самарадорлигини оширишнинг янги йўллари излаш ва аниқлаш муҳим вазифалар ҳисобланади.

Мустақиллик йилларида мамлакатимизда қуёш нури билан ишлайдиган лазер физикаси соҳасини самарали ривожлантириш борасида турли физик ҳодисалар ва жараёнларни қамраб олган лазер қурилмаларининг бир неча турларини яратишда фундаментал аҳамиятга эга бўлган тадқиқотларга алоҳида эътибор берилмоқда. Бу борада маълум оптик хоссаларга эга бўлган сифатли янги материаллар базасида, ҳамда замонавий талаблар асосида кристалларга қўшимча элементларни киритиш билан самарадорликни ошириш йўллари мукамаллаштириш борасида сезиларли натижаларга эришилмоқда. Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегиясини келгусида амалга ошириш чора-тадбирлари тўғрисида» ги Фармони асосида қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланиш соҳасидаги фундаментал изланишлар натижасида янги технологияларни жорий этиш орқали қуёш нури билан ишлайдиган лазерлар физикаси соҳасини янада ривожлантириш муҳим аҳамиятга эга.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4997-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида» ги Фармони ва 2010 йил 15 декабрдаги

ПҚ-1442-сон «2011–2015 йилларда Ўзбекистон Республикаси саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти ўзининг муносиб улушини қўшади.

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

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи¹. Куёш нуруни лазер нурига айлантиришни тадқиқ этиш ва ўзгартириш самарадорлигини бирламчи, иккиламчи концентрация қилувчи тизимларни, световодларни қўллаш, актив муҳитга куёш нуруни самарали ўзгартиришни таъминлайдиган сенсбилизаторларни ва куёш нури частотасини ўзгартириб берувчи бошқа механизмларни киритиш бўйича ишлар илғор давлатларнинг илмий марказларида, университет ва илмий-текшириш институтларида қизғин илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда: жумладан Institute for Laser Technology (Япония), National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics (Румыния) Tokyo Institute of Technology (Япония), Ben-Gurion University of the Negev (Исроил), Institute of Laser Engineering, Osaka University (Япония), Minia University (Миср), Физико-энергетический институт (Россия), Universidade Nova de Lisboa (Португалия), PROMES-CNRS (Франция), National Research Institute of Astronomy and Geophysics (Миср), Weizmann Institute of Science (Исроил), Technical University of Berlin (Германия).

Қаттиқ жисмли куёш нури билан ишлайдиган неодибли лазерлар яратиш бўйича дунё миқёсида бир қатор долзарб муаммолар ечилган ва қуйидаги муҳим илмий натижаларга эришилган: керамик актив элементларни ишлаб чиқариш технологиясини қўллаш орқали актив ва сенсбилизацияловчи ионлар концентрацияси турлича бўлган янги лазер материаллари олинган лаборатория шароитида куёш нури имитатори билан турли конфигурациядаги лазерларнинг характеристикалари тадқиқ этилган ва лампавий накачка билан катта самарадорликдаги лазер генерациясига эришилган (Япония, Institute for Laser Technology); Лиссабон (Португалия) университетиде световодларни, куёш нуруни лазер нурига айлантириш самарадорлигини оширувчи 2 ва 3 ўлчамли иккиламчи концентрацияловчи тизимларни қўллаш орқали бир қатор янги натижалар олинган; National

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

Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics (Румыния)да сенсбилизацияловчи ионлардан актив ионларга энергия узатиш самарадорлигини концентрацияга боғлиқ ҳолда тадқиқ этиш вақтида бир қатор янги назарий натижалар олинган.

Ҳозирги вақтда ютиш ва генерация бериш хусусияти юқори бўлган янги композит лазер материалларини қидириш, лазерлар самарадорлигини оширишга хизмат қилувчи конструкцияларнинг энг мақбул вариантларини аниқлаш, салбий термик эффектларни ва кучайтирилган спонтан нурланишни бартараф этишнинг қулай ечимларини қидириш каби йўналишларда илмий-тадқиқот ишлари долзарб бўлиб қолмоқда.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Қуёш нури билан дамланадиган (накачка) лазер ҳақидаги биринчи маълумот 1966 йилда эълон қилинган. Ўша вақтдан бошлаб қуёш билан оптик дамланадиган лазерларнинг бир қанча тизимлари амалга оширилди. Бу ишларнинг катта қисмида қаттиқ жисмли лазер материаллари ишлатилган. Уларнинг ичида қуёш билан дамланадиган лазерлар учун энг маъқули таркибида неодиим бўлган кристалл иттрий – алюминийли гранат (Nd:YAG) бўлган. Лекин ўзгартиришнинг максимал коэффиценти атиги бир неча фоизни ташкил этган ва шу сабабли бундан олдинги ишлар, асосан, лазернинг чиқишдаги қувватини оширишга қаратилган эди.

Ўзгартириш коэффицентини яхшилаш мақсадида Cr^{3+} ионини сенсбилизатор сифатида Nd:YAGга киритиш узоқ вақт давомида таъқиб қилинди, чунки бу қуёш нури спектрининг сезиларли қисмини қамраб олиш мақсадида кенг ютиш полосаларини таъминларди. Аммо бу турдаги катта ўлчамли ва юқори концентрацияли фаол муҳитларни ишлаб чиқариш кристалларни ўстиришнинг оддий усулларида самарали эмас эди. Кейинчалик нанотехнологияларнинг пайдо бўлиши ва ривожланиши Cr^{3+} ионларининг юқори концентрациясига эга бўлган, катта ўлчамдаги қаттиқ жисмли лазер материалларида юқори даражадаги шаффофлик ва бир жинслиликка эришиш имконини берди. 2008 йилда ҳақиқий шароитларда Френел линзаси ва Cr:Nd:YAG керамик лазер муҳитидан фойдаланган ҳолда қуёш лазери тизими намоёиш этилди. Бу T.Yabe бошчилигидаги япон олимлари томонидан амалга оширилган. Тажрибалар 2 метрли (4м^2) Френел линзаси ва ковак кўринишидаги иккиламчи қуёш концентраторларини уёғун бириктириш орқали бажарилди. Аммо дамлаш камерасига тушаётган қуёш нурининг қуввати -1860Втни ташкил қилганида, олинган лазер нурининг чиқишдаги максимал қуввати-80Втни, қуёш нурини лазерга айлантиришнинг дифференциал ФИК эса 4,3%ни ташкил этди.

2013 йилда Лиссабон университети профессори Dawei Liang томонидан 0,9м диаметрли Френел линзасидан қуёш коллектори сифатида фойдаланган ҳолда диаметрлари 4 мм, узунликлари 25 мм бўлган 1,0ат% Nd:YAG монокристалл ва 0,1ат% Cr: 1.0ат% Nd:YAG керамик стерженлар иккиламчи концентратор орқали конус шаклидаги бўшлиқ ичида муқобил оптик дамланди.

Муаллифлар маълум қилишганидек, тажрибада қуёш нуруни лазер нурига айлантириш самарадорлиги бўйича Cr:Nd:YAG керамикасида Nd:YAG актив муҳитга нисбатан бир оз лекин жиддий бўлмаган афзаллик кузатилган. Nd:YAG стержен ҳолида лазернинг максимал қуввати 12,3Вт., Cr:Nd:YAG керамик стержен ҳолида лазернинг максимал қуввати эса 13,5Втни ташкил этган.

Дунё олимларининг олиб бораётган кўп сонли тажрибаларига қарамай бугунги кунда қаттиқ жисмли лазер фаол муҳитларида ҳақиқий шароитларда қуёш билан дамлаш орқали қуёш нуруни лазерга айлантиришнинг максимал самарадорлиги 4%дан кам даражада қолмоқда ва шу сабабли қуёш лазерлари ҳамон ўз тадбиқини топганича йўқ. Шундай қилиб, қуёш нуруни лазер нурига юқори самарадорлик билан айлантириш муаммоси долзарб вазифа бўлиб қолмоқда.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим ёки илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Ион-плазма ва лазер технологиялари институти қошидаги махсус конструкторлик-технологик бюросининг қуйидаги лойиҳалари: № STCU-Uzb121 (2005-2008) “Концентрация қилинган қуёш энергиясини тўғридан тўғри лазер нури энергиясига айлантиришнинг энг мақбул технологиясини ишлаб чиқиш”, № ФА-А14 Ф0-89 “Катта қуёш печида қуёш билан оптик дамланадиган мульти-элементли лазерни ишлаб чиқиш” (2009-2011), № АЗ-ФА-Ф140 “Қуёш билан оптик дамланадиган лазернинг янги юқори самарадор конструкциясини ишлаб чиқиш” (2012-2014), № АЗ-ФА-Ф045 “Катта Қуёш Печида турли хилдаги актив элементларни синовдан ўтказиш учун мўлжалланган универсал лазер стендини ишлаб чиқиш” (2015-2017) тадқиқотлари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади қаттиқ жисмли лазер фаол муҳитларининг оптик, термик ва механик хусусиятларини ҳисобга олган ҳолда, қуёш лазерлари тизимида содир бўладиган физик жараёнлар асосида қуёш энергиясини лазер нури энергиясига айлантиришнинг самарали усулларини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

лазерлар фаол муҳитини нақча қилиш вақтида рўй берадиган бир неча марта такрорланадиган қайтиш, синиш, ютилиш, фотолюминесценция жараёнларини моделлаштириш методикасини ишлаб чиқиш;

қуёш нурунинг бирламчи, иккиламчи концентраторларидан ташкил топган турли конфигурациядаги лазер тизимларининг компьютер моделини ишлаб чиқиш;

қуёш ёрдамида оптик дамланадиган мавжуд лазерларнинг асосий камчиликлари ва афзалликларини адабиётларда келтирилган маълумотлар ва ишлаб чиқилган қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазер модели ёрдамида аниқлаш;

самарадор совутиш тизимини ишлаб чиқиш мақсадида фаол муҳит ва лазер тизими конструкциясининг бошқа элементларининг термик характеристикасини ўрганиш;

катта қуёш печининг концентрация қилинган қуёш нури ва шу билан бирга бошқа параболик концентраторлар учун ҳам фаол муҳит ва қуёш нурининг спектр характеристикаларини ҳисобга олган ҳолда ишлаб чиқилган компьютер модели ёрдамида рақамли тажрибалар ўтказиб нақча қилишнинг энг самарадор усулини аниқлаш;

катта қуёш печида (КҚП) узлуксиз режимда ишлайдиган тажриба қурилмаларини ва нақча жараёнини ўрганувчи усулларни яратиш;

турли хил актив муҳитлар, шу жумладан, композит лазер материаллари асосида самарадор лазерларни яратиш имкониятларини тадқиқ этиш;

қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерларнинг чиқиш параметрларини ва қуёш энергиясига айлантириш самарадорлигини баҳолаш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида қаттиқ жисмли таркибида неодиим бўлган актив элементлар, қуёш нурини концентрация қилиб берадиган тизимлар ва лазер резонаторлари танланган.

Тадқиқотнинг предметини бир неча марта такрорланадиган қайтиш, синиш, ютилишнинг физик жараёнларидан, люминесценция, энергиянинг сенсбилизатор ионларидан актив ионларга узатилишидан, кенг полосали қуёш нури спектри билан нақча қилинганда турли хил актив муҳитдаги лазер нури генерацияси жараёнлари ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Диссертация ишида, актив муҳитлар ва қуёш нурининг спектр хусусиятлари инобатга олинган ҳолда лазер тизимида содир бўладиган тасодикий процессларни рақамли моделлаштиришга асосланган усуллар тадқиқ этилган. Рақамли моделлаштириш Монте-Карло ва нурни тақиб қилиш усулига асосланган. Тажрибаларда стандарт усуллардан фойдаланган ҳолда замонавий ускуналар: оптик элементларнинг кўрсаткичларини аниқлаш учун қуввати 100 мВт бўлган диодли Nd:YAG лазери, юстировка учун гелий неон лазерларидан, Thorlabs фирмасининг S212 қувват ўлчагичи, визуализатори ва рақамли осциллографлар қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

бир неча бор такрорланадиган қайтиш, синиш, ютилиш, фотолюминесценция жараёнларини моделлаштиришнинг янги услуби ишлаб чиқилган;

биринчи марта Катта Қуёш Печида нурланиш қуввати 80 Вт бўлган лазернинг тажриба намунаси яратилган;

яратилган компьютер моделида концентрацияловчи тизимлар сифатларини киритган ҳолда, қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазер тизимларининг хусусиятларини ўрганиш бўйича рақамли тажрибалар ўтказиш имкони яратилган;

Катта Қуёш Печи ва кичик параболик концентраторларда Nd:YAG, Nd:Cr:YAG, Cr:GSGG лазерларини оптик дамлашнинг энг мақбул усули аниқланган;

илк бор Nd:YAG лазерлари самарадорлигини 30-32% даражага етказиш имконини берувчи қуёш нури спектри частотасини ташқи қайта ўзгартиргичга асосланган янги муқобил ёндашуви ишлаб чиқилган;

Cr:YAG, Ce:YAG Cr:GSGG, Cr:LiCAF, Ti:Сапфир материалларини қуёш нури спектри частотасида қайта ўзгартиргич сифатида ишлатиш мумкинлиги асосланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

Қуёш нури ёрдамида оптик дамланадиган лазерлардаги физик жараёнларни моделлаштириш методикаси ва қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазер тизимларининг модели ишлаб чиқилди. Улардан илмий-тадқиқотларда, қуёш билан, лампа ёрдамида ва диодли оптик дамланадиган янги лазерларни ишлаб чиқиш ва яратишда фойдаланиш мумкин. Таклиф этилган қуёш нури спектри частотасини ташқи қайта ўзгартиргичга асосланган ёндашув юқори самарадорликка эга бўлган қуёш нури билан дамланадиган лазерларни ҳамда янги қуёш лазерлари асосидаги технологияларни ишлаб чиқиш ва яратиш учун кенг имкониятлар очиб беради.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги оптика ва лазер физикасининг замонавий усул ва ёндашувларидан фойдаланилганлиги билан тасдиқланади. Хулосалар лазер муҳитидарўй берадиган бирламчи жараёнларнинг физикавий механизмларини ўрганишга бағишланган назарий ишларнинг базавий ҳолатига асосланган ва бошқа муаллифларнинг олган натижалари билан тўлиқ мос тушади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Мазкур диссертация тадқиқоти натижаларининг илмий аҳамияти таклиф этилган, қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерлар самарадорлигини сезиларли даражада ошириш имконини берувчи қуёш нури спектри частотасини ташқи ўзгартиргичидан фойдаланишга асосланган янги концепциядан ва назарий тадқиқотларни олиб бориш учун ишлаб чиқилган қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазер моделидан иборат.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундаки, таклиф этилган илмий-техник ечимдан қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланишга асосланган, янги самарадор технологияларни ишлаб чиқиш ва яратишда фойдаланиш мумкин.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Қуёш нури энергиясини лазер нури энергиясига айлантиришнинг турли механизмларини ҳамда GaAs кристали асосидаги актив затворлар ёрдамида ультра қисқа лазер импульсларини олиш имкониятларини тадқиқ қилиш асосида:

Катта Қуёш Печида нурланиш қуввати 80 Вт бўлган лазернинг тажриба намунаси яратилган (Ўзбекистан Республикаси Фанлар академиясининг 2017 йил 24 октябрдаги маълумотномаси). Яратилган лазер қуёш лазерларига нисбатан 5 барабар юқори самарадорликка эришиш ва қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланишга асосланган янги технологияларни ишлаб чиқиш имконини берган;

$\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$, $\text{Nd}^{3+}:\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$ актив элементлардан фойдаланиб концентрацияланган қуёш нури оқимини лазер нурига айлантириш бўйича олинган натижалар хорижий журналларда (*Opt. Mater. Express* 6, 552-557, 2016, IF : 2.591; *International journal of hydrogen energy* 39(26), (2014): pp.14227-14233, IF: 3.64; *International Journal of Photoenergy*, 2014, IF: 2.37) лазер материалларининг спектроскопик характеристикаларини назарий ҳисоб-китоб қилишда ва қуёш энергиясидан фойдаланиб водород олишнинг янги усулларини яратишда қўлланилган. Илмий натижалардан фойдаланиш керамик лазер материалларнинг спектроскопик характеристикаларининг назарий йўл билан аниқланган қийматларини ишончлилигини, қуёш энергиясидан фойдаланиб водород олиш самарадорлилигини асослаш каби муҳим натижаларга эришиш имконини берган;

GaAs кристалли ночизикли оптик хоссаларини ўрганиш бўйича ишлаб чиқилган модель ва таклиф этилган янги ёндашувлар хорижий журналларда (*Optics and Spectroscopy* 119, no. 2 (2015), IF: 0.644; *Optics and Spectroscopy*, vol. 115, issue 3 (2013), IF: 0.673; *Optics and Spectroscopy* 121(5):710-712, 2016, IF: 0.716) пассив синхронизация жараёнини тадқиқ қилишда қўлланилган. Илмий натижалардан фойдаланиш $\text{Nd}:\text{YAG}$ лазерларни самарали пассив синхронизация қилиш ҳамда A_3B_5 кристалларнинг оптик ютилиш коэффициентларининг ҳароратга боғлиқлигини батафсил тадқиқ қилиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация иши натижалари 10 та халқаро ва республика илмий-амалий конференцияларда маъруза кўринишида баён этилган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мазуси бўйича жами 28 та илмий иш чоп этилган. Шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларида 18 та илмий мақола, уларнинг 14 таси нуфузли халқаро ва 4 таси республика журналларида, 10 та маъруза халқаро ва республика конференцияларининг тўпламларида нашр этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация таркиби кириш, бешта боб, хулоса, 90 номдаги фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 88 та расм ва 3 та жадвалдан иборат. Диссертациянинг ҳажми 180 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

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

Диссертациянинг биринчи боби **“Муаммонинг ҳозирги кундаги аҳволи”** деб номланиб, ушбу бобда қуёш энергиясини лазер энергиясига айлантириш соҳасидаги тадқиқотлар бўйича адабиётларда келтирилган маълумотлар таҳлил қилинган. Қуёш нури энергиясининг лазер нурига айлантирилишидаги асосий муаммо самарадорликнинг ўта паст даражада экани аниқланди. Қуёш ёрдамида дамланадиган лазерлар самарадорлигини ошириш учун қуйидаги вазифаларни амалга ошириш зарур деб хулоса қилинди:

– Қуёш билан дамланадиган мавжуд лазерларнинг (Nd:YAG лазерлар, александритли лазерлар $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$, Ce:Nd:YAG лазерлар) самарадорлигини оширишнинг конструкторлик ечимларни қидиришни талаб этади, масалан лазер материалларининг композит структураларидан фойдаланиш, концентрацияловчи тизимлар самарадорлигини ошириш ва бошқалар.

– Сенсibiliзаторлар (Cr:Nd:YAG, Cr:Nd:GSGG, Cr:Nd:YSGG ва бошқа турдаги актив элементлар асосидаги лазерлар)дан фойдаланиб қайта айлантириш самарадорлигини оширишнинг янги йўллари қидириш ёки ташқи частота ўзгартиргичларини қўллаш (Nd:YAG, Ce:Nd:YAG лазерлари, масалан $\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$, $\text{Cr}^{3+}:\text{GSGG}$, $\text{Cr}^{3+}:\text{YSGG}$, $\text{Cr}^{3+}:\text{LICAF}$, $\text{Cr}^{3+}:\text{LISAF}$, $\text{Ti}^{3+}:\text{Сапфир}$ ва бошқа қуёш нури частотасини ўзгартирувчилари билан).

Диссертациянинг иккинчи боби **“Лазер моделнинг тавсифи ва иссиқлик эффектларни ҳисоблаш усуллари”** деб номланиб, ушбу бобда қуёш нури билан дамланадиган лазерларнинг ишлаб чиқилган статистик модели тавсифи берилган, актив элементнинг иссиқлик характеристикалари ва иссиқлик сабабли юзага келадиган линза эффектини ҳисоблаш учун ифодалар келтириб чиқарилган. Мазкур диссертация ишида асосан, мақбул ечимларни аниқлаш мақсадида турли конструкциядаги лазер моделларига, шу билан бирга қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазернинг макет ва тажриба намунасидан фойдаланилган ҳолда олинган назарий ва амалий тадқиқотларга асосланган усуллардан фойдаланилган.

Диссертацияда кўриб чиқилган қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазер схемасини моделлаштириш Монте-Карло усули ва нурни таъқиб қилиш (Ray-tracing method) усулидан фойдаланган ҳолда бажарилган. Бир неча марта такрорланадиган қайтиш, синиш ва ютилиш жараёнлари уч ўлчамли координаталарда моделлаштирилган. Бошқа адабиётларда фойдаланилган моделлардан фарқли ўлароқ мазкур моделга, частота қайта ўзгартиргичидаги ютилиш жараёнидан кейинги ихтиёрий йўналишдаги 4π фазовий бурчак доирасидаги нурланиш жараёни ҳам киритилган. Ютилиш ва нурланиш жараёнлари орасидаги кечикишнолга тенг деб олинган, чунки бу кўрсаткич лазер узлуксиз режимда ишлаган вақтида у қадар муҳим эмас. Моделда актив муҳит ва қуёш спектрининг ютилиш спектридан ташқари, частота қайта ўзгартиргичининг ютилиш ва нурланиш (тарқатиш) спектридан ҳам фойдаланилади.

Моделнинг асоси кесишиш нуқталарининг кетма-кетлигини, гемотрик оптика ва қайтиш, синиш, ютилиш ва фотон чиқариш каби бошланғич жараёнларни Монте-Карло усули ёрдамида аниқлашдан иборат. Моделлаштиришнинг охириги натижаси актив мухитда ютилган, инверс жойлашувни юзага келтиришда иштирок этадиган фотонлар улушидан, яъни нақча самарадорлиги η_p дан иборат. Ушбу катталиқдан кейинги босқичларда чиқишдаги лазер нури қувватининг тушаётган қуёш нури қувватига боғлиқлигини баҳолашда, тўрт сатхли лазер учун маълум бўлган ифодадан ҳисоб-китоблар ўтказишда фойдаланилади

$$P_{out} = (\gamma_2 / 2\gamma) \eta_p (P - P_{thr}) \quad (1)$$

бу ерда γ_2 чиқиш кўзгусининг ўтказиши ҳисобига юзага келадиган логарифмик йўқотишлар 2γ резонатордаги тўлиқ йўқотиш (total round-trip loss), P_{out} , P , P_{thr} -мос равишда лазернинг чиқишдаги қуввати, нақча қуввати ва порог қуввати. Қуйида ишлаб чиқилган лазернинг асосий қисмларига тариф берамиз.

Фотонни ҳаракатга келтириш. Шунинг таъкидлаш муҳимки, бизнинг моделданур аксарият нурни таъқиб қилиш усулида ишлатиладиган фотонлар пакетига қарама-қарши битта ягона фотондан ташкил топган. Бу кўп марталаб қайтиш ва синиш жараёнларини моделлаштиришда оғирлик коэффицентларидан фойдаланишни бартараф этиб модели соддалаштиради.

Моделнинг бошланғич босқичида қуёшдан келадиган дастлабки йўналиш ўрнатилганидек, фотоннинг пароболик концентратор сиртидаги бошланғич вазияти ўрнатилади. Модель жойлашувни аниқлаш учун фазодаги декарт координаталар системасининг ўрта тасодифий координаталари билан бирга, қуёш диски билан чегараланган фазовий бурчак бўйича тарқалиш йўналишини аниқлаш учун ўрта тасодифий йўналтирувчи косинуслардан ҳам фойдаланади.

Тўлқин узунлиги ва ютилиш коэффицентини танлаш. Тўлқин узунлиги қуёшнинг спектр интенсивлигидан қуйидаги интеграл тенгламани ечиш орқали аниқланади:

$$\xi = \int_0^{\lambda} I_{AMO}(\lambda) \frac{\lambda}{hc} d\lambda \quad (2)$$

Бу ерда $I_{AMO}(\lambda)$ берилган тўлқин узунлиги λ [нм] АМО қуёш нурининг нормалаштирилган спектрвий интенсивлиги [Вт/м²/ нм], ξ [0,1] оралиғидаги тасодифий сон.

Ютилиш узунлигини танлаш. Ютилиш узунлиги - l фотоннинг актив мухитда ёки частота ўзгартиргичида ютилишигача босиб ўтган йўли.

Ютилиш узунлигини танлашда тескари тақсимот усулидан ва Бугер-Ламберт қонунидан фойдаланилди

$$l = -\frac{\ln \xi}{\mu} \quad (4)$$

Бу ерда ξ тасодифий сон ва μ берилган тўлқин узунлигида ютилиш коэффиценти.

Қадам ўлчамини ва фотон кўчишини танлаш. Қадам ўлчами r – фотоннинг иккита кесишиш нуқталари орасидаги саёҳатининг масофаси. Тизим сиртининг бирор қисмида энг яқин кесишиш нуқтасини аниқлаш учун нур тенгламаси сирт юзаси тенгламасига қўйилиб r га нисбатан ечилади. Қадам ўлчами танлаб олиниши билан, фотон йўналтирувчи косинуслар билан аниқланадиган йўналишда r масофага тарқалади, фақатгина ютилиш рўй бермаслик шарт билан.

Ютилишни моделлаштириш. Ютилиш узунлиги ва қадам ўлчами берилган, биз ютилиш қаерда содир бўлишини билмоқчимиз. Ютилиш фотон ютувчи муҳитда ютилиш узунлигига тенг бўлган масофани ўтиб бўлганида рўй беради. Моделда қадам ўлчами ва ютилиш узунлиги ҳар сафар кўчишдан олдин, ютилиш қайси нуқтада содир бўлишини аниқлаш мақсадида, солиштирилади. Агар ютилиш узунлиги қадам ўлчамадан кичик бўлса, охиргиси ютилиш узунлиги билан алмаштирилади ва охирги кўчиш бажарилади. Шундан сўнг координаталар эслаб қолинади ёки белгилаб қўйилади (у ерга пикселни жойлаш билан) ва фотонни тақиб қилиш шу билан якунига етади. Агарда ютилиш узунлиги қадам ўлчамадан кичик бўлмаса, ютилиш узунлигининг катталиги қадам ўлчамага камайтирилади ва фотонни тақиб этиш давом этади. Тақиб қилиш жараёни фотон ютилгунига қадар ёки тизимни тарқатгунича давом этади.

Қайтиш ва синиш жараёнларини моделлаштириш. Биз алоҳида фотонни кўриб чиқаётганлигимиз сабабли, у ёки қайтиши ёки синиши мумкин. Шу сабабли, бу жараёнларни моделлаштириш учун биз қуйидаги ёндашувлардан фойдаланамиз:

Аслини олганда, қайтариш коэффиценти ҳам ёруғликнинг тушиш бурчагидан ҳамда унинг қутбланишига боғлиқ. Қуёш нури қутбланмаганлиги туфайли, биз қуёш нурининг иккита қутбланиш ҳолати (s ва p) учун қайтариш коэффицентининг ўртача қийматидан фойдаландик. Икки жараёндан қайси бири рўй бераётганлигини аниқлаш мақсадида, тасодифий ξ сони генерация қилинади ва юқорида қайд этилган қайтариш коэффиценти R_{ref} билан солиштирилади. Агар $\xi < R_{ref}$ бўлса қайтиш аксинча рефракция танланади ва янги йўналтирувчи косинуслар белгилаб олинади.

Фотон нурланишини моделлаштириш. Фотон чиқариш жараёни, тақиб қилинаётган фотон, тизимда кўп марталаб қайтиш васиниш жараёнларидан ўтганидан сўнг, частота ўзгартиргичга етиб бориб унда ютилганида содир бўлади. Бу ҳолда модел тезлик билан ютилган фотон ўрнига, юқорида тарифланган тўлқин узунлигини қуёш спектридан аниқлаш усулига ўхшаш усул билан, частота ўзгартиргичининг нурланиш спектрига мувофиқ, янги тасодифий қийматли тўлқин узунлигидаги янги фотонни чиқаради. Охирги координаталар ўзгаришсиз қолади. Бироқ йўналтирувчи косинуслар, 4π стерадиан фазовий бурчак оралиғида қабул қилинган ихтиёрий катталиклар билан янгиланади. Сўнгра фотонни тақиб қилиш,

фотон ютилгунича ёки тизимдан чиқиб кетгунича давом этади. Қаралаётган жараёнлар статистик табиатга эга бўлганлиги туфайли, қанча кўп фотон кўриб чиқилса, хатолик шунча кичик бўлади. Шундай қилиб моделнинг якуний натижаси актив муҳитда ютилган фотонларнинг нисбий улуши бўлиб, бу эса оптик дамлаш самарадорлигининг ўзидир.

Ишлаб чиққан моделимизнинг ишлаш лаёқатини ва олинган натижаларнинг ишончлилигини текшириш мақсадида, адабиётларда келтирилган мавжуд лазерлар моделлаштирилди. Таққослаш натижаларининг бир бирига аъло даражада мос тушишини кўрсатди, бу эса ишлаб чиқилган моделимизнинг лаёқатини ва олинган натижаларнинг ишончлилигини, ва ундан янги юқори самарадорликка эга бўлган қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерларни тадқиқ этиш, ишлаб чиқиш ва кўрсаткичларини мувофиқлаштиришда фойдаланиш мумкинлигини тасдиқлайди.

Ушбу диссертация иши доирасида, лазер нурининг чиқишдаги қувватини чегараловчи турли омилларни таҳлил қилиш ва қайд этишмақсадида, жумладан турли геометрияга эга бўлганактив муҳитларнинг иссиқлик кўрсаткичларини ҳисоблаш учун махсус ҳисоблаш усуллари ишлаб чиқилди. Қаттиқ жисмли лазерларнинг мавжуд камчиликларидан бири иссиқлик линза эффекти бўлиб, у лазер нури дастасининг кенгайишига ва бунинг натижасида қувват зичлигининг камайишига олиб келади. Шу сабабдан ушбу эффектни ўрганиш, бирлик юзага тушаётган максимал чиқиш қувватини баҳолаш учун жуда муҳимдир. Ушбу мақсадда лазер стержнидаги иссиқлик линза эффектини ҳисоблаш методикаси ишлаб чиқилди. Бунинг учун нур ҳаракат йўлини ва фокус масофасини ҳисоблаш мақсадида мос аналитик ифода келтириб чиқарилди.

«Катта қуёш печида ишлайдиган лазерни ишлаб чиқиш» деб номланган учинчи бобда катта қуёш печида (КҚП) лазер яратиш бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижаси келтирилган. Катта қуёш печида энг мақбул нақча қилиш схемасининг вариантини ва лазер конструкциясини танлаш мақсадида КҚПда лазер нурини самарали генерация қилиш имкониятлари ишлаб чиқилган моделдатурли актив элементлар учун (Nd:YAG, Nd:Q98, Nd:Cr:YAG) ҳисобларни амалга ошириш ва нақча қилиш схемасининг бир нечта усуллари кўллаш орқали, кенг кўламда таҳлил қилинди. Фойдаланилган конструкцияларнинг температуравий режимлари, Nd:YAG, Nd:Q98, Nd:Cr:YAG каби актив элементлардаги, ҳамда актив элементларнинг композит вариантларидаги иссиқлик линза эффекти тадқиқ этилди.

Стержен шаклидаги Nd:Cr:YAG керамик актив элементларни оптик дамлашнинг энг кўп самара берадиган схемасига эришиш имкониятларини ўрганиш бўйича ўтказилган рақамли тажрибалар шуни кўрсатдики, КҚП шароитида иссиқлик линзасининг фокус узунлиги иссиқлик юкламасива актив элементнинг ўлчамлари билан аниқланади. Nd:Cr:YAG керамик актив элементлар КҚП шароитида мўътадил ишлаши учун қуёш радиацияси интенсивлигини марказий текисликка шундай қайта тақсимлаш керакки, доғ

ўлчамини ошириш орқали, актив элементнинг 200мм узунлигига тушадиган иссиқлик юкламаси 3кВтдан кам бўлиши керак. У ҳолда КҚП қуёш оқимитўлиқ энергиясидан самарали фойдаланиш учун актив элементлар узунлиги ва сонини ошириш зарур бўлади. Композит актив элементлардан тузилган лазерлар конструкциясини ўрганиш энг юқори ютилиш самарадорлигига Nd:Cr:YAG композит актив элементида фойдаланилганда эришиш мумкинлигини кўрсатди.

Олиб борилган тадқиқотлар натижасига асосланиб 1-расмда кўрсатилаган лазер стенди ишлаб чиқилди ва яратилди. Яратилган қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазер стенди лаборатория шароитидаги дастлабки синовлардан сўнг, КҚП қуёш оқимининг юқори зичликлари шароитида ишлаши мумкинлигини текшириш мақсадида КҚП фокал текислигига ўрнатилди.



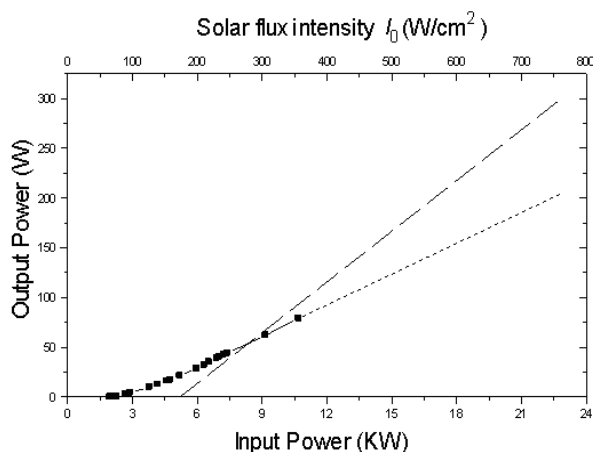
**1-расм. КҚП фокусига
жойлаштирилган лазер модулининг
йиғилган кўриниши.**

Тажрибалар ҳар хил узунлик ва диаметрдаги актив элементлардан фойдаланган ҳолда амалга оширилди. Накачка учун қуёш нури оқимининг марказий қисмидан фойдаланилди, чунки биринчи яқинлашишда бу қисмда интенсивлик бир текис тақсимланган деб қабул қилиш мумкин. Тажрибаларда мульти-элементли тўғри бурчакли иккиламчи концентратордан (ИК) фойдаланилди. ИК ички юзасининг қайтариш коэффиценти ~80% ташкил этади.

Ишлаб чиқилган лазер тизимининг ишлаш қобилиятини ва унда генерация олиш мумкинлигини синаш мақсадида битта актив элемент билан тажрибалар ўтказилди. Тажрибалар қуёш нури оқимининг айтарли катта бўлмаган зичликларида бажарилди. Тажрибаларда қуёш нури оқимининг интенсивлиги калориметрия усулида аниқланди. Лазер нурининг чиқишдаги қуввати, 10Вт максимал қувватларни ўлчашга мўлжалланган РМ212 қувват ўлчагичи ёрдамида амалга оширилди. Катта қувватларда, лазер нури қувватини сусайтириш учун қайтариш коэффиценти 80 ва 90% бўлган лазерни чиқарувчи кўзгулардан фойдаланилди. 2-расмда лазер нури чиқишидаги қувватнинг қуёш нури оқимининг интенсивлиги I_0 ва 5 элементли иккиламчи концентратор кириш апертурасига тушаётган қуёш оқим қувватининг 1/5 қисмига боғлиқлиги келтирилган. Мазкур актив элемент учун қуёш нури энергиясини лазер нурига айлантатиш коэффиценти ~1% ташкил этди.

Расмда кўриниб турганидек, чиқиш кўзгусининг қайтариш коэффиценти 90% бўлган ишчи ўлчамлари $\varnothing 6 \times 130$ мм бўлган битта

кристаллдан олиш мумкин бўлган максимал қувват 200Вт ни ташкил этади. Олинган ушбу натижалар асосида ишчи ўлчамлари $\varnothing 10 \times 130$ мм бўлган стержннинг чиқишдаги кўрсаткичлари баҳоланди (2-расм). Шундай қилиб, кўриб ўтилган иккиламчи концентратор конструкцияси учун ишчи ўлчамлари $\varnothing 10 \times 130$ мм бўлган 5та Nd:YAG актив элементидан олиш мумкин бўлган максимал қувват ~ 1.5 кВтни ташкил этиши мумкин. Иккиламчи концентратор ўлчамларини ошириш ва фокус доғининг ўлчамлар билан таққослаб бўладиган узунликдаги керамикавий лазер материалларидан фойдаланиш, чиқишдаги қувватни ва қуёш нуруни лазер нурига айлантириш самарадорлигини сезиларли даражада ошириш имконини беради.



2-расм. Лазер нури чиқиш қувватининг кириш қувватига ва қуёш нури оқимининг интенсивлиги I_0 га боғлиқлиги, чиқиш кўзгусининг қайтариш коэффициенти 90% бўлган Nd:YAG актив элемент учун. Квадратлар – ўлчами $\varnothing 6 \times 150$ мм ва ишчи узунлиги 130мм бўлган стержн учун тажрибада олинган натижалар. Штрихли чизик – ишчи ўлчамлари $\varnothing 10 \times 130$ мм бўлган стержн учун олинган ҳисоблаш натижалари.

Nd:YAG актив elementi учун олинган натижаларни инобатга олиб, биз Nd:Cr:YAG керамикавий актив элементларнинг чиқишдаги кўрсаткичларини баҳолаш ишларини ўтказдик. Ҳисоблаш ишлари ва тадқиқот натижалари таҳлили шуни кўрсатдики, КҚП фокус доғи диаметрининг ўлчамлари билан таққослаб бўладиган ўлчамдаги мульти-элементли иккиламчи концентраторлардан мос ўлчамлардаги Nd:Cr:YAG керамик стержнлардан фойдаланиш 20кВт гача бўлган якуний қувватни бериши мумкин.

КҚП концентрацияланган қуёш оқимида оптик дамланадиган керамик Nd:Cr:YAG диск лазерини яратиш имконияти тадқиқ этилди. Юқори-фаоллаштирилган, керамик Nd:Cr:YAG диск лазерининг янги конструкцияси таклиф этилди ва $\sim 25\%$ ўзгартириш самарадорлигига эришиш мумкинлиги кўрсатилди.

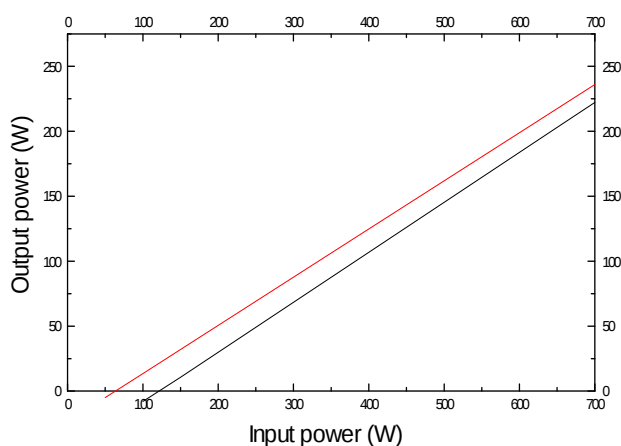
Тўртинчи боб “Қуёш ёрдамида оптик дамланадиган юқори самарадор лазерларни яратиш имкониятларини тадқиқ этиш” деб номланади. Ушбу бобда лазер конструкцияларининг самарадор вариантларини ишлаб чиқиш ва яратиш мақсадида, оптик дамлашнинг турли схемалари, жумладан КҚПнинг алоҳида гелиостатларида ва кичик парабола кўринишидаги концентраторларда лазерлар яратиш вақтида қўл келадиган бўйлама оптик дамлаш усули тадқиқ этилди.

Юқорида қайд қилингандек, икки карра активланган лазер материаллардан, хусусан Cr:Nd:YAG, Cr:Nd:GSGGлардан фойдаланиб лазерлар самарадорлигини ошириш бўйича олимларнинг катта сай

ҳаракатлари ҳозирча мувоффақиятли натижа берганича йўқ. Шу вақтга қадар ўтказилган қатор тажрибаларда самарадорликнинг сезиларли бўлмаган даражадаги яхшиланиши кузатилди ва уларда таъкидланишича, иссиқлик юкламаси, кенг полосали қуёш нури билан нақчка қилиш вақтида Cr:Nd:YAG лазерининг кўрсаткичларига таъсир этувчи асосий омил сифатида белгиланган. Аммо, бу тажриба натижалари Cr:Nd:YAG актив элементида ютилган қувватнинг 3-4-марта ошиб кетиши ҳисобига юзага келадиган қўшимча иссиқлик юкламаси Nd:YAG дагига нисбатан алоҳида муаммони юзага келтириши ва шу билан бирга стержн шаклидаги актив элементдан фойдаланилган конфигурация бу тажрибаларда самарали совутишни таъминлай олмагани шароитларида ўтказилган. Маълумки лазернинг актив элементига тушадиган ортиқча иссиқлик юкламаси, лазер йўли люминесценциясининг сўниши, термик йўналтирилган линза эффектининг вужудга келиши ва ҳатто лазер генерациясининг тўлиқ йўқолиши ёки актив элементнинг бузилиши каби жиддий муаммоларга олиб келиши мумкин. Бундан ташқари ютилиш самарадорлигининг ошиши, нақчканинг кўндаланг схемасида энергиянинг асосий қисми актив элементнинг сиртига яқин жойларида ютилишига, бу эса ўз навбатида паразит генерациянинг кучайишига олиб келади. Бу ҳол стержен кўринишидаги актив элементлардан фойдаланишда махсус чоралар кўришни, масалан ён сиртларни нақшлаш ёки композит актив элементлардан фойдаланишни талаб этади. Шундай экан, юқорида кўрсатилган тажриба натижалари Cr:Nd:YAG актив элементлари қуёш билан нақчка қилиш вақтида юқори самара бериш имкониятига қарши далил бўла олмайди. Шу сабабли, Cr:Nd:YAG ва Cr:Nd:GSGG ҳам кичик иссиқлик ўтказувчанлиги ва иссиқлик эффектлари эҳтимоллигининг юқорилиги туфайли эга бўлган бири-бирига ўхшаш муаммони ечиш мақсадида биз диск конфигурациясидан фойдаланишни таклиф этдик. Шу йўл орқали қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерларда иссиқлик юкламаларини осонлик билан олишни таъминлаш ва юқори самарадорликка эришиш мумкин. Шундай қилиб Nd:Cr:YAG керамик актив элементларидан ва диск шаклидаги Cr:Nd:GSGGлардан фойдаланиб кичик парабола шаклидаги қуёш концентраторларида самарадор лазерлар яратиш имконияти рақамли тажрибалар усули билан тадқиқ этилди. Диск лазерининг икки хил варианты кўриб чиқилди: бир ўтишли ва икки ўтишли оптик дамлаш схемаси. Бир ўтишли схемада лазер нурининг чиқишдаги қувватининг қуёш нури қувватига боғлиқлиги баҳолаш учун тўрт сатҳли лазерлар учун қўлланиладиган маълум ифодадан, икки ўтишли ҳолда эса мос ифодалар икки ўтишли конфигурациянинг ўзига хос хусусиятларини ва актив кўзгуни инобатга олган ҳолда келтириб чиқарилди.

Лазер нурининг чиқишдаги тўлиқ қуввати иккала ҳолда ҳам 35%ли конверсия самарадорлигига эришиш мумкинлигини кўрсатди (3-расм). Бунда актив элементнинг ҳарорати 100°C дан ошмаслиги кўрсатилди, ва шу сабабли иссиқлик эффектларининг таъсири муҳим аҳамият касб этмайди. Икки

Ўтишли схема қуёш оқимининг кичик зичликларида самаралироқ, бу айниқса яққол 3-расмда кўриниб турипти. Икки ўтишли схемадан каскадли қуёш лазерларини яратишда ҳам фойдаланиш мумкин. Айни вақтда, қуёш нури оқимининг етарлича катта зичликларида лазер схемаси бир ўтишли тузилишининг соддалиги муҳим афзаллик бўлиб ҳисобланади. Диск кўринишидаги Nd:Cr:GSGG актив элементлардан фойдаланиш шуни кўрсатдики, кўриб ўтилган лазер схемаларида айлангириш самарадорлиги 30% гача етиши мумкин.



3-расм. Диаметри 1м бўлган парабола кўринишидаги концентраторда чиқишдаги қувватнинг лазерни оптик дамлаш қувватига боғлиқлиги, фокусдан ташқарида, Nd:Cr:YAG диск актив элемент диаметри 2см ва қалинлиги 2мм бўлган ҳол учун. 1-бир ўтишли схема учун, 2-икки ўтишли схема учун.

Белгилаб оламизки, Nd:Cr:YAG учун олинган натижалар, хона ҳароратида Nd:Cr:YAGдаги сенсабилизатор ионлари ўз энергияларини самарали усулда актив ионларга ўзатади ва бирдан-бир муаммо бу қўшимча иссиқлик юкламаси деган фараз асосида олинган. Бу натижалар 2011 йилда нашр этилган эди. Бироқ охириги 6 йил ичида Nd:Cr:YAG қуёш ёрдамида оптик дамланадиган диск лазерлари бўйича тажрибалар ҳақида маълумотлар эълон қилинмади. Бошқа тарафдан биз томонимиздан ўтказилган адабиётлар таҳлили шуни кўрсатдики, Nd:Cr:GSGGдан фарқли ўлароқ Nd:Cr:YAGда Cr ионларининг люминисценция спектри YAG кристаллидаги Nd ионларининг ютилиш спектри билан кесишиши унча яхши эмас ва шу ҳолда ҳам бир қатор илмий ишлар муаллифларининг таъкидлашларича юқори самарадорликдаги сенсабилизация кузатилган, буни эса энергияни Cr ионларидан Nd ионларига узатишни энергия узатишнинг маълум механизмлари доирасида, YAG матрицасида Cr иони люминисценция спектри формасининг ҳароратга боғлиқлигини инобатга олмай туриб тушунтириб бўлмайди. Маълумки, ҳарорат ошиши билан YAG матрицасидаги Cr ионининг люминисценция спектрикатта тўлқин узунликлари томонга силжийди, у соҳада Nd ионлари кенг ютилиш полосасига эга. Бу сенсабилизация самарадорлигининг ошишига олиб келади. Лекин бу ҳолда пастки ишчи сатҳларнинг термик бандлашуви натижасида лазернинг кўрсаткичлари ёмонлашади. Бу ҳолда лазернинг самарали ишлашини таъминлаш мақсадида, актив элементнинг ҳароратини шу даражада ушлаб туриш керакки, пастки ишчи сатҳларнинг термик бандлашуви лазер генерацияси кесимида кучли таъсир этмасин ва бир вақтнинг ўзида самарали сенсабилизация амалга ошсин, агарда бу ҳолат ҳақиқатдан мавжуд бўлса у ҳолда қуёш билан накачка қилиадиоптик

дамланадиган лазер самарадорлиги 35% эмас, балки камроқ бўлади. Бошқача айганда Nd:Cr:YAG муаммоларини ҳал қилиш учун тадқиқотлар олиб боришни давом эттириш зарур. Шу сабабдан, Nd:Cr:YAG учун таклиф этилган ечим тасдиқланиши ёки тасдиқланмаслигидан қатъий назар, биз қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерлар самарадорлигини оширишнинг муқобил йўллари қидирдик ва бошқа оддийроқ ечимини топдик. Шундай қилиб, агарда Nd:Cr:YAG самарасиз бўлиб чиқса, у ҳолда энг яхши ечим сенсабилизаторни актив ионларда ажратиш бўлиши керак. Яъни Cr³⁺YAGдан лазер актив муҳити Nd:YAGдан алоҳида ҳолда фойдаланиш лозим. Агар хона ҳароратида нурланиш спектри Nd:YAGнинг ютиш поласалари билан яхши кесишмайдиган Cr³⁺YAGдан эмас, балки бошқа GSGG, YSGG, LICAF, LISAF каби кристалл матрицалардаги Cr³⁺дан, ёки Ti³⁺:Сапфирдан ташқи частота ўзгартиргичи сифатида фойдаланилса (frequency converter, аниқроғи, frequency down-shifter) бундан ҳам яхшироқ бўларди. Қуйида бу тадқиқотларнинг натижалари келтирилади.

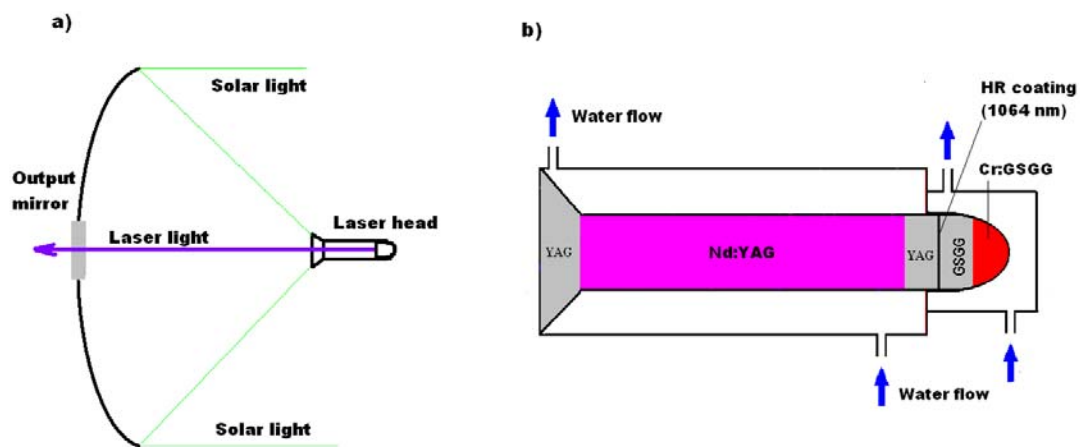
Қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерлар самарадорлигини, ташқи частота ўзгартиргичларидан фойдаланиш орқали ошириш имкониятларини тадқиқ этиш. Тадқиқотлар биз ишлаб чиққан моделдан фойдаланган ҳолда амалга оширилди. Моделлаш ишлари диаметри 1м ва фокус масофаси 0.5м бўлган парабола кўринишидаги қуёш концентраторлари учун бажарилди. Фокал текисликдаги композит актив муҳитнинг бўйламасига оптик дамлаш схемаси кўриб чиқилди. Чиқиш кўзгуси парабола кўринишидаги концентраторнинг марказига, композит актив муҳитнинг конус кўринишидаги олд кесим юзаси рўпарасига ўрнатилди, 100% кўзгу вазифасини актив муҳити стержнининг қарама-қарши учигаги кўп қатламли қайтарувчи диэлектрик қатлам бажаради.

Кўриб ўтилган композит актив муҳитли схема 4-расмда келтирилган. У икки қисмдан ташкил топган:

Асосий қисм, сув билан совутиладиган, ички сиртига кумуш қоплама суртилган метал трубка билан ўралган, диффузия усули билан монокристалларни ёки керамик материалларни бириктириш орқали тайёрланган YAG/Nd:YAG композит актив муҳитидан иборат;

Ўрнатиладиган қисм, алоҳида сув билан совутиш тизимига эга бўлган қуёш спектрининг парабола кўринишдаги частота ўзгартиргичи.

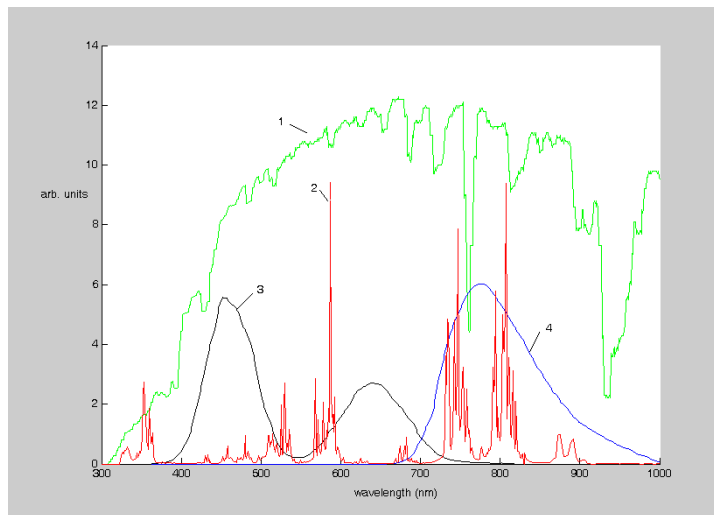
Актив муҳитнинг ён томонлари тўлиқ ички қайтишни таъминлаш учун сайқаланган ва ўнг кўндаланг кесими 1064нм тўлқин узунлигидаги генерацияни юқори даражада қайтарувчи ва 900нмдан кичик бўлган тўлқин узунлигини ўтказувчи қопламага эга. Ўрнатиладиган қисмдаги частота ўзгартиргичининг парабола шакли оқимни у частотаси ўзгартирилган (частота бўйича пасайтирилган) фотонларнинг тўлиқ ички қайтиш бурчаги билан чегараланган бурчак апертураси билан шакллантириш талабидан келиб чиққан ва бу узатишдаги йўқотишларни камайтириш учун хизмат қилади. Парабола шаклидаги частота ўзгартиргичининг ташқи сирти кумуш қоплама билан қопланган.



4-расм. Частота ўзгартиргичли лазер схемаси

Сифат жиҳатдан таҳлил ва таққослаш учун 5-расмда спектрлар келтирилган. Расмдан кўриниб турганидек, Cr:GSGGнинг нурланиш спектри ва Nd:YAG ютиш полосасида ўзаро мосликни ва бошқа тарафдан Cr:GSGG ва Nd:YAGларнинг ютиш спектрларидаги нисбатан кучсиз кесишишни кузатиш мумкин.

Шуни қайд этиш керакки, актив ва сенсабилизацияловчи ионларнинг ютилиш спектрлари орасидаги кесишиш икки марта активлаштирилган лазер материалларининг камчиликларидан биридир. Бу камчилик сенсабилизацияловчи ионлар спектрнинг, сенсабилизацияловчи ионлар бўлмаганида актив ионлар ютиши мумкин бўлган бир қисмини ютишисабабли келиб чиқади.



5-расм. 1-куёш нурининг стандарт спектри, 2- Nd:YAG ютиш спектри, 3, 4- мос равишда Cr:GSGGнинг ютиш ва нурланиш спектри.

Аммо бу ерда таклиф этилаётган схема бундай камчиликдан холи, чунки частота ўзгартиргич Nd:YAG актив муҳитда ютилмаган, куёш спектрининг бир қисминигина ўзгартиради. Ҳисоблаш ишлари диаметри 1м бўлган парабола кўринишидаги концентратор ва стандарт кўрсаткичларга эга бўлган ўлчамлари $\phi 10 \times 50$ мм бўлган Nd:YAG ва Cr:GSGGдаги хром концентрацияси 2% бўлган вазият учун бажарилди. Се:Nd:YAGдаги церий концентрацияси 0.05%. Cr:GSGGнинг қалинлиги 10мм. Парабола кўринишидаги частота ўзгартиргичининг ташқи сиртидаги кумуш қопламанинг қайтариш коэффиценти тахминан 97% тенг деб олинди. Лазер актив муҳити ва частота ўзгартиргичи орасидаги чегаравий сиртдаги йўқотишларни синдириш кўрсаткичларини бир-бирига мослаштириш учун ишлатиладиган оптик геллардан фойдаланиш орқали, умуман олганда 5%га тушириш (битта йўналишда) мумкин.

Моделлаштириш чиқариб олиш самарадорлиги бирга тенг бўлган ҳолдагина эришиш мумкин бўлган максимал дифференциал фикрга тенг бош кўрсаткич –оптик дамлашнинг тўлиқ самарадорлигини аниқлаш учун бажарилди. Шундай қилиб, бу тажрибаларда Nd:Ce:YAG + Cr:GSGG комбинацияси учун олинган максимал натижа 0.32га тенг бўлди. Бу Nd:YAGнинг оптик дамлаш самарадорлиги 0.14дан икки баробардан ортиқроқ эканлигини кўрсатади.

Олинган тўлиқ натижалар I жадвалда келтирилган. Ушбу тадқиқотда олинган яна бир муҳим натижа, Cr:Nd:YAGнинг хусусиятларига тааллуқли. Маълумки, икки марта активлаштирилган Cr:Nd:YAG типдаги лазер муҳитларида, энергия (уйғотишни) узатиш икки усул билан амалга оширилади: нурланишли ва нурланишсиз энергия узатиш.

Cr:YAG ташқи частота ўзгартиргич сифатида Nd:YAG актив муҳитидан алоҳида ишлатилган ҳолларда, фақат нурланиш орқалигина энергия узатиш мумкин. Шундай қилиб, охириги ҳолдаги Nd:YAG + Cr:YAG комбинация учун (жадвалга қаранг) самарадорлик 21%ни ташкил этади. Бу шуни аниқлатадики Cr ионларининг Nd ионларига нур чиқариш орқали энергия узатиш улуши нормал шароитларда 7%га тенг, яъни Nd:YAGнинг оптик дамлаш самарадорлиги 1,5 баробар ортади. Бу натижа икки мартга активлаштирилган Cr:Nd:YAG актив муҳитлардан фойдаланганда нурланишсиз энергия узатиш устунлик қилишига гувоҳлик беради, аммо буни ҳали табиий шароитларда қуёш ёрдамида оптик дамлаш тажрибаларида исботлаш талаб қилинади.

1-жадвал

Турли комбинациялар учун оптик дамлаш самарадорлиги.

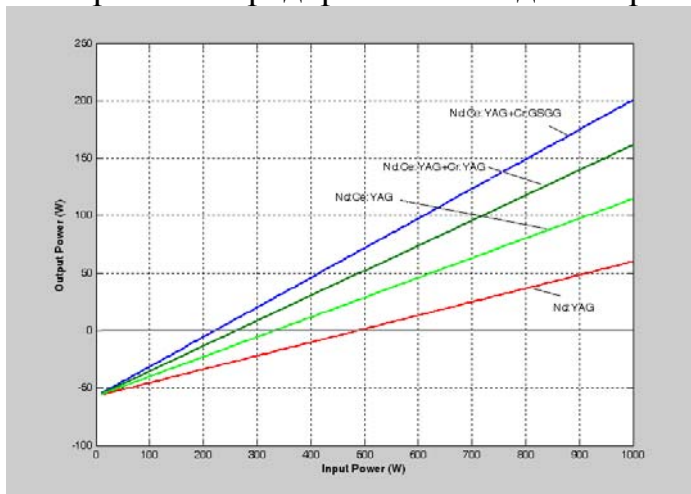
Актив муҳит	Частота ўзгартиргич	Оптик дамлаш самарадорлиги
Nd:YAG	-	0,14
Ce:Nd:YAG	-	0,22
Nd:YAG	Cr:YAG	0,21
Nd:YAG	Cr:GSGG	0,26
Ce:Nd:YAG	Cr:YAG	0,27
Ce:Nd:YAG	Cr:GSGG	0,32

Олинган ушбу натижаларга асосланиб, (1) аналитик ифодадан фойдаланиб, лазернинг чиқишдаги қувватининг тушаётган қуёш нури қувватига боғлиқлиги, чиқиш кўзгусининг қайтариш коэффициенти 95% бўлган ҳол учун ҳисобланди. Олинган айрим натижалар 6-расмда келтирилган.

Таъкидлаш ўринлики, 6-расмда келтирилган 1000Вт қуёш қувватини Ер сиртида диаметри 1м бўлган концентраторнинг фокал текислигида йиғиб бўлмайди, аммао уни космосда йиғиш мумкин. Ер атмосферасидан ташқаридаги қуёш радиацияси $\sim 1350\text{Вт/м}^2$ га тенг. Моделлаштириш ёрдамида бажарилган миқдорий таҳлиллар натижаси ташқи Cr:GSGG частота

ўзгартиргичи бор бўлган Nd:YAG лазерларида ер сиртидаги одатдаги қуёш радиацияси 800Вт/м^2 бўлган ҳолда (6-расмда 600Втатрофи), қуёш энергиясини лазер нури энергиясига айлантириш самарадолигини беш мартадан ортиқ ошириш имконияти мавжудлигини кўрсатди.

Балки кўриб ўтилган ушбу схема энг мақбул эмасдир, лекин у қуёш нури энергиясини лазер нури энергиясига ўзгартириш самарадорлигини ҳозирги кунга қадар эришилган максимал самарадорликлардан сезиларли даражада ошириш мумкинлигини кўрсатмоқда. Шу усул билан, қуёш нури спектрининг инфрақизил қисмини кўринадиган спектрга айлантириб берадиган (up-converters) частота ўзгартиргичларидан фойдаланган ҳолда ҳам конверсия самарадорлигини янада ошириш имконияти мавжуд.



6-расм. Диаметри 1м бўлган парабола кўринишидаги концентратор учун лазернинг чиқишдаги қувватининг кириш (қуёш нури) қувватига боғлиқлиги.

Шундай қилиб, қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерлар учун қуёш энергиясини лазер нури энергиясига самарали айлантириб беришни таъминлайдиган, қуёш лазерлари самарадорлигини катта миқдордаги ютилмаган қуёш фотонлари частотасини ташқарида ўзгартиришга асосланган, янги оддий ёндашув таклиф этилмоқда. Энергияни чиқариб олиш самарадорлиги бирга тенг бўлган ҳоллардагина эришиб бўладиган максимал дифференциал фикни англатувчи 32%ли оптик дамлаш самарадорлиги олинди. Таклиф этилган ёндашувнинг асосий устунлиги қуйидагилардан иборат: актив элеменлардаги нисбатан кичик иссиқлик юкламалари, турли хил материаллардан ҳам актив муҳит, ҳам частота ўзгартиргич сифатида фойдаланиш мумкинлиги, частота ўзгартиргичининг иссиқлик кўрсаткичларига (нурнинг икки марталаб синишидан юзага келувчи иссиқлик, линза эффекти) бўлган талабнинг ўта қаттиқ эмаслиги, зарурият бўлганида актив муҳит ва частота ўзгартиргичларидаги ҳароратни бирига боғлиқ бўлмаган ҳолда бошқариш имконияти.

Бешинчи боб **“Қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазер резонаторлари асиллигини модуляция қилиш”** деб номланиб, ушбу бобда қуёш ёрдамида оптик дамлаш орқали нано ва пиросекундли импульсларни генерация қилиш имкониятларини тадқиқ этиш натижалари ёритилган.

Бир қатор иловалар учун юқори даражада барқарор, наносекунд импульсли, пикосекунд (ёки субпикосекунд)ли чиқишдаги қуввати юқори бўлган, импульслар цуги генерациясини давомийлиги ва амплитудаси бўйича бошқариш имконияти мавжуд бўлган, лазерларга эга бўлиш мақсадга мувофиқдир. Наносекунд импульсларни генерация қилиш учун $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ асосидаги пассив затворлардан, пикосекунд импульслар учун GaAs кристалли асосидаги пассив затворлардан фойдаланиш мумкин. Диссертациянинг ушбу бобида санаб ўтилган ушбу затворлардан фойдаланиб нано ва пикосекундли импульсларни генерация қилиш имкониятлари тадқиқ этилган.

Наносекундли импульслар генерацияси. Наносекундли импульсларни генерация қилиш учун Nd:YAG лазерларида чиқиш ёки 100%ли $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ пассив затворли (тўйинувчи ютгичли) кўзгулардан фойдаланиш мумкин. Nd:Cr:GSGG ёки Nd:Cr:YAG ҳоли учун ушбу материаллар таркибида ҳар доим аниқ миқдордаги Cr^{4+} иони аралашмалари мавжуд. Ушбу ионлар улар концентрациясигаи боғлиқ ҳолда лазерлар асиллигининг модуляциясига олиб келиши мумкин. Ушбу бўлимда Nd:Cr:GSGG ва Nd:Cr:YAG кабилазер материалларидаги Cr^{4+} ионлари аралашмасининг қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерлар кўрсаткичларига таъсирини тадқиқ этимиз. Бунинг учун қуёш ёрдамида оптик дамланадиган тўйинувчи ютгичли лазернинг компьютер модели ишлаб чиқилди, ушбу моделда Cr^{4+} ионлари аралашмасидаги ютилишларни инобатга олувчи ҳаракат тенгламаларидан фойдаланилган. Ҳисоблаш ишлари юқорида санаб ўтилган актив элементлар учун, қуёш нури концентратори фокусининг майдони 1 м^2 ва мос равишда қуёш нурининг концентрация қилинган оқимининг қуввати (оптик дамлаш қуввати) 1 кВт.га тенг, деб амалга оширилди. Резонатор узунлиги 1м, чиқиш кўзгусининг қайтариш коэффиценти $R_2=0,95$. Оптик дамлаш қуввати 0-1000Вт оралиғида, Cr^{4+} ионининг концентрацияси $0-1,0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ оралиғида ўзгартирилди. Моделлаштириш ёрдамида оптик дамлашнинг турли даражаларида, Cr^{4+} ионлари коцентрациясининг лазер нурининг чиқишдаги кўрсаткичларига таъсиритадқиқ этилди. Генерация қилинаётган импульслар шакли ва давомийлиги, такрорланиш частотаси, ҳамда амплитудасининг аралашма ионлар концентрациясига боғлиқлиги, концентрация қилинган қуёш нури оқимининг турли даражалари билан оптик дамлаш ҳоллари учун ўрганилди. Бунда оптик дамлаш қувватининг ошиши билан, импульснинг максимал интенсивлиги I_{max} ва импульсларнинг такрорланиш частотаси ошган бир вақтда, импульслар давомийлигининг монотон камайиши кузатилди.

Кўриб ўтилган актив элементларда $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ концентрацияда Cr^{4+} ионларининг мавжуд бўлиши қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерлар асиллигининг модуляциясига олиб келади ва концентрация ва оптик дамлаш қувватига боғлиқ ҳолда наносекунд оралиғида турли импульслар кетма-кетлигини генерация қилиш имконини беради.

Пикосекунд импульслар генерацияси. Ушбу бўлим GaAs кристаллининг ночизикли хусусиятларини ўрганишга ва улардан қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерларда пикосекундли импульсларни генерация қилишда фойдаланишга бағишланган. GaAs кристаллининг ночизикли-оптик хусусиятлари тадқиқ этиш бўйича z-scan усули билан амалий тадқиқотлар ўтказилди. GaAs кристаллини узок вақт лазер импульслари билан нурлантириш натижасида дефектлар ҳосил бўлади ва кристаллнинг тўйинишли ютиш хусусияти ортиб боради. GaAs кристаллини узок вақт ($>10^4$ лазер нури билан уриш) лазер импульслари ($\tau = 35$ пс, $\lambda = 1.064$ мкм) билан бузилиш чегарасига яқин жойда нурлантириш дефектлар концентрациясининг (>10 марта) ортишига олиб келиши кузатилди. Шунинг қайд этишимиз керакки, ушбу усул билан олинган тўйинувчи ютгичлардан қаттиқ жисмли ва бошқа лазерларда моддаларни синхронизация қилиш учун фойдаланиш мумкин.

GaAs кристаллдан бир вақтнинг ўзида ночизикли манфий тескари алоқа (НТА) элементи, ҳамда тўйинувчи ютгич сифатида фойдаланиш имконияти тадқиқ этилди. Бундай мужассамлашувнинг афзаллиги шубҳасиз: бунда импульсли лазер конструкцияси сезиларли даражада соддалашади, ва актив элемент, ярим ўтказгич кристалидан ва резонатордан иборат бўлади. Масалани ҳал қилиш мақсадида ишлаб чиқилган лазер қурилмасининг компьютер моделида рақамли тажрибалар ўтказилди. Узлуксиз нур оқимидан алоҳида импульсларнинг шаклланиш жараёни, резонаторнинг алоҳида элементларидан ўтиш вақтида шаклланган якка ҳолдаги импульсларнинг вақтга боғлиқ ва энергетик характеристикаларининг динамикаси GaAs кристаллидаги эркин ток ташувчиларининг релаксация вақтини инобатга олган ҳолда тадқиқ этилди. GaAs кристалли концентрация ва қалинликнинг мақбул қийматларида НТА элементи ва тўйинувчи фильтр ва телескоп билан биргаликда қўшимча резонатор асиллилигини бошқариш элементсиз барқарор амплитудали ультра қисқа импульсларнинг (пикосекундли) цугини олиш имконини бериши аниқланди.

ХУЛОСА

Олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим қилинди:

1. Биринчи марта “Физика-Қуёш” ИИЧБ материалшунослик институтининг катта қуёш печида концентрацияланган қуёш оқимида оптик дамланадиган лазер яратилган.

2. Монте-Карло усули билан якка фотонларни тақиб қилиш ва элементар оптик жараёнларни (кўп марталаб қайтиш ва синиш, ютилиш ва нурланиш) моделлаштиришга асосланган, концентрацияланган қуёш оқимида оптик дамланадиган лазернинг янги статистик модели ишлаб чиқилган.

3. Ишлаб чиқилган статистик модел доирасида термик эффектларни микдорий баҳолаш имконияти кўрсатилди: термик линза эффектини аниқлаб берадиган аналитик ифодалар келтириб чиқарилди, ва уларни ҳисоблаш

усули ишлаб чиқилди. Лазерлар самарали ишлаши учун актив элеменларга қўйиладиган чегаравий юкламалар аниқланган.

4. Икки карра активлаштирилган Nd:Cr:YAG ва Nd:Cr:GSGG актив элементлар асосида қуёш ёрдамида оптик дамланадиган юқори самарали лазерлар яратишга тўсқинлик қилувчи муаммоларни ҳал қилиш учун конструкторлик ечими таклиф этилган.

5. Биринчи марта, кичик ўлчамдаги парабола кўринишидаги концентраторлардан ва Френел линзаларидан фойдаланган ҳолда, концентрацияланган қуёш нури оқими энергиясини лазер нури энергиясига самарали ўзгартириш мумкинлиги назарий жаҳатдан кўрсатилган.

6. Қуёш энергиясини лазер нури энергиясига юқори самарадорлик билан айлантиришнинг янги, лазерларни оптик дамлаш вақтида ютилмай қолган катта миқдордаги қуёш фотонлари частотасини ўзгартириб берадиган ташқи частота ўзгартиргичидан фойдаланишга асосланган концепцияси таклиф этилган.

7. Таклиф этилган концепциянинг асосий афзалликлари актив муҳитга тушадиган иссиқлик юкламаларининг камайишидан, актив муҳит ва частота ўзгартиргич сифатида турли хил материаллардан фойдаланиш имкониятининг мавжудлигидан, частота ўзгартиргичининг иссиқлик хусусиятларига (иссиқлик-сабабли ҳосил бўладиган икки каррали нур синиши, линза эффекти) қўйилган талабларнинг қатъий эмаслигидан, ҳамда актив элемент ва частота ўзгартиргичлар ҳароратини мустақил бошқариш имконияти мавжудлигидан иборат.

8. Қуёш ёрдамида оптик дамлаш вақтида наносекундли импульсларни генерация қилиш учун $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ асосидаги пассив затворлардан, пикосекундли импульслар генерацияси учун GaAs кристаллидан фойдаланиш мумкинлиги назарий жиҳатдан кўрсатилган.

9. Cr^{4+} ион аралашмалари бўлган $\text{Nd}^{3+}:\text{Cr}^{3+}:\text{GSGG}$ ва $\text{Nd}^{3+}:\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$ лазер материаллари асосида асиллилиги модуляцияланадиган ва модалар пассив синхронизациясига эга бўлган қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерларни яратиш ва наносекунд доирасидаги импульслар кетма-кетлигини генерация қилиш имкониятлари мавжудлиги кўрсатилган.

10. Биринчи марта GaAs кристаллини узоқ вақт оптик бузилиш бўсағасидаги (оптик бузилиш яқинидаги интенсивликдан кам) лазер нури импульслари билан нурлантириш ундаги дефектлар концентрациясининг ошишига олиб келиши тажрибада кўрсатилган.

11. Биринчи марта GaAs кристаллидан қаттиқ жисмли лазерларда бир вақтнинг ўзида ҳам тўйинувчи ютгич, ҳам манфий тескари алоқа элементи сифатида фойдаланиш мумкинлиги назарий жиҳатдан кўрсатилди. Дефект сатҳларининг мос концентрацияларида ночизикли НТА, тўйинувчи ютишни ва пикосекунд оралиғидаги импульслар генерациясини амалга ошириш мумкинлиги аниқланган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ,
ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

ИНСТИТУТ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ПАЙЗИЕВ ШЕРМАХАМАТ ДАЛИЕВИЧ

**ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ НЕОДИМОВЫЕ ЛАЗЕРЫ
С СОЛНЕЧНОЙ НАКАЧКОЙ**

01.04.11 – лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ (DSc) ДИССЕРТАЦИИ
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

ТАШКЕНТ – 2017

Тема докторской диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за B2017.2.DSc/FM52.

Докторская диссертация выполнена в Институте Ионно-плазменных и лазерных технологий. Автореферат диссертации на двух языках (узбекский, русский) размещен на веб-странице Научного совета по адресу fti-kengash.uz и Информационно-образовательном портале “ZiyoNet” по адресу www.ziyo.net

Научный консультант:

Бахрамов Сагдилла Абдуллаевич,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Ашуров Мухсин Хурамович
физика-математика фанлари доктори, академик

Кодиров Мумин Кодирович
доктор физико-математических наук

Нематов Шерзод Каландарович,
доктор физико-математических наук

Ведущая организация:

Национальный университет Узбекистана

Защита состоится «___» _____ 2017 г. в ___ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 при Физико-техническом институте по адресу: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули, 26. Тел./Факс: (+99871) 235–42–91, e-mail: lutr@uzsci.net.

Докторская диссертация зарегистрирована в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института за № 14, с которой можно ознакомиться в ИРЦ по адресу: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули, 26. Тел./Факс: (+99871) 235–30–41.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2017 года
(протокол рассылки ___ от _____ 2017 года).

С.Л. Лутпуллаев
Председатель одноразового научного совета
по присуждению ученых степеней, д. ф.-м. н., профессор

А.В. Каримов
Ученый секретарь одноразового научного совета
по присуждению ученых степеней, д. ф.-м. н., профессор

С.С. Курбанов
Председатель научного семинара при одноразовом
научном совете по присуждению ученых степеней,
д. ф.-м. н.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире одним из важных физических проблем в динамично развивающемся области создания лазерных устройств, преобразующих энергию солнечного излучения в энергию лазерного излучения, является выявление новых активных сред, обладающих определенными физическими свойствами, для эффективного преобразования энергии широкополосного спектра солнечного излучения в энергию монохроматического лазерного излучения и предотвращения негативных термических эффектов, возникающих в процессе эксплуатации этих активных сред. С этой точки зрения поиск и выявление новых путей увеличения эффективности лазеров с солнечной накачкой на основе последних достижений в области материаловедения и в современной оптике и лазерной физике является одним из важнейших задач.

На сегодняшний день в мире исследования в области решения проблем лазеров с солнечной накачкой, преобразующих широкополосное солнечное излучение в когерентное, монохроматическое и направленное излучение, благодаря перечисленным свойствам, преобразование энергии солнечного излучения в энергию лазерного излучения позволяет получить такие световые потоки, плотности которых значительно превышают плотности, получаемые на фокусе солнечных концентраторов, и может привести к появлению новых высокотемпературных технологий, основанных на использовании возобновляемых источников энергии. В этом аспекте целевые научные исследования, в том числе реализация в приведенных ниже направлениях, а именно: разработка и создание новых высокоэффективных лазеров с солнечной накачкой; поиск и выявление новых путей увеличения эффективности лазеров с солнечной накачкой на основе последних достижений в области материаловедения и в других областях современной науки считаются одними из важных задач.

В годы независимости в нашей республике особое внимание обращено научным исследованиям в области физики лазеров с солнечной накачкой, включающем физические явления и процессы, имеющие фундаментальное значение при создании различных типов лазерных устройств. В этом аспекте на основе применения новых материалов, обладающих качественными оптическими свойствами, а также совершенствования методов улучшения эффективности путем введения в кристаллы дополнительных элементов достигнуты существенные результаты. На основе Стратегии действий дальнейшего развития Республики Узбекистан является наиболее важным решение проблем эффективности лазеров, с солнечной накачкой обеспечивающих их широкое применение за счет разработки новых технологий.

Данное диссертационное 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 пя-

ти приоритетным направления 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 диссертации¹.

По исследованию и разработке эффективных способов преобразования солнечного излучения в лазерное в научных международных центрах, университетах и научно-исследовательских институтах, в частности в Institute for Laser Technology, Tokyo Institute of Technology, Institute of Laser Engineering, Osaka University (Япония), National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics (Румыния), Ben-Gurion University of the Negev (Израиль), Minia University, National Research Institute of Astronomy and Geophysics (Египет) Физико-энергетический институт (Россия), Universidade Nova de Lisboa (Португалия), PROMES-CNRS (Франция), Weizmann Institute of Science (Израиль), Technical University of Berlin (Германия) использовались различные методы с применением первичных, вторичных концентрирующих систем, световодов, введением сенсibilизаторов в активную среду и других механизмов преобразования частоты солнечного излучения.

По направлению исследований диссертации, на мировом уровне был решен ряд актуальных проблем и получены следующие важнейшие научные результаты: с применением технологии производства керамических активных материалов были получены новые лазерные материалы с различными размерами и концентрациями активных и сенсibilизирующих ионов, изучены зависимости эффективности передачи энергии от сенсibilизирующих ионов к активным ионам от концентрации, исследованы характеристики лазеров с различной конфигурацией в лабораторных условиях с имитатором солнечного излучения и получена генерация лазерного излучения с высокой эффективностью, но при очень низких выходных мощностях лазерного излучения в Institute for Laser Technology (Япония). В Лиссабонском университете (Португалия) получен ряд новых результатов с применением световодов, 2-х, 3-х мерных вторичных концентрирующих систем по увеличению эффективности преобразования солнечного излучения в лазерное излучение. В National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics (Румыния) получены ряд новых теоретических результатов по эффективности передачи энергии

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

между ионов сенсibilизаторов и активных ионов в зависимости от концентрации.

В настоящее время проводятся научно-исследовательские работы по таким актуальным направлениям как поиск новых композитных лазерных материалов с высокими поглощающими и генерационными свойствами, оптимальных вариантов конструкции для увеличения эффективности лазеров, оптимальных решений по устранению термических эффектов и усиленного спонтанного излучения и т.д.

Степень изученности проблемы. О первом лазере с солнечной накачкой сообщалось ещё в 1966 году. Начиная с этого момента, были реализованы ряд лазерных систем с солнечной накачкой. В большинстве этих работ были использованы твердотельные лазерные материалы, среди которых самым эффективным был неодимосодержащий кристалл иттрий-алюминиевого граната (Nd:YAG). Однако максимальный коэффициент преобразования составлял всего несколько процентов.

Улучшение коэффициента преобразования, прибавлением ионов Cr^{3+} как сенсibilизатора в Nd:YAG был основным методом в течение долгого времени, так как это обеспечивало дополнительное поглощение части видимого диапазона спектра солнечного излучения. Однако производство больших размеров однородных кристаллов с высокой концентрацией ионов Cr^{3+} с применением обычных технологий выращивания кристалла не было эффективно.

Появление и развитие нанотехнологий позднее позволило достигнуть высокой прозрачности, однородности твердотельных лазерных материалов больших размеров. В 2008 году солнечная лазерная система с использованием линзы Френели и Cr:Nd:YAG керамической лазерной среды демонстрировалась учеными под руководством T.Yabe. Эксперименты проводились с комбинацией 2-х метровой (4 м^2) линзы Френеля и вторичного солнечного концентратора в виде полости. Но полученная максимальная выходная мощность лазера составляло 80W, при мощности накачки солнечным излучением – 1860W, а дифференциальный КПД преобразования солнечного излучения в лазерное излучение составляло 4.3%. В 2013 году профессор из Лиссабонского университета Dawei Liang использовал линзу Френеля диаметром 0.9м в качестве солнечного коллектора для накачки монокристаллического 1.0ат%Nd:YAG и керамического 0.1ат%Cr:1.0ат%Nd:YAG активных элементов в форме стержня диаметрами 4 мм, длиной 25 мм, альтернативно внутри конической полости – вторичного концентратора. Авторы сообщали, что экспериментально наблюдалось незначительное преимущество Cr:Nd:YAG керамики по сравнению с Nd:YAG активной средой по эффективности преобразования солнечного излучения в лазерное излучение. В случае с Nd:YAG стержнем, максимальная мощность лазера была 12.3 Вт, а с Cr:Nd:YAG керамическим стержнем максимальная мощность лазера составляло 13.5 Вт.

Несмотря на усилия ученых мира, максимальная эффективность преобразования солнечного излучения в лазерное излучение в реальных условиях с солнечной накачкой, достигнутая на сегодняшний день с помощью твердо-

тельных лазерных сред всё ещё остаётся на уровне ниже 4%, и в связи с этим солнечные лазеры ещё не нашли практического применения. Таким образом, проблема эффективного преобразования солнечного излучения в лазерное излучение является актуальной задачей.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертационная работа. Диссертационное исследование было выполнено в рамках исследований следующих проектов НПО «Академприбор», и Специализированного конструкторско-технологического бюро при институте Ионно-плазменных и лазерных технологий: № STCU-Uzb121 «Разработка оптимальной технологии прямого преобразования концентрированной солнечной энергии в энергию лазерного излучения» (2005–2008), № ФА-А14 Ф0-89 «Разработка мультиэлементного лазера с солнечной накачкой на Большой Солнечной Печи» (2009–2011), № АЗ-ФА-Ф140 «Разработка новой высокоэффективной конструкции лазера с солнечной накачкой» (2012–2014), № АЗ-ФА-Ф045 «Разработка универсального стенда лазера для проведения испытаний различных активных элементов на Большой Солнечной Печи» (2015–2017).

Целью исследования является выявление эффективных способов преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения на основе исследования физических процессов, происходящих в лазерных системах с солнечной накачкой принимая во внимание оптические, термические и механические характеристики твердотельных активных сред

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

- разработка методов моделирования процессов многократного отражения, преломления, поглощения, люминесценции фотонов, происходящих при накачке активных сред лазеров солнечным излучением;

- разработка компьютерной модели лазерных систем различной конфигурации, состоящих из первичных, вторичных концентраторов солнечного излучения, дополнительных элементов оптики для получения равномерных распределений потоков солнечного излучения и резонатора лазера;

- выявление основных ограничивающих параметров эффективности преобразования существующих лазеров с солнечной накачкой, с помощью разработанной нами модели лазеров с солнечной накачкой;

- изучение термических характеристик активных сред и других элементов конструкции лазерных систем для разработки эффективных систем охлаждения;

- выявление эффективных схем накачки активных элементов как с концентрированным потоком солнечного излучения большой солнечной печи (БСП), так и других малых параболических концентраторов с учетом спектральных характеристик активных сред и спектра солнечного излучения на основе численных экспериментов с использованием разработанной нами компьютерной модели;

создание экспериментальной лазерной установки на БСП и систем охлаждения установки, разработка методов эффективной накачки в непрерывном режиме;

исследование возможности создания эффективных лазеров с использованием различных активных сред, в том числе композитных лазерных материалов;

оценка выходных параметров лазеров с солнечной накачкой и эффективности преобразования солнечной энергии.

Объектом исследования являются твердотельные неодимо-содержащие активные элементы, концентрирующие системы солнечного излучения и резонаторы лазера.

Предметом исследования являются физические процессы многократного 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 численном моделировании случайных процессов, происходящих в лазерной системе с учетом спектральных характеристик активных сред и солнечного излучения. Численное моделирование основано на использовании методов Монте-Карло и прослеживания лучей. В экспериментах использовались стандартные методы с применением современных приборов и оборудования: Nd:YAG лазера с диодной накачкой мощностью 100мВт для определения параметров используемых оптических элементов, гелий-неоновые лазеры для юстировки, измеритель мощности S212, визуализаторы фирмы Thorlabs и цифровой осциллограф.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработаны новые методы моделирования процессов многократного отражения, преломления, поглощения, фотолюминесценции;

впервые создан экспериментальный лазер на Большой Солнечной Печи и получена лазерная мощность 80Вт в непрерывном режиме;

созданы компьютерные модели, позволяющие проводить численные эксперименты по изучению характеристик лазерных систем с солнечной накачкой различной конфигурации, включая характеристики концентраторов;

выявлены оптимальные варианты схем накачки Nd:YAG, Nd:Cr:YAG, Cr:GSGG лазеров на Большой Солнечной Печи и малых параболических концентраторах;

впервые предложен новый альтернативный подход, основанный на использовании внешних преобразователей частоты солнечного спектра и показана возможность увеличения эффективности накачки Nd:YAG лазеров до 30-32%;

обоснованы возможности использования активных элементов-кристаллов Cr:YAG, Ce:YAG, Cr:GSGG, Cr:LiCAF, Ti:Сапфира в качестве преобразователей частоты солнечного спектра.

Практические результаты исследования. Разработанные методы для моделирования физических процессов в лазерах с солнечной накачкой и модели лазерных систем с солнечной накачкой, могут использоваться при разработке и создании новых лазеров с солнечной, ламповой, а также диодной накачкой. Предложенный подход, основанный на использовании внешних преобразователей частоты солнечного спектра, позволит создание солнечных лазеров с высокой эффективностью преобразования, а также разработке новых солнечных лазерных технологий.

Достоверность результатов исследований обосновывается применением современных методов и подходов оптики и лазерной физики. Выводы основаны на базовых положениях теоретических работ, посвященных изучению физических механизмов первичных процессов, происходящих в лазерных средах, и полностью согласуются с результатами других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследований настоящей диссертации заключается в предложенной новой концепции, основанной на использовании внешних преобразователей частоты солнечного спектра, которая дает возможность существенного увеличения эффективности лазеров с солнечной накачкой и использования разработанной модели лазеров с солнечной накачкой для проведения теоретических исследований.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что предложенные научно-технические решения могут быть применены для разработки и создания новых эффективных технологий, основанных на использовании возобновляемых источников энергии.

Внедрение результатов исследования. По результатам исследования различных механизмов преобразования энергии солнечного излучения в энергию лазерного излучения, а также исследования возможности генерации ультракоротких лазерных импульсов с помощью пассивных затворов на основе кристалла GaAs:

впервые был создан лазер на большой солнечной печи и получена лазерная мощность 80Вт в непрерывном режиме (справка Академии наук Республики Узбекистан от 24 октября 2017г). Разработанный лазер позволило обеспечить повышение эффективности лазеров с солнечной накачкой в 5 раз и разработать новые технологии, основанные на использовании возобновляемых источников энергии;

результаты, полученные по преобразованию концентрированного потока солнечного излучения в лазерное при использовании Nd^{3+} : YAG, Nd^{3+} : Cr^{3+} : YAG активных элементов, использованы при исследований спектроскопических характеристик лазерных материалов и изучении возможности получения водорода с использованием солнечной энергии в зарубежных научных журналах (*Opt. Mater. Express* 6, 552–557, 2016, IF : 2.591; *International journal of hydrogen energy* 39(26), (2014): pp. 14227–14233, IF : 3.64; *International Journal of Photoenergy*, 2014, IF: 2.37 и т.д.). Использование результатов позволило обосновать достоверности данных о

спектроскопических характеристиках керамических лазерных материалов при проведении теоретических расчетов, эффективности способа получения водорода с использованием солнечной энергии и т.д.

теоретические и экспериментальные результаты, полученные в диссертации по исследованию нелинейно-оптических свойств кристалла GaAs и, разработанные модели и предложенные новые подходы в результате этих исследований были применены при исследовании процесса пассивной синхронизации в зарубежных научных журналах (*Optics and Spectroscopy* 119, no. 2 (2015), IF: 0.644; *Optics and Spectroscopy*, vol. 115, issue 3 (2013), IF: 0.673; *Optics and Spectroscopy* 121(5):710-712, 2016, IF: 0.716). Использование результатов позволило осуществить эффективную пассивную синхронизацию лазеров на Nd:YAG, а также детально изучить температурной зависимости коэффициента поглощения в кристаллах A_3B_5 .

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 28 научных трудах, из них 18 научные статьи, в том числе 14 в международных, 4 в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, 10 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 180 страниц машинописного текста, включая 88 рисунков и 3 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект, предмет и методы исследования, изложена научная новизна, научно практическая значимость полученных результатов, обоснована достоверность результатов, приведены краткие сведения о внедрении результатов, апробация работы и структура диссертации.

В первой главе диссертации «**Современное состояние проблемы**» диссертации проанализированы литературные данные по исследованию в области преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения. Выявлено, что эффективность преобразования солнечного излучения в лазерное излучение всё еще остаётся низкой. Сделано заключение, что для увеличения эффективности преобразования, необходимо выполнение следующих основных задач:

– поиск новых конструкторских решений для увеличения эффективности существующих лазеров с солнечной накачкой (лазеры на Nd:YAG, на александрите $Cr^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$, на Ce:Nd:YAG), например с применением компо-

зитных структур лазерных материалов, с повышением эффективности концентрирующих систем и т.д.

– поиск новых путей повышения эффективности преобразования с применением сенсibilизаторов (лазеры на активных элементах, таких как Cr:Nd:YAG, Cr:Nd:GSGG, Cr:Nd:YSGG и т.д.) и/или с применением внешних частотных преобразователей (лазеры на Nd:YAG, на Ce:Nd:YAG с преобразователями частоты солнечного излучения, например на Cr³⁺:YAG, Cr³⁺:GSGG, Cr³⁺:YSGG, Cr³⁺:LICAF, Cr³⁺:LISAF, Ti³⁺:Сапфир и т.д.)

Во второй главе «**Описание модели лазера и методика расчета термических эффектов**» приведена разработанная статистическая модель лазеров с солнечной накачкой, выведены выражения для расчета тепловых характеристик активного элемента и тепло-наведенного линзового эффекта. В данной диссертационной работе были использованы методы, основанные в основном на моделировании различных конструкций лазера для определения оптимальных решений, а также теоретические и экспериментальные исследования с использованием макетных и экспериментальных образцов лазера с солнечной накачкой.

Моделирование для рассмотренных в диссертации схем солнечного лазера были выполнены, с использованием методов Монте-Карло и прослеживание лучей (Ray-tracing method). Процессы многократного отражения, преломления и поглощения фотонов были смоделированы в трехмерных координатах. В отличие от моделей, использованных в других работах, в данной модели был включен также процесс излучения в преобразователе частоты в произвольном направлении в пределах телесных углов 4π после процесса поглощения. В модели, в дополнение к спектру поглощения активной среды и солнечного спектра, используются также спектры поглощения и излучения преобразователя частоты.

Основная часть модели заключается в определении последовательности точек пересечения, используя геометрическую оптику и моделирование элементарных процессов, таких как отражения, преломления, поглощения и испускания фотона методом Монте-Карло. Конечным результатом моделирования является доля поглощенных в активной среде фотонов, которые участвуют в создании инверсии населенности, т.е. эффективность накачки η_p и распределение поглощенной мощности. Распределение поглощенной мощности использовалось на следующем этапе для расчета тепловых характеристик, а эффективность накачки для расчетов при оценке зависимости выходной мощности лазерного излучения от входной мощности солнечного излучения с использованием известного выражения для четырехуровневого лазера:

$$P_{out} = (\gamma_2 / 2\gamma) \eta_p (P - P_{thr}) \quad (1),$$

где γ_2 – логарифмические потери за счет пропуска выходного зеркала, 2γ – полные потери внутри (total round-trip loss) резонатора, η_p – эффективность накачки, P_{out} , P , P_{thr} – выходная мощность лазера, мощность накач-

ки и пороговая мощность соответственно. Ниже приводим описание основных частей разработанной модели.

Запуск фотона. Важно отметить, что луч в нашей модели состоит из одного единственного фотона в противоположность пачкам фотонов, которые часто используются в методе прослеживания лучей. Это упрощает модель, устраняя использование весовых коэффициентов, когда проводится моделирование процессов многократного отражения и преломления.

В начальной стадии модель устанавливает начальное положение фотона на поверхности параболического концентратора так же как исходного направления от солнца. Модель использует три случайные координаты в декартовых системах координат в пространстве, чтобы определить положение, наряду с тремя случайными направляющими косинусами, чтобы определить направление распространения в телесном угле, ограниченном солнечным диском.

Отбор длины волны и коэффициента поглощения. Длина волны определяется из спектральной интенсивности солнца, решением следующего интегрального уравнения:

$$\xi = \int_0^{\lambda} I_{AM0}(\lambda) \frac{\lambda}{hc} d\lambda \quad (2),$$

где $I_{AM0}(\lambda)$ – нормированная спектральная интенсивность [Вт/м²/ нм] АМ0 солнечного излучения при заданной длине волны λ [нм], ξ случайное число равномерно распределенное в интервале [0,1].

Отбор длины поглощения. Длина поглощения l – расстояние путешествия фотона, пока он не поглотится либо активной средой, либо преобразователем частоты. Для определения длины поглощения был использован метод обратного распределения и закон Бугера-Ламберта

$$l = -\frac{\ln \xi}{\mu} \quad (3),$$

где ξ – случайное число и μ – коэффициент поглощения для заданной длины волны.

Отбор размера шага и перемещение фотона. Размер шага r – расстояние путешествия фотона между двумя точками пересечения. Чтобы определить самую ближайшую точку пересечения в некоторой части поверхности системы, уравнение луча подставляется в уравнение поверхности и последнее решается относительно r . Как только размер шага отобран, фотон распространяется на расстояние r в направлении, определяемом направляющими косинусами при условии, что поглощение не происходит.

Моделирование поглощения. При заданной длине поглощения и размере шага, необходимо определить расстояние, где происходит поглощение. Поглощение происходит тогда, когда фотон пройдет расстояние, равное длине поглощения в поглощающей среде. В модели, размер шага и длина поглощения сравниваются каждый раз перед перемещением, чтобы определить точку, где поглощение происходит. Если длина поглощения меньше чем размер шага, последний будет заменен длиной поглощения и последнее пере-

мещение будет выполнено. После этого, координаты запоминаются или отмечаются на экране монитора и слежение фотона на этом заканчивается. Альтернатива, если длина поглощения больше чем размер шага величина длины поглощения уменьшается на размер шага, и слежение фотона продолжается. Процесс слежения будет закончен тогда, когда фотон либо поглощается, либо покидает систему.

Моделирование процессов отражения и преломления. Так как рассматривается одиночный фотон, он может либо отражаться, либо преломляться. Поэтому, чтобы моделировать эти процессы, используются следующие подходы.

В принципе, коэффициент отражения зависит от падающего угла и от поляризации света. Так как солнечный свет не поляризован, использовано среднее значение коэффициентов отражения для двух поляризационных состояний (s и p) солнечного света. Чтобы определить какой из двух процессов происходит, генерируется случайное число ξ и сравнивается с коэффициентом отражения R_{ref} . Если $\xi < R_{ref}$ отбирается отражение в противном случае выбирается рефракция и определяются новые направляющие косинусы.

Моделирование испускания фотона. Процесс испускания фотона происходит тогда, когда прослеживаемый фотон достигает преобразователя частоты и поглощается там, после процессов многократного отражения и преломления в системе. В этом случае, модель немедленно производит новый фотон вместо поглощенного с новой рандомизированной длиной волны, на основе спектра испускания преобразователя частоты, используя метод, описанный выше для определения длины волны от солнечного спектра. Последние координаты остаются неизменными. Однако направляющие косинусы обновляются произвольными величинами, принятыми в пределах 4π стерадиан телесного угла. Далее слежение за фотоном продолжается, пока фотон либо не поглотится, либо покидает систему. Таким образом, конечный результат используемой модели дает относительную долю фотонов, поглощенных в активной среде, которая и есть эффективность накачки.

Для проверки работоспособности разработанной нами модели и достоверности полученных результатов, проводились моделирование существующих лазеров, приведенных в литературе. Сравнение результатов показали отличное 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.

Для анализа и учета влияния различных факторов, ограничивающих выходные мощности лазерного излучения, в рамках настоящей диссертационной работы в частности были разработаны специальные методики расчетов тепловых характеристик активных сред различной геометрии и термического линзового эффекта. Термический линзовый эффект является одним из существенных недостатков твердотельных лазеров, который приводит к расширению лазерного пучка и как следствие уменьшению плотности мощности. По-

этому изучение данного эффекта важно для оценки максимальной выходной мощности за единицу площади. В связи с этим была разработана методика расчета термического линзового эффекта в лазерном стержне. Для этого выведено соответствующее аналитическое выражение для численного решения задачи по определению траектории лучей и фокусного расстояния.

В третьей главе **«Разработка лазера на большой солнечной печи»** приведены результаты исследований по созданию лазера на большой солнечной печи (БСП). Для выбора оптимального варианта схемы накачки и конструкции лазера на большой солнечной печи проведен обширный анализ возможности получения эффективной генерации лазерного излучения на БСП проведением расчетов на основе разработанной модели для ряда активных элементов (Nd:YAG, Nd:Q98, Nd:Cr:YAG) и различных вариантов схемы накачки. Исследовались температурные режимы использованных конструкций, термический линзовый эффект в Nd:YAG, Nd:Q98, Nd:Cr:YAG активных элементах, а также для композитных вариантов этих активных элементов.

Численные эксперименты по изучению возможности достижения эффективной схемы накачки Nd:Cr:YAG керамических активных элементов стержневой формы показали, что в условиях БСП фокусная длина тепловой линзы определяется тепловой нагрузкой и размерами активного элемента. Для нормального функционирования Nd:Cr:YAG керамики в условиях БСП необходимо перераспределить интенсивность солнечной радиации в центральной плоскости так, чтобы тепловая нагрузка была ниже 3 кВт на 200мм длины активного элемента, путем увеличения размера пятна. В этом случае, для эффективного использования полной энергии солнечного потока БСП будет необходимо увеличить длину и количество активных элементов. Изучение вариантов конструкции лазера с композитными активными элементами показало более высокую эффективность поглощения в случае использования композитного Nd:Cr:YAG активного элемента.

На основании результатов проведенных исследований разработан и создан лазерный стенд, показанный на рисунке 1. Созданный стенд лазера с солнечной накачкой после предварительных испытаний в лабораторных условиях был установлен на фокальную плоскость БСП для определения его работоспособности при условиях высокой плотности солнечного потока БСП.

Эксперименты проводились с использованием отдельных активных элементов разной длины и диаметров. Для накачки использовалась центральная часть потока солнечного излучения, где в первом приближении распределение интенсивности можно рассматривать равномерным. В экспериментах был использован мульти - элементный прямоугольный вторичный концентратор (ВК). Коэффициенты отражения внутренних поверхностей ВК составляла ~80%.

Для испытания работоспособности разработанной нами лазерной системы и получения генерации были проведены эксперименты с одним активным элементом. Также эксперименты были проведены при относительно низких плотностях потока солнечного излучения. На экспериментах значение интенсивности потока солнечного излучения определялось калориметрическим способом. Выходная мощность лазерного излучения измерялась с помощью измерителя мощности PM212, рассчитанный на максимальную мощность 10Вт. При больших мощностях для ослабления мощности лазерного излучения использовались лазерные выходные зеркала с коэффициентами отражения 80 и 90%. На рис. 2 приведены зависимости выходной мощности лазерного излучения для активного элемента с рабочими размерами $\varnothing 6 \times 130 \text{ мм}$ от интенсивности потока солнечного излучения I_0 и $1/5$ части мощности солнечного потока, падающего на входную апертуру 5-ти элементного вторичного концентратора. Коэффициент преобразования энергии солнечного излучения в лазерное излучение для данного активного элемента составляла $\sim 1\%$.



Рис. 1. Лазерный модуль на фокусе БСП в собранном виде.

Как видно из рисунка максимальная мощность, которую можно получить из одного кристалла с рабочими размерами $\varnothing 6 \times 130 \text{ мм}$ составляет 200 Вт при коэффициенте отражения выходного зеркала равного 90%. На основании этих результатов оценивались выходные параметры для стержня с рабочими размерами $\varnothing 10 \times 130 \text{ мм}$ (см. рис. 2).

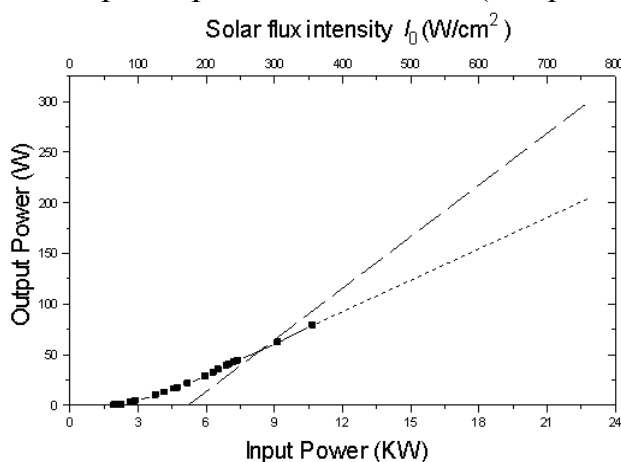


Рис. 2. Зависимость мощности выходного лазерного излучения от входной мощности и от интенсивности I_0 потока солнечного излучения для Nd:YAG активного элемента.
Квадраты – экспериментальные результаты. Штриховая линия – расчетная зависимость для стержня с рабочими размерами $\varnothing 10 \times 130 \text{ мм}$.

Таким образом, максимальная мощность, которую можно получить из 5-ти Nd:YAG активных элементов с рабочими размерами $\varnothing 10 \times 130 \text{ мм}$ для рассмотренной конструкции вторичного концентратора может достигать значение $\sim 1.5 \text{ кВт}$. Увеличение размеров вторичного концентратора и использование керамических лазерных материалов с длиной, сравнимой с размерами

фокусного пятна может давать возможность существенно увеличить выходную мощность и эффективность преобразования системы солнечного лазера.

С учетом полученных результатов для Nd:YAG активных элементов нами проведены оценки выходных параметров керамических Nd:Cr:YAG активных элементов. Проведенные расчеты и анализ результатов показывал, что использование мульти-элементного вторичного концентратора с размерами сравнимыми с диаметром фокусного пятна БСП может давать суммарную мощность до 20 кВт при использовании керамических Nd:Cr:YAG стержней соответствующих размеров.

Исследована возможность создания керамического Nd:Cr:YAG дискового лазера с накачкой концентрированным солнечным потоком БСП. Предложена новая конструкция для высоко-активированного, Nd:Cr:YAG керамического дискового лазера и показана возможность получения эффективности преобразования ~25%.

В четвертой главе **«Исследование возможности создания высокоэффективных лазеров с солнечной накачкой»** для разработки и создания эффективного варианта конструкции лазера нами были исследованы различные схемы накачки, в частности торцевая схема накачки, которая может быть использована для создания лазера на отдельном гелиостате БСП или на малых параболических концентраторах.

Как отмечалось выше, несмотря на усилия ученых увеличить эффективности лазеров с применением двукратно активированных лазерных материалов, в частности Cr:Nd:YAG, Cr:Nd:GSGG пока не увенчались успехом. В ряде экспериментах, проведенных до настоящего времени наблюдалось незначительное улучшение эффективности и при этом отмечалось, что тепловая нагрузка является ключевым фактором оказывающим существенное влияние на характеристики Cr:Nd:YAG, Cr:Nd:GSGG лазеров при накачке широкополосным спектром солнечного излучения. Однако эти экспериментальные результаты были получены в условиях, где дополнительная тепловая нагрузка, возникающая за счет 3-4-х кратного увеличения поглощенной мощности в Cr:Nd:YAG активном элементе по сравнению с Nd:YAG создавала дополнительную проблему и вместе с тем использованная конфигурация со стержневой геометрией активного элемента в этих экспериментах не могла обеспечить эффективного охлаждения. Известно, что излишняя тепловая нагрузка на активный элемент лазера может создать серьезную проблему, которая приведет к тушению люминесценции лазерной линии, возникновению термически наведенного линзового эффекта и вплоть до полного исчезновения лазерной генерации или даже разрушения активного элемента. Кроме того, увеличение эффективности поглощения приводит к тому, что основная часть энергии поглощается в приповерхностном слое активного элемента при поперечной схеме накачки, что в свою очередь приводит к усилению паразитной генерации. Использование активных элементов стержневой геометрии, в таких случаях требует принятия специальных мер таких как, например, гравирование боковой поверхности или использование композитных активных элементов. Следовательно отмеченные выше экспериментальные результаты

не могут быть использованы в качестве аргумента для опровержения возможной высокой эффективности Cr:Nd:YAG активных элементов при солнечной накачке. В связи с этим для решения проблем Cr:Nd:YAG также как и Cr:Nd:GSGG, который имеет сходные проблемы в связи с низкой теплопроводностью и высокой вероятностью термических эффектов, нами предлагалось использование дисковой конфигурации, где можно обеспечить эффективный съём тепловой нагрузки и высокой эффективности лазера при накачке солнечным излучением. Так, было проведено исследование возможности создания эффективного лазера на малых параболических солнечных концентраторах с использованием Nd:Cr:YAG керамических активных элементов и Cr:Nd:GSGG в форме диска путем численных экспериментов. Рассматривались два варианта дискового лазера: однопроходная и двухпроходная схемы накачки. Для оценки зависимостей выходной мощности лазерного излучения от мощности солнечного излучения в случае однопроходной схемы использовалось известное выражение для четырехуровневого лазера, а в случае двухпроходной выведены соответствующие выражения, принимая во внимание специфические характеристики конфигурации с двойным проходом и активным зеркалом.

Показано, что полная выходная мощность излучения лазеров может достигнуть 35%-ой конверсионной эффективности в обоих случаях (рис. 3). При этом показано, что температура активного элемента не превышает 100°C, где влияние тепловых эффектов будет несущественным.

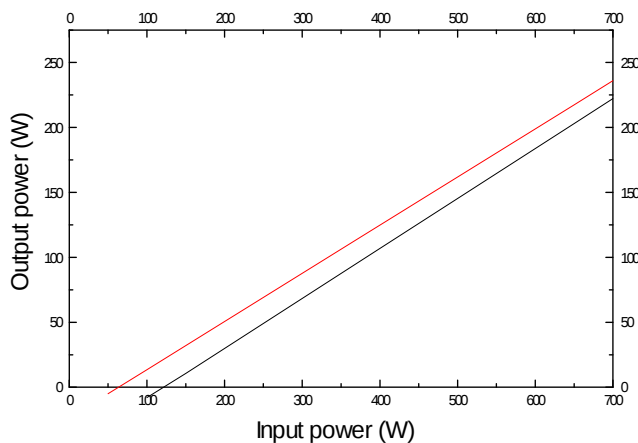


Рис. 3. Зависимость выходной мощности от мощности накачки лазера на параболическом концентраторе с диаметром 1м, вне фокуса, при диаметре диска активного элемента Nd:Cr:YAG 2см и толщине 2мм.
 1) для однопроходной схемы,
 2) для двухпроходной схемы.

Двухпроходная схема более эффективна при низких плотностях солнечного потока, особенно это отчетливо заметно на рисунке 3. Двухпроходная схема может использоваться для реализации каскадных солнечных лазеров. В то же время простота конструкции однопроходной схемы лазера является важным преимуществом при достаточных плотностях потока солнечного излучения. В случае использования Nd:Cr:GSGG активных элементов в форме диска показано, что эффективность преобразования может достигать до 30% для рассмотренной схемы лазера.

Отметим, что результаты для Nd:Cr:YAG были получены в предположении, что в Nd:Cr:YAG происходит эффективная передача энергии из ионов

сенсibilизаторов в активные ионы в условиях комнатной температуры, и единственной проблемой является дополнительная тепловая нагрузка. Эти результаты были опубликованы в 2011 году. Однако в течение последних 6 лет не было сообщений об экспериментах с Nd:Cr:YAG дисковых лазеров с солнечной накачкой. С другой стороны проведенный нами анализ литературных данных показал, что в отличие от Nd:Cr:GSGG, в Nd:Cr:YAG спектр люминесценции ионов Cr плохо перекрывается со спектром поглощения ионов Nd в кристалле YAG и при этом авторы ряда работ утверждают высокую эффективность сенсibilизации, что не может быть объяснена в рамках известных механизмов передачи энергии из ионов Cr ионов Nd, если не учесть температурную зависимость формы спектра люминесценции ионов Cr в матрице YAG. Известно, что с повышением температуры спектр люминесценции ионов Cr в матрице YAG сдвигается в сторону больших длин волн, где ионы Nd имеют сильные полосы поглощения. Это приводит к увеличению эффективности сенсibilизации, однако при этом ухудшаются лазерные характеристики в результате термического заселения нижнего рабочего уровня. В таком случае для обеспечения эффективной работы лазера, требуется поддержка температуры активного элемента на таком уровне, где термическое заселение нижнего рабочего уровня не сильно влияет на сечение лазерной генерации и в то же время происходит эффективная сенсibilизация, если такое состояние на самом деле существует. Тогда эффективность лазера при солнечной накачке будет не 35% как отмечалось выше, а намного ниже. Другими словами, для решения проблемы Nd:Cr:YAG необходимо дальнейшее исследование. В связи с этим вне зависимости от того, что подтвердилось или нет предложенное решение для Nd:Cr:YAG нами были проведены поиски альтернативных путей повышения эффективности лазеров с солнечной накачкой и найдено другое более простое решение. Таким образом, если Nd:Cr:YAG окажется неэффективным то, лучшее решение должно быть разделение сенсibilизатора от активных ионов, а именно использование Cr^{3+} :YAG отдельно от лазерной активной среды Nd:YAG. Было бы еще лучше, если Cr^{3+} в других кристаллических матрицах как GSGG, YSGG, LICAF, LISAF или Ti^{3+} :Сапфир использовались как внешний преобразователь частоты (frequency converter, более точно, frequency down-shifter), а не Cr^{3+} :YAG, спектр испускания которого перекрывается относительно плохо с полосами поглощения Nd:YAG в комнатной температуре. Ниже приводятся результаты этих исследований.

Исследование возможности увеличения эффективности лазеров с солнечной накачкой, использованием внешних преобразователей частоты. Исследование проводилось с использованием разработанной нами модели. Моделирование было выполнено для параболического солнечного концентратора с диаметром 1м и фокусным расстоянием 0.5м. Рассматривалась торцевая схема накачки с композитной активной средой в фокальной плоскости. Выходное зеркало было установлено в центре параболического концентратора, напротив переднего торца композитной активной среды конической формы, в то время как роль выходного зеркала играло диэлектрическое многослойное отражающее покрытие на поверхности другого торца активной

среды. Рассмотренная схема композитной активной среды изображена на рис. 4, состоящая из двух частей.

Основная часть, представляющая собой водоохлаждаемую композитную активную среду YAG/Nd:YAG изготовленную методом диффузионного соединения монокристаллов или керамических материалов, окруженный металлической трубкой, на внутреннюю поверхность которой нанесено серебряное покрытие.

Вставная часть, параболический преобразователь частоты солнечного спектра с отдельным водяным охлаждением.

Боковая поверхность активной среды полирована, чтобы обеспечить, полное внутреннее отражение и правый торец имеет высоко-отражающее покрытие на длине волны генерации в 1064нм и пропускающее на длинах волн ниже 900нм. Параболическая форма преобразователя частоты во вставной части была обусловлена потребностью формирования потока с угловой апертурой, ограниченной углом полного внутреннего отражения преобразованных по частоте фотонов (смещенных вниз), чтобы минимизировать потери при передаче. Наружная поверхность параболического преобразователя частоты также имеет серебряное покрытие.

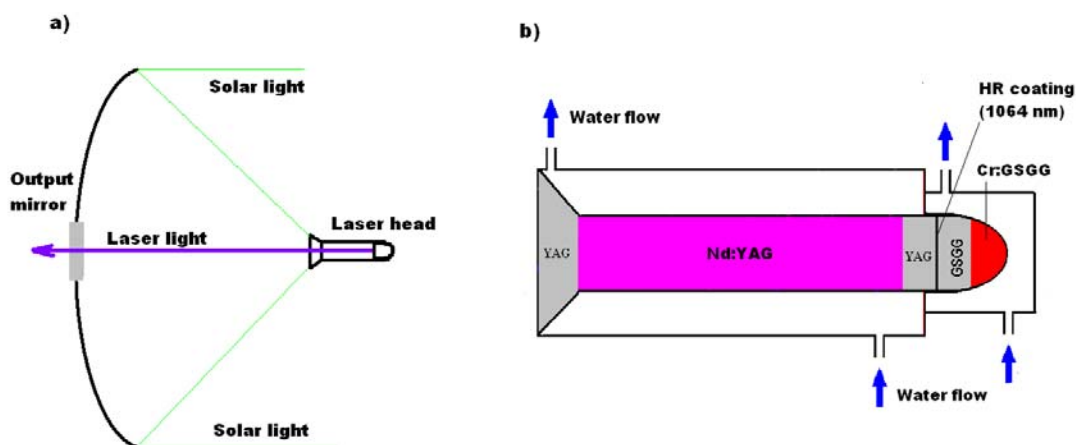


Рис. 4. Схема лазера с преобразователем частоты

Для качественного анализа и сравнений на рис. 5 представлены спектры солнечного излучения, кристаллов Nd:YAG и Cr:GSGG. Как видно из этого рисунка, наблюдается превосходное совпадение спектра испускания Cr:GSGG и полос поглощения Nd:YAG с одной стороны и относительно слабое перекрытие между спектрами поглощения Cr:GSGG и Nd:YAG с другой стороны. Отметим, что перекрытие между спектрами поглощения активных и сенсibilизирующих ионов является одним из недостатков двукратно активированных лазерных материалов из-за того, что сенсibilизирующие ионы могут поглощать часть спектра, которая могла бы быть поглощенной активными ионами при отсутствии сенсibilизатора.

Однако предлагаемая схема свободна от такого недостатка, так как в данном случае преобразователь частоты преобразовывает только часть солнечного

спектра, не поглощенного в Nd:YAG активной среде. Расчеты были выполнены для параболического концентратора с диаметром 1м со стандартными параметрами Nd:YAG размерами $\phi 10 \times 50$ мм и концентрацией хрома 2% в Cr:GSGG. Концентрация церия в Ce:Nd:YAG была 0.05%. Толщина Cr:GSGG составляла 10мм. Коэффициент отражения серебряного покрытия на наружной поверхности преобразователя частоты параболической формы предполагалась равной 97%. Потерю на поверхностях раздела между лазерной активной средой и преобразователем частоты в принципе можно сделать ниже 5-ти% (в одном направлении), с использованием оптических гелей, применяемых для согласования показателей преломления.

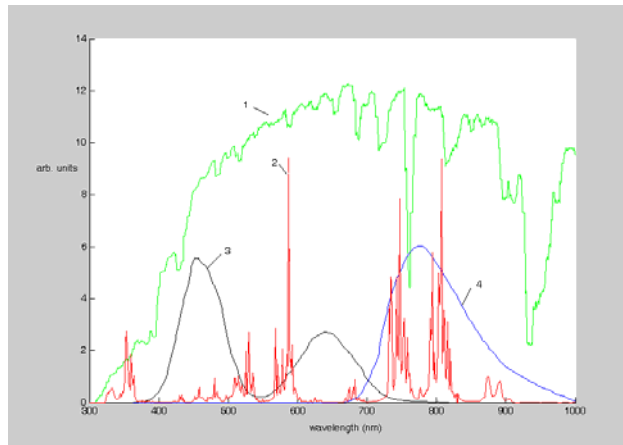


Рис. 5. 1) стандартный спектр солнечного излучения, 2) спектр поглощения Nd:YAG, 3, 4) спектры поглощения и эмиссии Cr:GSGG

Было проведено моделирование, чтобы определить главные параметры полной эффективности накачки, равной максимальному дифференциальному КПД, которого можно достичь при условии, что эффективность съема равняется единице. Таким образом, максимальный результат, полученный в этих экспериментах, был равен 0.32 для комбинации Nd:Ce:YAG + Cr:GSGG, который больше чем в два раза превышает эффективности накачки 0.14 для Nd:YAG. Полученные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

Эффективности накачки для различных комбинаций

Активная среда	Преобразователь частоты	Эффективность накачки
Nd:YAG	-	0.14
Ce:Nd:YAG	-	0.22
Nd:YAG	Cr:YAG	0.21
Nd:YAG	Cr:GSGG	0.26
Ce:Nd:YAG	Cr:YAG	0.27
Ce:Nd:YAG	Cr:GSGG	0.32

Еще один важный результат, полученный нами касается свойств Cr:Nd:YAG. Как известно, в двукратно активированных лазерных средах, таких как Cr:Nd:YAG передача энергии (возбуждения) происходит двумя способами: излучательная и безизлучательная передача энергии. В случае, когда Cr:YAG используется в качестве внешнего частотного преобразователя отдельно от Nd:YAG активной среды, возможна только излучательная передача энергии. Следовательно, то, что эффективность накачки в последнем слу-

чае составляет 21% для комбинации Nd:YAG + Cr:YAG (см. таблицу) означает, что вклад излучательной передачи энергии от ионов Cr в ионы Nd составляет ~7% в нормальных условиях, т.е. эффективность накачки Nd:YAG увеличивается в 1.5 раза. Последнее свидетельствует о доминирующей роли безизлучательной передачи энергии, в случае использования двукратно активированной активной среды Cr:Nd:YAG, что предстоит еще доказать экспериментально в реальных условиях при солнечной накачке.

На основании полученных результатов, с использованием выражения (1) были рассчитаны зависимости выходной лазерной мощности от мощности падающего солнечного излучения для коэффициента отражения выходного зеркала 95%. Некоторые результаты приведены на рисунке 6. Отметим, что солнечная мощность в 1000Вт (рис. 6) не может быть собрана в фокальной плоскости концентратора с диаметром 1м на поверхности Земли, однако она может быть собрана в космосе, так как солнечная радиация вне земной атмосферы составляет $\sim 1350\text{Вт/м}^2$. Результаты количественных анализов показывают возможность более чем пятикратного увеличения эффективности преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения Nd:YAG лазера с внешним Cr:GSGG преобразователем частоты для типичной солнечной радиации 800Вт/м^2 на поверхности Земли (около 600Вт на рис. 6).

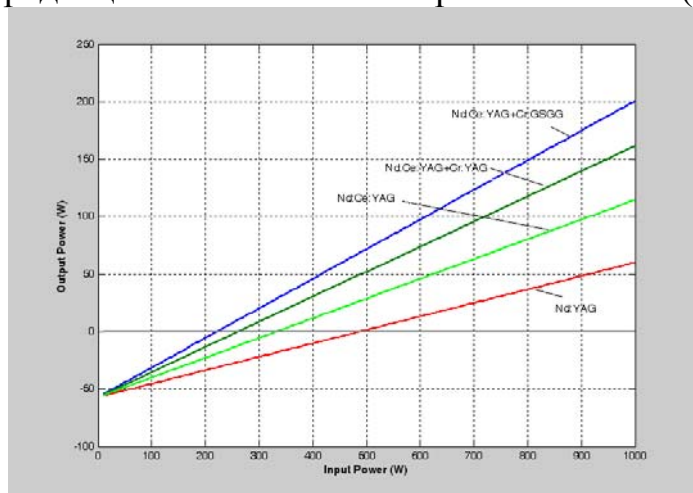


Рис. 6. Зависимости выходной мощности лазерного излучения от входной мощности (солнечного излучения) для параболического концентратора с диаметром 1м.

Возможно, что рассмотренная схема является не самой оптимальной, но она показывает существенное увеличение эффективности преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения по сравнению с максимальной эффективностью, достигнутой до настоящего времени. Таким же способом возможно дальнейшее увеличение конверсионной эффективности, с применением частотных преобразователей, преобразующих инфракрасную часть солнечного спектра в видимый спектр (up-converters).

Таким образом, предлагается новый простой подход для лазеров с солнечной накачкой, обеспечивающий эффективное преобразование солнечной энергии в энергию лазерного излучения, основанный на повышении эффективности солнечных лазеров через внешнее преобразование частоты большого количества не поглощенных солнечных фотонов. Была получена 32%-ная эффективность накачки, означающая максимальный дифференциальный

КПД, который можно получить при условии, что эффективность съема равна единице. Главными преимуществами предложенного подхода являются: относительно низкие тепловые нагрузки на активные элементы, возможность использования различных материалов как для активной среды, так и для преобразователя частоты, менее жесткие требования к тепловым характеристикам (тепло наведенное двойное лучепреломление, эффект линзы) преобразователя частоты, а также возможность независимого регулирования температуры в активной среде и преобразователе частоты, когда это необходимо.

В пятой главе «**Модуляция добротности резонаторов лазеров с солнечной накачкой**» представлены результаты исследования возможности генерации нано- и пикосекундных импульсов при солнечной накачке.

Для ряда приложений желательно иметь высокостабильные, импульсные наносекундные, пикосекундные (или субпикосекундные) лазеры с высокой выходной мощностью, генерирующие цуги импульсов с управляемой длительностью и амплитудой, предпочтительно без использования дополнительных усилительных каскадов, которые делают лазерную систему более громоздкой. Таким требованиям могут отвечать импульсные твердотельные лазеры на базе неодимовых активных элементов с синхронизацией мод и нелинейно-отрицательной обратной связью, которые работают в квазистационарном режиме. Для генерации наносекундных импульсов можно использовать пассивные затворы на основе $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$, а для пикосекундных импульсов пассивные затворы на основе кристаллов GaAs. В данной главе диссертации исследована возможность генерации импульсов нано- и пикосекундных импульсов с применением указанных затворов.

Генерация наносекундных импульсов. Для генерации наносекундных импульсов в Nd:YAG лазерах можно использовать выходное или 100%-ное зеркало с $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ пассивным затвором (насыщающим поглотителем). В случае Nd:Cr:GSGG или Nd:Cr:YAG в составе этих материалов всегда присутствуют определенное количество примесей ионов Cr^{4+} , которые могут привести к модуляции добротности в зависимости от концентрации этих ионов. В данном разделе исследуется влияние примесей Cr^{4+} ионов в Nd:Cr:GSGG и Nd:Cr:YAG лазерных материалах на параметры лазеров при солнечной накачке. Для этого разработана компьютерная модель лазера с солнечной накачкой, и с насыщающимся поглотителем, где используются скоростные уравнения, учитывающие поглощение на примесных ионах Cr^{4+} . Расчеты проводились для отмеченных выше активных элементов, накачиваемых солнечным потоком на фокусе концентратора солнечного излучения с площадью 1 м^2 и соответственно максимальная мощность концентрированного потока солнечного излучения (мощность накачки) предполагалась равной 1 кВт. Длина резонатора 1 м, коэффициент отражения выходного зеркала $R_2=0.95$. Мощность накачки варьировалась в пределах 0-1000 Вт, а концентрация ионов Cr^{4+} в пределах $0-1.0 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Проводилось исследование влияния концентраций ионов Cr^{4+} на выходные параметры лазерного излучения, при различных уровнях накачки. Изучались зависимости формы и длительности, частоты повторения, а также ам-

плитуды генерируемых импульсов от концентрации примесных ионов при различных уровнях накачки с концентрированным потоком солнечного излучения.

Наблюдалось монотонное уменьшение длительности импульсов с увеличением мощности накачки, в то время как увеличивались пиковая интенсивность импульса I_{max} и частота повторения импульсов.

Показано, что присутствие ионов Cr^{4+} с концентрацией $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в рассмотренных активных элементах приводит к модуляции добротности резонатора лазеров с солнечной накачкой и в зависимости от концентрации и мощности накачки позволяет генерировать последовательность различных импульсов в наносекундном диапазоне.

Генерация пикосекундных импульсов. Данный раздел посвящен исследованию нелинейных свойств кристаллов GaAs и возможности их применения для генерации пикосекундных импульсов в лазерах с солнечной накачкой.

Проведены экспериментальные исследования нелинейно-оптических свойств кристаллов GaAs методом z-сканирования. Выявлено, что при длительном облучении кристалла GaAs лазерными импульсами образуются дефекты и наблюдается существенное увеличение свойства насыщающегося поглощения кристалла. Наблюдалось увеличение (>10 раз) концентрации дефектов в кристалле GaAs при длительном ($>10^4$ выстрелов) облучении лазерными импульсами ($\tau = 35$ пс, $\lambda = 1.064$ мкм) около порога разрушения. Отметим, что полученные таким способом насыщающие поглотители могут быть успешно применены для синхронизации мод в твердотельных и других лазерах.

Исследована возможность использования кристалла GaAs одновременно как элемента нелинейной отрицательной обратной связи (ООС), так и насыщающегося поглотителя. Преимущества такого совмещения очевидно: в этом случае конструкция импульсного лазера существенно упрощается, и могла бы состоять из активного элемента, кристалла GaAs и резонатора. Для решения задачи проведены численные эксперименты на компьютерной модели лазерной установки. Исследованы процесс формирования одиночного импульса из непрерывного потока излучения, динамика временных и энергетических характеристик сформированного одиночного импульса при проходе через отдельные элементы резонатора, с учетом времени релаксации свободных носителей в GaAs. Выявлено, что кристалл GaAs при оптимальных значениях концентрации и толщины может одновременно выполнять функции элемента ООС и просветляющегося фильтра и в комбинации с телескопом позволяет получать цуги ультракоротких (пикосекундных) импульсов со стабильными амплитудами без применения дополнительных элементов управления добротности резонатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Впервые создан лазер с накачкой концентрированным потоком солнечного излучения большой солнечной печи института материаловедения НПО «Физика-солнце».

2. Создана новая статистическая модель лазера, накачиваемого сконцентрированным потоком солнечного излучения, основанная на прослеживании одиночных фотонов и моделирования элементарных процессов (многократные отражения и преломления, поглощения и эмиссия) методом Монте-Карло, позволяющая проводить расчеты для различной конфигурации солнечного лазера и формы активного элемента (стрержневой и дисковой геометрии, композитные).

3. Показана возможность количественной характеристики термических эффектов в рамках разработанной статистической модели: выведены аналитические выражения, описывающие термически наведенного линзового эффекта, и разработана методика их расчетов. Установлены предельные тепловые нагрузки на активные элементы для эффективной работы лазеров.

4. Предложено конструкторское решение проблем двукратно активированных активных элементов Nd:Cr:YAG и Nd:Cr:GSGG, связанных с термическими эффектами, препятствующими созданию на их основе высокоэффективных лазеров с солнечной накачкой.

5. Впервые теоретически показана возможность эффективного преобразования энергии концентрированного потока солнечного излучения в энергию лазерного излучения, на малых параболических концентраторах и на линзах Френеля.

6. Предложена новая концепция для эффективного преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения, основанная на использовании внешних частотных преобразователей для преобразования частоты большого количества не поглощенных солнечных фотонов при накачке лазеров.

7. Основными преимуществами предложенной концепции является пониженные тепловые нагрузки на активную среду, возможность использования различных материалов для активной среды и преобразователя частоты, менее жесткие требования к тепловым свойствам (тепло-наведенное двойное лучепреломление, эффект линзы) преобразователя частоты, а также возможность независимого регулирования температуры в активной среде и преобразователе частоты.

8. Теоретически показано, что для генерации наносекундных импульсов при солнечной накачке можно использовать пассивные затворы на основе $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$, а для пикосекундных импульсов кристаллы GaAs.

9. Показаны возможность создания лазеров с солнечной накачкой с модуляцией добротности и пассивной синхронизацией мод на основе лазерных материалов $\text{Nd}^{3+}:\text{Cr}^{3+}:\text{GSGG}$ и $\text{Nd}^{3+}:\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$ с примесными ионами Cr^{4+} и

возможность генерации последовательности импульсов в наносекундном диапазоне.

10. Впервые экспериментально показана возможность увеличения концентрации дефектов в кристалле GaAs при длительном допороговом (ниже интенсивности порога разрушения) облучении импульсным лазерным излучением.

11. Впервые теоретически показана возможность использования кристалла GaAs одновременно как насыщающего поглотителя и элемента отрицательной обратной связи в твердотельных лазерах. Установлено, что при соответствующей концентрации дефектных уровней, возможно осуществление как нелинейную ООС, так и насыщающее поглощение и генерация импульсов в пикосекундном диапазоне.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFIC DEGREES
DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 AT PHYSICOTECHNICAL INSTITUTE,
INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES,
SAMAKAND STATE UNIVERSITY**

INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

PAYZIYEV SHERMAKHAMAT DALIYEVICH

SOLAR PUMPED SOLID STATE NEODIMIUM LASERS

01.04.11 – Laser physics

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

TASHKENT – 2017

The theme of doctoral dissertation (DSc) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.2.DSc/FM52

Dissertation has been prepared at Institute of Ion-plasma and laser technologies.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of scientific council (<http://fti-kengash.uz/>) and on Information and educational portal "ZiyoNet" (<http://www.ziynet.uz/>).

Scientific consultant:

Sagdilla Bakhramov
doctor of physical and mathematical sciences, professor

Official opponents:

Mukhsin Fshurov
doctor of physical and mathematical sciences, academician

Mumin Kodirov
doctor of physical and mathematical sciences

Sherzod Nematov
doctor of physical and mathematical sciences

Leading organization:

Uzbekistan National University

Defense will take place « ____ » _____ 2017 at _____ at the meeting of Scientific council number DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 at Physicotechnical Institute, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Samarkand State University (Address: 100084, 2b, Bodomzor yoli str., Tashkent city, Uzbekistan. Phone: (99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net, Meeting Room of Physicotechnical Institute).

Doctoral dissertation is possible to review at Information-resource centre at Physicotechnical Institute (is registered № _____) (Address: 100084, 2b, Bodomzor yoli str., Tashkent city, Uzbekistan. Phone: (99871) 235-42-91).

Abstract of dissertation sent out on « ____ » _____ 2017.

(mailing report № _____ on « ____ » _____ 2017).

S.L.Lutpullaev

Chairman of scientific council on award of scientific degrees, doctor of sciences in physics and mathematics, professor

A.V.Karimov

Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, doctor of sciences in physics and mathematics, professor

S.S.Kurbanov

Chairman of scientific seminar under scientific council on award of scientific degrees, doctor of sciences in physics and mathematics

INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

Topicality and necessity of the thesis. Solar pumped lasers are devices that transform a broadband sunlight into the coherent, monochromatic and directional radiation. However, maximum efficiency of transformation of sunlight into the laser radiation still remains at a level below 4%. In this connection development and creation of new highly effective lasers with solar pumping is one of the extremely topical problems of a global scale. Research and revealing of new ways of increasing the efficiency of lasers with solar pumping on the basis of last achievements in the field of materials technology and in other areas of state-of-the-art science represents the important scientific and practical tasks and substantiates the relevance of the dissertation subject.

Relevant research priority areas of science and developing technologies of the Republic. 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.

A review of international research on the topic of dissertation. Active research works on research and development of effective ways of transformation of a sunlight in laser radiation are carried out at leading research centers of developed countries, universities and scientific research institutes, such as Institute for Laser Technology (Japan), National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics (Romania) Tokyo Institute of Technology (Japan), Ben-Gurion University of the Negev (Israel), Institute of Laser Engineering, Osaka University (Japan), Minia University (Egypt), Physics and power institute (Russia), Universidade Nova de Lisboa (Portugal), PROMES-CNRS (France), National Research Institute of Astronomy and Geophysics (Egypt), Weizmann Institute of Science (Israel), Technical University of Berlin (Germany) .

Problem development status. The main problem of transformation of energy of sunlight into the energy of laser radiation that needs to be solved today is very low efficiency of lasers with solar pumping.

Relevance of the dissertation research to the plans of scientific-research works. The research presented in the dissertation is carried out in accordance with the approved research work plans of the Institute of Ion-plasma and laser technologies in the framework of the Republic of Uzbekistan State Research and Development Programs.

The aim of research work is revealing the effective ways of transformation of solar energy into the energy of laser radiation by studying the physical processes, taking place in solar pumped laser systems, with taking into account of optical, thermal and mechanical properties of the solid-state laser active mediums.

Tasks of research work are researches on possibility of creation the effective lasers on the basis of various active mediums including composite laser materials.

The object of research are solid-state neodymium containing active mediums, concentrating systems of solar light, laser cavities.

The subject of research –physical processes such as multiple reflection and refraction, absorption, emission, energy transfer between sensitizing and active ions, and lasing processes in different active mediums at pumping by broadband solar spectrum.

Methods of the research: the methods that have been based on numerical modeling of random processes occurring in laser system taking into account the spectral characteristics of the active mediums and sunlight.

Scientific novelty of the research work consists in the following results:

New procedures of modeling processes of multiple reflection and refraction, absorption, and emission that have been based on tracing of single photons without any weight factors instead of usually used photon packages;

For the first time it is created the experimental laser on the big solar furnace and laser power of 80W is obtained;

For the first time new alternative approach that based on the use of external frequency converters of solar spectrum is proposed and the opportunity of increasing the pumping efficiency of Nd:YAG lasers up to 30-32% is shown;

Practical results of research work is proposed approach based on the use of external frequency converters of solar spectrum can allow creating high-efficient solar pumped lasers, and also developing new solar laser technologies.

Authenticity of the obtained results is proved by application of the modern methods and approaches of optics and laser physics. Deductions set up on the basic provisions of theoretical works devoted to studying of physical mechanisms of elementary processes, occurring in laser mediums, and are completely in conformity with results of other authors.

Scientific and practical value of the research results. The scientific significance of research results of the present dissertation consists in the proposed new concept based on the use of external frequency converters of solar spectrum and the use of the developed model of lasers for conducting theoretical researches.

The practical significance of research results consists in the point that the proposed scientific and technical solutions can be applied for developing and creating the new effective technologies based on utilization of renewable energy sources.

Implementation of the research results. On the basis of research results the laser on the big solar furnace has been developed for the first time in the world and it can be used in scientific and other purposes. The developed model and the approaches used in it are already applying into the field of science and education.

Approbation of the research results. Results of the research work have been discussed at 10 international and republican scientific and practical conferences.

Publication of the results. The main results of the dissertation have been published in 18 articles, including 14 in international, 4 in republican peer-reviewed journals, as well as 10 in the materials of international and republican conferences.

Structure and volume of dissertation. Dissertation consists of introduction, five chapters, conclusion and a list of references. The dissertation contains 180 pages of printed text including figures and tables.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ

I бўлим (I часть; part I)

1. A new approach in solar-to-laser power conversion based on the use of external solar spectrum frequency converters Sh. Payziyev and Kh. Makhmudov J. Renewable Sustainable Energy 8, 015902 (2016). [№ 3. Scopus, IF: 1.23] <http://dx.doi.org/10.1063/1.4939505>
2. « Transformation of concentrated sunlight into laser radiation on small parabolic concentrators », Sh. Payziyev S. Bakhramov, and A. Kasimov, Journal Renewable Sustainable Energy 3, 053102 (2011). [№ 3.Scopus, IF: 2.19] http://jrse.aip.org/resource/1/jrsebh/v3/i5/p053102_s1
3. Feasibility of creation of ceramic disk laser pumped by concentrated solar flux of big solar furnace S. Bakhramov, Sh. Payziyev and A. Kasimov J. Renewable Sustainable Energy 1, 063103 (2009). [№ 3. Scopus, IF: 1.68] http://jrse.aip.org/resource/1/jrsebh/v1/i6/p063103_s1
4. On the possibility of using a semiconductor crystal as a saturable absorber and a negative feedback element Bakhramov S.A.; Kasimov A.K.; Paiziev Sh.D.; Paizieva D.E. Optics and Spectroscopy, 2004, Vol. 96, p. 454-457. [№ 3. Scopus, IF: 0.46]
5. Formation of Defects in a GaAs Crystal under the Action of Picosecond Laser Radiation near the Optical Damage Threshold, Bakhramov S.A. and Paiziev Sh.D. Optics and Spectroscopy, Vol. 100, No. 3, 2006, p. 400. [№ 3. Scopus, IF: 0.42]
6. Thermal Lens Effect in Solar-Pumped High-Power Solid-State Lasers, Bakhramov S.A., Paiziev Sh.D., Klychev Sh.I., Kasimov A.K., Tatarin O.V., Abdurakhmanov A. and Fazilov A., Applied Solar Energy, 2007, Vol. 43, No. 3, pp. 158–160. [01.00.00, № 3, IF: 0.08]
7. On Possibility of Using of Nd:Glass Laser Materials for Pumping on BSF SPA “Physics–Sun” Bakhramov S., Payziyev Sh., Klychev Sh., Kasimov A., Abdurakhmanov A. and Fazilov A. Applied Solar Energy, 2007, Vol. 43, No. 2, p. 106. [01.00.00, № 3, IF: 0.08]
8. Lasers on the Big Solar Concentrators. Bakhramov S.A., Paiziev S.D., Klychev S.I., Kasimov A.K., Abdurakhmanov A.A., Applied solar energy 2005, vol. 41 no: 3, p.47-53. [01.00.00, № 3]
9. Solar pumped lasers, Payziyev Sh., Bakhramov S., Klichev Sh., Kasimov A., Uzbek journal Problems of energy and sources savings(special issue), pp. 88-91, 2011
10. Semiconductors as a saturable absorber and a negative feedback element in solid state lasers. Bakhramov S.A., Kasimov A.K., Payziyev Sh.D., Payziyeva D.E.. Uzbek Journal of Physics, 2004, Vol. 6, Number 3, pp.168-176. [01.00.00, № 5]
11. Бахрамов С.А., Пайзиев Ш.Д., Шайимов Ф.Ф. Исследование возможности создания Nd:Cr:GSGG дискового лазера с солнечной накачкой. УФЖ, 2013, т. 15, № 5-6, с.270-276. [01.00.00, № 5]

12. Payziyev Sh. D., Bakhramov S. A., Shayimov F. F., Fayziev A.Sh. Effect of Cr^{4+} impurities in Nd:Cr:GSGG and Nd:Cr:YAG laser materials on parameters of lasers at solar pumping. Uzbek Journal of Physics, 2015, V.17. № 4. С. 254-260. [01.00.00, № 5]
13. Ceramic $\text{Nd}^{3+}:\text{Cr}^{3+}$: YAG laser pumped by high power concentrated solar flux. Payziyev Sh., Bakhramov S., Yagi H., Abdurakhmanov A. and Fazilov A., Proc. SPIE 6871, 68712G (2008) Full Text: [PDF (240 kB)] (8 pages). [01.00.00, № 16, IF: 0.42]
14. Big solar furnace as pumping source for high power lasers Payziyev Sh., Bakhramov S., Klichev Sh., Kasimov A., Riskiev T., Abdurakhmanov A. and Fazilov A. Proc. SPIE 6871, 68712E (2008) Full Text: [PDF (246 kB)] (8 pages). [01.00.00, № 16, IF: 0.42]
15. Two-stage concentrating systems for pumping of solar lasers Klichev Sh., Bakhramov S., Abdurakhmanov A., Fazilov A., Payziyev Sh., Ismanjanov A., Bokoev K., Dudko J. and Klichev Z., Proc. SPIE 6871, 68712U (2008) Full Text: [PDF (283kB)] (7 pages). [01.00.00, № 16, IF: 0.42]
16. Thermal lensing in high power solar pumped solid state lasers Bakhramov S., Payziyev Sh., Klychev Sh., Kasimov A., Abdurakhmanov A. and Fazilov A. Proc. SPIE 6552, 655218 (2007) Full Text: [PDF (292 kB)] (7 pages). [01.00.00, № 16, IF: 0.40]
17. Laser induced defect formation in GaAs near the optical breakdown threshold. Bakhramov S.A. and Payziyev Sh.D. Proc. SPIE 6259, 625908 (2006) Full Text: [PDF (171 kB)] (5 pages). [01.00.00, № 16, IF: 0.46]
18. Influence of two-photon absorption in GaAs crystals on nonlinear optical feedback. Bakhramov S.A., Paiziev Sh.D. and Karimov F.R. Proc. SPIE 3485, 445 (1998) Full Text: [PDF (692 kB)] (5 pages). [01.00.00, № 16, IF: 0.32]

II бўлим (II часть; part II)

19. Bakhramov S., Payziyev Sh., Klychev Sh., Kasimov A., Abdurakhmanov A. Laser on the big solar concentrator, Second International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, Crimea, Ukraine, 12-17 September 2005, Proceedings of CAOL 2005, Volume: 1, pp.109-111
20. Bakhramov S., Payziyev Sh., Kasimov A. and Payziyeva D. Computer Simulation of a Laser with Mode-Locking and Nonlinear Negative Feedback on GaAs Crystal, DOI: 10.1109/LFNM.2006.252065, 8-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, Kharkiv, Ukraine, 29 June - 1 July 2006, LFNM. 2006, pp.363-365
21. Бахрамов С.А., Пайзиев Ш.Д., Клычев Ш.И., Касимов А.К., Абдурахманов А.А., Фазилов А. Лазеры на больших солнечных концентраторах // Труды конференции "Фундаментальные и прикладные вопросы физики" Ташкент, 2004г., стр. 122.
22. Бахрамов С.А., Клычев Ш.И., Пайзиев Ш.Д., Касимов А.К., Абдурахманов А.А., Татарин О.В., Пайзиева Д.Э., Дудко Ю.А. О возможности использования концентрированного потока солнечного излучения БСП

- НПО «Физика-солнце» для накачки лазеров // Материалы конференции «Физика в Узбекистане», Ташкент, 2005 стр.131.
23. Пайзиев Ш.Д. Компьютерное моделирование твердотельных лазеров с солнечной накачкой // Материалы конференции «Физика в Узбекистане», Ташкент, 2005 стр.148.
 24. Бахрамов С.А., Пайзиев Ш.Д., Клычев Ш.И., Касимов А.К., Абдурахманов А.А., Татарин О.В., Пайзиева Д.Э., Дудко Ю.А. Лазеры с накачкой концентрированным потоком солнечного излучения БСП НПО «Физика-Солнце» // IV конференция по Физической Электронике. Ташкент, 2005, стр.160.
 25. Бахрамов С.А., Пайзиев Ш.Д., Касимов А.К. Преобразование концентрированного солнечного излучения в излучение лазера на малых параболических концентраторах // Республиканская конференция UzPES, Ташкент, 2009, стр.133.
 26. Bakhramov S., Payziyev Sh., Kasimov A., “Solar pumped Nd:Cr:YAG laser on small parabolic concentrators” // Республиканская конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», Ташкент, 2010, стр.424.
 27. Bakhramov S., Payziyev Sh., Kasimov A. “High efficient solar pumped Nd:Cr:YAG laser on small parabolic concentrators”, The 9th Joint Uzbek-Korea Symposium: NANOSCIENCE: Problems and Prospects, Quantum Functional Materials and Devices, Tashkent, November 2-5, 2010, p.24.
 28. Payziyev Sh., Bakhramov S., Makhmudov Kh. and Shayimov F. «End pumped Cerium codoped Nd:yag solar laser», International conference “Fundamental and Applied Problems of Physics”, Tashkent, Uzbekistan, November 5-6, 2015, pp.243-246

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали таҳририятида
таҳрирдан ўтказилди (10.10.2017 йил)

Бичими 60x84¹/₁₆. Ризограф босма усули. Times гарнитураси.
Шартли босма табағи: 3,75. Адади 100. Буюртма № 20.
“ЎзР Фанлар Академияси Асосий кутубхонаси” босмахонасида чоп этилган
Босмахона манзили: 100170, Токент ш., Зиёлилар кўчаси, 13-уй.