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

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

ШЕРНИЁЗОВ АНВАРЖОН АХМЕДЖОНОВИЧ

ФРЕНЕЛ ЛИНЗАСИ АСОСИДАГИ ҚУЁШ НУРИДА ИШЛАЙДИГАН ЛАЗЕРЛАР

01.04.11. –Лазер физикаси

ДИССЕРТАЦИЯ АВТОРЕФЕРАТИ
ФИЗИКА ВА МАТЕМАТИКА ФАЛСАФАСИ ДОКТОРЛАРИ (PhD)

Ташкент – 2021

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2020.4.PhD/FM552.

Диссертация выполнена в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета по адресу www.iplt.uz и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу www.ziyonet.uz.

Научный руководитель:	**Пайзиев Шермахамат Далиевич** доктор физико-математических наук, снс
Официальные оппоненты:	**Давлетов Икром Юсубович** доктор физико-математических наук, доцент
	Азаматов Закир Тахирович доктор физико-математических наук, профессор
Ведущая организация:	**Ташкентский Государственный Технический Университет**

Защита диссертации состоится «21» сентября 2021 г. в 14^{00} часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий по адресу: 100125, г.Ташкент, ул.Дурмон йули, 33. Тел./Факс: (+99871) 262-32-54, e-mail:info@iplt.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ионно-плазменных и лазерных технологий (зарегистрирована за № 9), по адресу: 100125, г.Ташкент, ул.Дурмон йули, 33. Тел.: (+99871) 262-31-69.

Автореферат диссертации разослан «08» сентября 2021 года.

(реестр протокола рассылки 9 от «08» сентября 2021 года).

Х.Б. Ашуров
Председателя научного совета по присуждению учёных степеней, д.т.н., профессор

И.Д. Ядгаров
Учёный секретарь научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник

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

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Экологик тоза қуёш энергиясидан самарали фойдаланиш ҳозирги кунда дунёнинг энг муҳим муаммоларидан бири ҳисобланади. Қуёш энергиясидан фойдаланишнинг истиқболли йўналишларидан бири уни лазер энергиясига айлантиришдир. Шу муносабат билан, қуёш нурланишининг кенг полосали спектридаги энергияни монохроматик лазер нурланишининг энергиясига самарали айлантириш имконини берувчи, маълум физик хусусиятларга эга бўлган янги фаол муҳитни аниқлаш ва шу билан ушбу фаол муҳитларининг ишлашида пайдо бўладиган салбий иссиқлик таъсирининг олдини олиш билан боғлиқ муаммолар ва вазифалар жуда долзарбдир.

Дунёнинг кўплаб ихтисослашган илмий марказларида ушбу муаммоларни ҳал қилиш учун турли лазерли фаол муҳитларнинг хусусиятлари, қўшимча равишда оптик материаллардан фойдаланиш орқали қуёш нури спектрини олдиндан ўзгартириб қуёш энергиясини лазер нурланиш энергиясига самарали айлантириш имкониятлари соҳасида тадқиқотлар олиб борилмоқда.

Сўнгги пайтларда, Ўзбекистон Республикасида қуёш энергиясидан самарали фойдаланишнинг, хусусан, уни юқори иссиқлик, механик ва бошқа физикавий хусусиятларга эга бўлган янги керамик ва композит оптик материаллар асосида монохроматик когерент нурланишга айлантиришнинг янги имкониятларни ўрганишга эътибор кучаймоқда, шунингдек, қуёш энергиясини тўғридан-тўғри лазер энергиясига айлантириш самарадорлигини оширишга қаратилган сенсибилизация узатиш жараёнлари физикасининг долзарб масалалари бўйича тадқиқотлар ва инновацион ишлар олиб борилмоқда. Мамлакатимиз илмини ривожлантириш учун катта аҳамиятга эга бўлган бу фундаментал тадқиқотларнинг ва ишланмаларнинг йўналишлари, ҳамда уларнинг амалий қўлланилиши 2017–2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида[1] акс эттирилган.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида» ги Фармонида 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 Қарорида ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республикада фан ва технологияларни ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мослиги. Тадқиқот ишлари Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияларини ривожлантиришнинг устувор

[1] 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947 – сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси» тўғрисидаги Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони.

йўналишларига мувофиқ олиб борилди: ППИ-4 "Қайта тикланадиган энергия манбаларидан фойдаланиш усулларини ишлаб чиқиш, нанотехнология, фотоника ва технологиялар асосида қурилмалар яратиш бошқа илғор технологиялар".

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Турли хил хорижий илмий марказларда ушбу мавзу бўйича бир қатор муҳим илмий тадқиқотлар ўтказилди, шу жумладан қуёш нури билан ишлайдиган лазерларнинг чиқиш параметрлари ва иссиқлик хусусиятларини яхшилаш учун турли хил конфигурацияларнинг конверсион самарадорлигини баҳолаш. Бу соҳадаги энг муҳим натижаларга чет эл олимлари эришдилар, масалан, португалияликлар (D. Liang, H. Costa, J. Almeida, D. Garcia, M. Catela, B.D. Tibúrcio, C.R. Vistas, E. Guillot) япон (Masamori Endo ,Taizo Masuda, Mitsuhiro Iyoda, Yuta Yasumatsu, Yabe Takashi, Kunio Yoshida, Shigeaki Uchida, Ikesue Akio, Kiichiro Kamata,), канадалик (Jean-Francois Bisson), Исроил (Nechayev, Sergey, Carmel Rotschild, V. Krupkin, Y. Kagan, A. Yogev) немис (Stephan Dottermusch, Ian A. Howard, Bryce S. Richards) ва бошқалар, шунингдек, мамлакатимиз олимлари (Ш. Д. Пайзиев, С. А Бахрамов, Ш.И. Клычев, А. Фазилов, Х.М.Махмудов, А.К.Қосимов, Ф. Ф.Шайимов).

Yabe Takashi бошчилигидаги япон олимлари Nd:YAG асосидаги фаол муҳитга эга бўлган лазерда юзаси 4 $м^2$ Френел линзалари ёрдамида 120 Вт қувватли лазер қувватига эга бўлишди.

D. Liang ва унинг ҳамкасблари Nd:Cr:YAG асосидаги фаол муҳитга эга лазерда қуёш энергиясини лазер энергиясига айлантиришнинг энг юқори самарадорлигини қўлга киритдилар, бу 6.7% ни ташкил қилади.

Ўзбекистон олимлари, академик С.А. Бахрамов, Ш.Д.Пайзиев, Ш.И.Клычев, А.Фазилов, А.К.Қосимов ва бошқалар биринчилардан бўлиб, катта қуёш печидан фойдаланиб қуёш лазери қурилмасини яратдилар, бунда битта кристаллдан 80 Вт лазер қуввати олинган бўлиб, йирик қуёш концентраторларида лазер генерацияси олиш имконияти кўрсатилди. Пайзиев Ш.Д. гуруҳи томонидан ташқи сенсибилловчи воситалардан фойдаланишга асосланган янги концепция таклиф қилинди, бу қуёш лазерларининг конверсион самарадорлигини бир неча бор ошириш имконини беради. Ҳ.М. Махмудовнинг симуляция усули турли хил фаол воситалар, масалан, Александрит, Ti^{3+}:Сапфир, Nd:YAG ва Ce: Nd:YAG каби юқори самарали қуёш лазерларни Cr3+:YAG, Cr3+: GSGG, Cr3+:YSGG, Cr3+:LICAF, Cr3+:LISAF, Ti3+:Сапфир асосидаги сенсибилизаторлар ёрдамида яратиш имкониятларини ўрганиб чиқди ва намойиш этди.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.

Диссертация иши Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг қуйидаги лойиҳалари доирасида амалга оширилди: ОТ-Ф3-10 “Қуёш энергиясини лазер нури энергиясига айлантириш жараёнларининг физик асосларини тадқиқ этиш ва ривожлантириш” (2017-2020), ФА-Атех-2018-16 “Френел линзасида қуёш билан накачка қилинадиган лазерни ишлаб чиқиш ва яратиш” (2018-2020).

Тадқиқотнинг мақсади - Френел линзаси асосидаги концентраторлардан фойдаланиб қуёш энергиясини лазер энергиясига айлантириш самарадорлигини оширишга тўсқинлик қилувчи асосий омилларни аниқлаш ва Френел линзасига асосланган қуёш концетраторлари базасида юқори самарадорликка эга бўлган лазер қурилмаларини ишлаб чиқиш ва яратиш бўйича ечимлар таклиф қилиш.

Тадқиқот вазифалари:

- Френел линзалари асосидаги қуёш концентратори марказида концентрланган қуёш нурланиши билан дамланадиган лазернинг компютер моделини яратиш;
- ясси Френел линзаси фокусининг тузилишига ва ўлчамларига таъсирини симуляция усули ёрдамида ўрганиш;
- симуляция усули билан Френел линзаси асосидаги лазернинг турли хил конструкцияларини ўрганиш ва диаметри 1м бўлган Френел линзаси асосидаги қуёш нурланишини лазер нурланишига самарали айлантрадиган лазер системаларининг оптимал параметрларини аниқлаш;
- Френел линзаси билан Nd:YAG қуёш лазерларида кўп-ўтишли кўндаланг оптик дамлаш схемасини симуляцион ўрганиш;
- Френел линзалари асосида концентрацион тизим учун ретро-рефлекторли оптик дамлаш камерасининг прототипини ишлаб чиқариш ва ясаш;
- консентрланган қуёш нурлари билан ёритилган бир хил ўлчамдаги Nd:YAG ва Ce:Nd:YAG люминесенсия спектрларини эксперимантал ўрганиш.
- тўрт-сатҳли қуёш билан оптик дамланган лазернинг актив муҳитида юқори даражадаги термал стресс мавжуд бўлган ҳолатларда сатҳлар термал инверсбандликнинг лазер хусусиятларига таъсирини ўрганиш учун рақамли ва аналитик моделни ишлаб чиқиш;
- Ce:Nd:YAG ва Nd:YAG асосидаги қуёш лазерлари ишчи сатҳларининг термал инверсбандлигининг чиқиш хусусиятларига таъсирини назарий ўрганиш.

Тадқиқот объекти - қаттиқ ҳолатдаги неодимли лазер фаол муҳитлар, сенсибилизаторлар, Френел линзалари асосидаги концентраторлар ва лазер резонаторлари ҳамда ҳар хил турдаги қуёш энергияси конверторлари моделлари.

Тадқиқот предмети - Қуёш фотонларининг лазер фаол муҳити ва сенсибилизатор билан ўзаро таъсирланишидаги физик жараёнлари, фотонларнинг фаол муҳитда ютилиши, люминесценция, сенсибилизатор ионларидан фаол ионларга энергия узатилиши, қуёш нурланишининг кенг полосали спектри билан оптик дамланган турли фаол муҳитларда лазер нурланишини ҳосил қилиш жараёни.

Тадқиқот усуллари. Диссертация ишида, фаол муҳит ва қуёш нурланишининг спектрал хусусиятлари ҳисобга олинган лазер тизимларида содир бўладиган тасодифий жараёнларни симуляция қилишга асосланган усуллар қўлланилади. Симуляция модели Монте-Карло ва фотонларнинг геометрик изини кузатиш усулларидан фойдаланишга асосланган. Тажрибаларда ишлатилган замонавий асбоблар ва ускуналар: ишлатилган

оптик элементларнинг параметрларини аниқлаш учун 100 мВт қувватга эга диод билан оптик дамланган Nd:YAG лазери, текислаш/созлаш учун гелий неон лазерлари, S212 қувват ўлчагич, Thorlabs визуализаторлари, рақамли осциллограф ва юқори ажратишли HR4000 спектрометри.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагича:

- консентрланган қуёш нурланишини самарали конвертация қилиш учун диаметри 1 м бўлган Френел линзасига асосланган лазернинг оптимал параметрлари аниқланди;

- Френел линзаси ясашда ишлатилган материалнинг дисперсияси туфайли фокал соҳа (доғ) кенгайиб, амалий фокус масофасининг силжиши аниқланди;

- оптик дамлаш тақсимотининг бир хиллигини таъминлаш учун шаффоф параллелипепед шаклидаги эритиб қуйилган оддий гомогенизатордан фойдаланиш мумкинлиги топилди;

- Френел линзалари асосидаги Nd:YAG қуёш лазерларида кўп-ўтишли кўндаланг оптик дамлаш схемаси ишлатилганда одатда ишлатиладиган бир-ўтишли оптик дамлаш схемасига нисбатан оптик дамлаш самарадорлиги икки марта ошиши мумкинлиги кўрсатилди;

- Ce:Nd:YAG концентрланган қуёш нурланиши билан ёритилган пайтида 1064 нм атрофида неодимнинг люминесценция интенсивлиги худди шу шароитда Nd:YAG нинг люминесценция интенсивлигидан 1,5 баравар юқори эканлиги экспериментал равишда аниқланди. Бу натижа қуёш, LED ёки лампа билан оптик дамланганда Ce ионлари Nd:YAG учун энг яхши сенсибилизаторлардан бири эканини тасдиқлайди;

- юқори даражадаги иссиқлик юки мавжуд бўлганда тўрт сатҳли қуёш билан оптик дамланган лазерларда сатҳининг термал инвербандликнинг лазер хусусиятларига таъсирини ўрганиш учун фазога боғлиқ тезлик тенгламаларини қўллаган ҳолда қуёш билан ишлайдиган лазерлар учун аналитик модел ишлаб чиқилди;

- Ce:Nd:YAG асосида ишлайдиган қуёш лазерининг ишчи сатҳларидаги термал инвербандлик унинг чиқиш қуватига таъсири етарлича катта экани аниқлади, ҳато бу чиқиш қуватини тўлиқ йўқ қилиши ҳам мумкин экани кузатилди.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагича:

Қуёш нури билан оптик дамланадиган лазерлардаги физик жараёнларни моделлаштириш учун ишлаб чиқилган усуллар қуёш ёрдамида оптик дамланадиган, шунингдек лампа ёки диод ёрдамида дамланадиган янги лазер тизимларининг моделларини ишлаб чиқишда ва яратишда қўлланилиши мумкин. Қуёш спектрини ўзгартиришда ташқи частота конверторларидан фойдаланишга асосланган таклиф қилинаётган ёндашув юқори конверсион самарадорликка эга қуёш лазерларини яратишга, шунингдек янги қуёш лазер технологияларини ривожлантиришга имкон беради.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги оптик ва лазер физикасининг замонавий усуллари ва ёндашувларидан фойдаланиши билан асосланади. Хулосалар лазерли муҳитда юзага келадиган бирламчи жараёнларнинг физик механизмларини ўрганишга бағишланган назарий ишларнинг асосий

қоидаларига асосланади ва бошқа муаллифларнинг натижаларига тўлиқ мос келади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Ушбу диссертация тадқиқотлари натижаларининг илмий аҳамияти шундаки, тўрт сатҳли қуёш лазерларидаги лазер сатҳларининг термик бандлиги таъсирини тадқиқ этиш учун қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерлар учун янги модел таклиф этилган, таклиф этилган модел қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерлар самарадорлигини сезиларли даражада ошириш, ишлаб чиқилган моделдан назарий тадқиқотлар олиб боришда фойдаланиш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундаки, таклиф қилинаётган илмий ва техник ечимлардан қуёш энергиясидан фойдаланишга асосланган янги самарали технологияларни ишлаб чиқиш ва яратиш учун фойдаланиш мумкин.

Тадқиқот натижаларини амалга ошириш.

Nd:YAG ва Ce:Nd:YAG лазер фаол муҳитларининг люминесцент, иссиқлик хусусиятлари ва генерацион характеристикаларини комплекс ўрганиш асосида қуёш нурини лазер нурига самарали айлантирувчи конверторларни ишлаб чиқиш амалга оширилди:

Диссертацияси доирасида бажарилган илмий ишлар асосида ишлаб чиқилган лазер тизими ичида содир бўладиган физик жараёнларни моделлаштришда олинган натижалар ЎзР ФА Конструкторлик бюро ва Тажриба ишлаб чикиш Илмий техник марказида техника фанлар доктори Ш. И. Кличев раҳбарлигида 2017-2020 йилларда олиб борилган ОТ-Ф3-14 “Ялпоқли қуёш коллекторлар ва қуёш коллектор-бак аккумулятор тизимларнинг каналларидаги конвектив жараёнларини ўрганиш” номли фундаментал лойиҳа илмий-техникавий вазифаларни бажаришда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг 2021 йил 27 июл № 2/1255-2109-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш биринчи марта қуёш коллекторларининг ярим шаффоф иссиқлик ташувчиларида ҳажмий ютилиши жараёнида иссиқликка айлантриш самарадорлигини баҳолаш имконини берди;

Диссертацияси доирасида бажарилган илмий ишлар натижалари асосида ишлаб чиқилган лазер тизими ичида содир бўладиган физик жараёнларни модели ва дастурий таъминот «Фотонларни статистик трассировкалаш алгаритми» (№ DGU 07182, 2019й.) ЎзР ФА “Физика-Қуёш” ИИЧБ Материалшунослик институтида т.ф.д. М. С. Пайзуллаханов раҳбарлигида 2017-2020 йилларда олиб борилган № ПФИ ФИ ФА-Ф-3-02 “Мужассамлашган қуёш нурлари ва магнит индукцияси оқимида синтез қилинган барий, стронций ва висмут ферритлари ассосида магнит материалларнинг тузилиши ва хусусиятларини ўрганиш” номли фундаментал лойиҳа илмий-техникавий вазифаларни бажаришда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг 2021 йил 25 январдаги № 2/1255-215-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш олинган материалнинг дисперсиясига кучли таъсир этувчи эритманинг совиш тезлиги уни амалга ошириш усулига боғлиқ бўлишини аниқлаш имконини берди.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг натижалари 4 та халқаро ва республика конференцияларида маъруза қилинди ва муҳокама қилинди.

Тадқиқот натижаларини нашр этиш. Диссертация мавзуси бўйича олинган натижалар 9 та илмий ишда, шу жумладан диссертацияларнинг асосий илмий натижаларини нашр қилиш учун Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси томонидан тавсия этилган журналларда чоп этилган 4 та мақолада ва 1 та рўйхатдан ўтганлик тўғрисидаги гувоҳнома билан ҳимояланган дастурий маҳсулот келтирилган.

Диссертациянинг таркиби ва ҳажми. Диссертация кириш, тўрт боб, хулоса ва библиографиядан иборат. Диссертация матни 97 бетда тақдим этилган ва 47 расмга эга.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Диссертациянинг кириш қисмида иш мавзусининг долзарблиги ва зарурияти асосланган, унинг мақсади ва вазифалари шакллантирилган, тадқиқот объекти, предмети ва усуллари белгиланган, шунингдек тадқиқотларнинг Ўзбекистон Республикаси илмий-техника тараққиётининг устувор йўналишлари билан ўзаро боғлиқлиги белгиланган, тадқиқотнинг илмий янгиликларини баён қилинган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган, уларнинг назарий ва амалий аҳамиятини очиб берилган, натижаларни амалиётга қўллаш, ишнинг апробацияси, диссертациянинг ҳажми ва тузилиши тўғрисидаги маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг "Муаммонинг долзарб ҳолати" деб номланган **биринчи бобида** қуёш энергиясини лазер энергиясига айлантириш соҳасидаги тадқиқотлар бўйича обзор ва асл илмий ишларнинг таҳлили ўтказилган. Френел линзаларида қуёш нурларини мавжуд лазерларнинг лазер нурланишига ўтказиш самарадорлиги ҳали ҳам қуёш лазерлари кенг тарқалиши учун етарли эмаслиги аниқланган. Конвертация самарадорлигини ошириш учун қуйидаги асосий вазифаларни бажариш керак деган хулосага келинган:

– мавжуд қуёш нурида ишлайдиган лазерлар (Nd: YAG, Ce: Nd:YAG лазерлари) самарадорлигини ошириш учун янги ечимларни излаш, масалан, лазер материалларининг композицион конструкцияларидан фойдаланиш, концентрацион тизимларнинг самарадорлигини ошириш ва бошқалар.

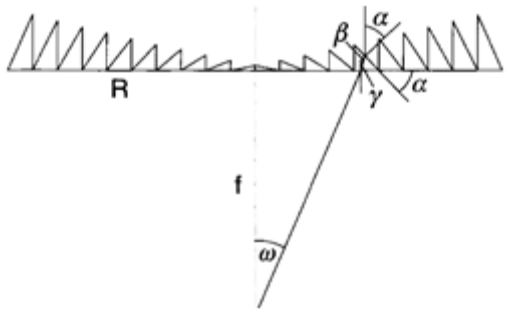
- иссиқлик эффектлари таъсирини, хусусан, ички сенсибилловчи воситалар (Cr:Nd:YAG, Cr:Nd:GSGG, Ce:Nd:YAG лазерлари самарадорлигини ошириш учун.)

"Френел линзалари асосида қуёш концентраторлари" деб номланувчи диссертациясининг **иккинчи бобида** Френел линзалари хусусиятларининг қисқача тавсифи берилган, дисперсиянинг қуёш концентраторининг фокал нуқтаси тузилишига таъсирини ўрганиш натижалари келтирилган, Френел линзаси асосидаги қуёш концентраторининг фокал текислигида бир текис тақсимот (гомогенизация) олиш имконияти кўрсатилган.

Ясси Френел линзасининг фокал доғлари тузилишларига дисперсиянинг таъсирини ўрганиш, фокал доғларнинг кенгайиши ва фокал текисликнинг силжиши мавжудлигини кўрсатди. Диаметри 1м ва фокус масофаси 88 см бўлган Френел линзалари учун кўндаланг кенгайиш тахминан 5 мм, бўйламасига фокус ўзгариши 15 мм дан ошган. Фокусланган фотонлар тақсимотининг гомогенизацияси тўртбурчак шаклидаги шаффоф силикат параллелепипед призмаси ёрдамида намойиш этилган. Ушбу арзон ва содда гомогенизация техникаси лазер физикасида, айниқса, қуёш нурлари билан ишлайдиган лазерларда ўз тадбиқини топиш имкониятига эга.

Тасвирни сақламайдиган Френел линзаси қуёш энергиясини оптимал йиғиш учун мўлжалланган. Шунинг учун тасвирни сақламайдиган Френел линзасини тадқиқ этишни фотонларни кузатиш усули ёрдамида бажариш мумкин. Фокус нуқтасини ўрганиш учун текис Френел линзасининг «grooves out» ни кўриб чиқамиз. Фараз қилайлик, Френел линзасининг фокус масофаси

ва "призмалар" сони берилган. Ҳар бир призма ҳар хил бурчакка эга бўлгани учун уларни алоҳида топиш керак (1-расм).



1-расм. «Тишли» ясси Френел линзаси

$$\tan\omega = \frac{r}{f}$$

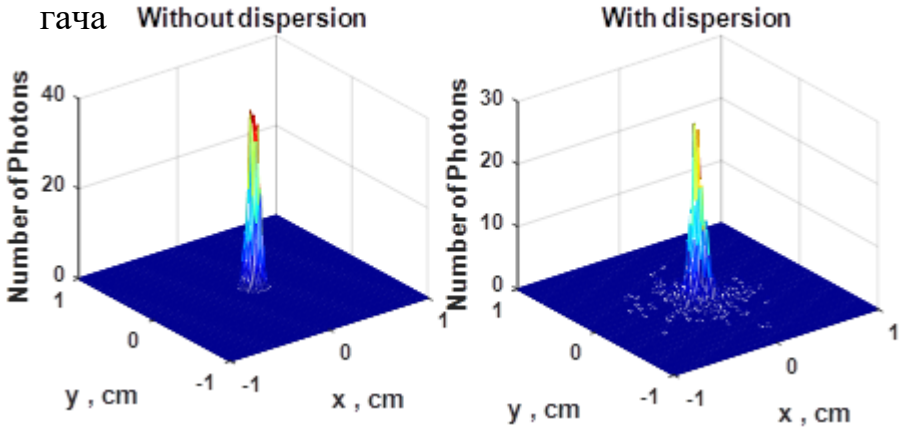
$$\gamma = \arcsin\left(\frac{\sin\omega}{n}\right) \qquad (1)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{\sin\gamma}{n-\cos\gamma}\right)$$

$$\alpha = \beta + \gamma$$

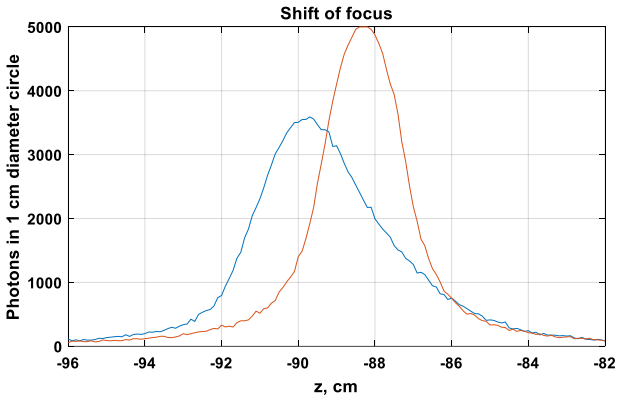
Фотон (нур) n-чи призма устига тушади дейлик ва шу призманинг бурчагини топишимиз керак. Снелл қонуни ва баъзи бир геометриядан фойдаланиб, тенгламаларни топамиз (1-тенглама), унда n - призма материалининг синдириш кўрсаткичи, r - линза марказидан тушиш нуқтасигача бўлган масофа. Фотонларни статистик кузатиш усулини қўллаш учун фокус узунлиги 88 см ва 2500 призма қаторига эга Френел линзасини кўриб чиқамиз. Линза материали полиметил метакрилат бўлиб, унинг синдириш кўрсаткичининг тўлқин узунлигига боғлиқлиги эмпирик тарзда қуйидагича ифода этиш мумкин $n(\lambda) = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4$ бу ерда λ [μ], A = 1.478419, B = 463182.1·10^{-8} μ^2, C= -8.637338·$10^{-6}\mu^4$. Кейин биз Монте Карло ва фотонларни кузатиш усулларидан фойдаланган ҳолда Френел линзасининг марказида консентрланган оқим ҳосил бўлишини тадқиқ қилдик. 2-расмда Френел линзалари ишлаб чиқарилган материалнинг дисперсиясини ҳисобга олган ва олмаган ҳолда бажарилган симуляция натижалари кўрсатилган. Ушбу натижалар ўртасида аниқ фарқ кўриниб турибди. Агар дисперсияни ҳисобга олсак, фокал нуқтанинг диаметри тахминан 0,5 см гача кенгаяди.

Кенгайишдан ташқари, асосий масса атрофида фотонларнинг тарқоқ тарқалиши кузатилади.



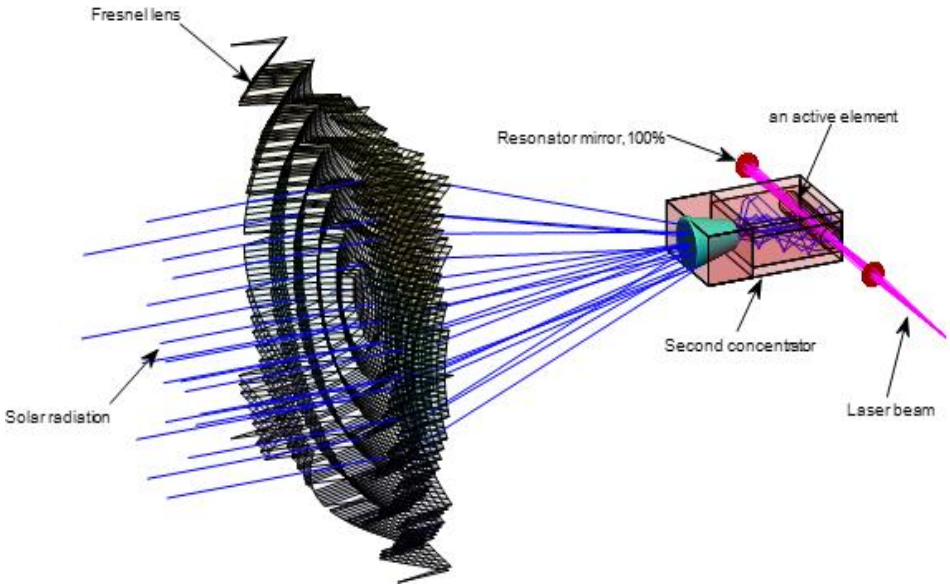
2-расм. Френел линзасининг геометрик фокусидаги фотонлар сони

Агар биз дисперсияни ҳисобга олсак, аниқ кенгайишдан ташқари, бизнинг моделимиз шуни кўрсатадики, ҳақиқий фокус (фокал текислик) 2 см дан камга силжийди, бу фотонлар сонининг (концентрациясининг) фокус узунлигига боғлиқлигидан кўринади (3-расм). Яъни, дисперсия бўлмаганида, геометрик фокус узунлиги тахминан 88 см эди, аммо дисперсияни ҳисобга олганда, фокус линзадан узоқлашди (3-расмда кўрсатилгандек).

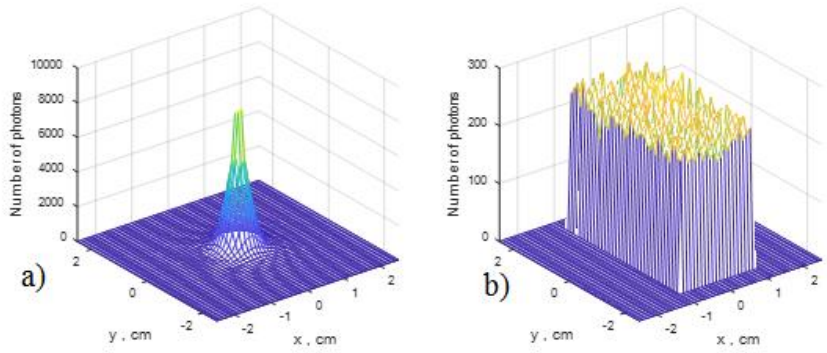


3-расм. Фотонлар концентрациясининг фокус масофасига боғлиқлиги

Диссертациянинг **учинчи бобида** Монте-Карлода ишлаб чиқарилган фотон кузатувидан фойдаланиб, биз учта иккиламчи концентраторнинг самарадорлиги ва хусусиятларини баҳоладик. Симуляция қилинган қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазерларнинг муҳим қисмларини схематик кўринишини 4-расмда кўриш мумкин. Иккиламчи концентраторларнинг кириш қисми Френел линзасининг фокал қисмида жойлашган бўлиб, концентраторларнинг ўлчамлари фотонларнинг тарқалиш тақсимотини бир текис ҳолга келтириш учун оптималлаштирилган. 5а-расмда концентраторнинг кириш қисмидаги фотонлар тақсимоти, 5б-расмда эса фаол элемент жойлашган текисликдаги фотонлар тақсимоти кўрсатилган. Кўриниб турганидек, ушбу текисликда фотонлар тақсимоти бир текис. Бунинг натижасида, фаол муҳитнинг бутун узунлиги бўйлаб фотонлар ютилишининг бир текис бўлиб қолиши аниқ. Бу эса иссиқлик эффектларининг олдини олади ва юқори сифатли нур дасталарини ҳосил қилишга ёрдам беради. Фотонларни кузатиб боришнинг Монте-Карло усули бизга комплекс таҳлилларни ўтказишга имкон беради. Масалан, тизимнинг қайси қисмлари юқори ёки паст иссиқлик юкламаларини таъсири остида ва тизимнинг қайси қисмлари тўғри ишламаётганлигини аниқлаш мумкин. Моделда деворларнинг қайтариш коэффициентини 95% деб ўрнатилди. Шундай қилиб, оптик дамлаш коэффициентлари учта ҳолат бўйича ҳисобланди (ретро рефлекторли ва ретро рефлекторсиз, думалоқ диофрагма ва конуссимон диофрагма билан). Ретро рефлекторсиз иккиламчи концентратор учун тахминан 4,6%, думалоқ диофрагмали ретро рефлекторли концентратор учун тахминан 6% ва конуссимон диофрагмали ретро рефлекторли концентратор учун тахминан 8,1%. Бундан ташқари, тўрт сатҳли лазер учун маълум ифода (2-тенглама) ёрдамида лазер чиқиш қуввати қуёшнинг кириш қувватига боғлиқлигини ҳисоблаш учун оптик дамлаш самарадорлигидан фойдаланилган.



4-расм. Қуёш ёрдамида оптик дамланадиган лазернинг схематик тасвири

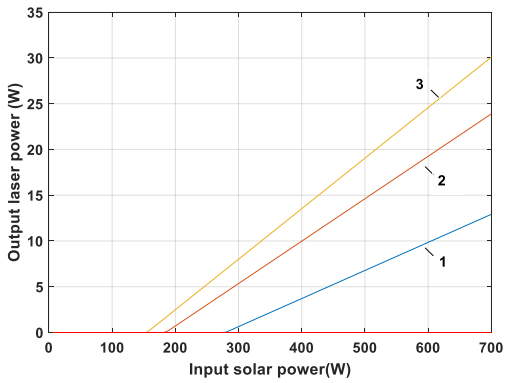


5-расм. Фокусланган фотонлар гомогенизацияси: а) Фокусланган фотонлар тақсимоти

б) Гомогенизация қилинган фотонлар тақсимоти

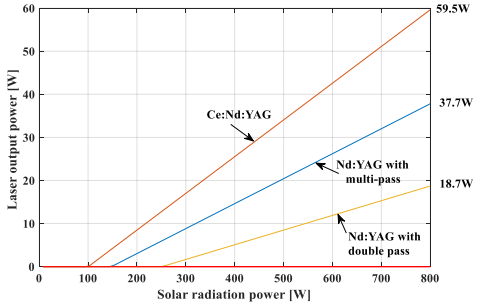
$$P_{out} = \frac{\gamma_2}{2\gamma}\eta_p(P - P_{\text{thr}}) \qquad (2)$$

бу ерда γ_2 - чиқиш ойнасидан ўтиш натижасидаги логарифмик йўқотишлар, 2γ - резонатор ичидаги ҳар икки йўналишдаги умумий йўқотишлар, μ_p - оптик дамлаш самарадорлиги $\eta_p = \frac{N_a}{N}\frac{h\nu_L}{h\nu_p}$, $h\nu_L$ - лазер нурланиши фотонларининг энергияси, $h\nu_p$ - қуёш фотонларининг ўртача энергияси, N_a - ютилган фотонлар сони, N - кўриб чиқилаётган қуёш фотонларининг умумий сони, $P_{out}, P_{pump}, P_{threshold}$ - мос равишда лазер қуввати, оптик дамлаш қуввати ва чегаравий қувватидир. Натижалар 3.6-расмда келтирилган. Чиқиш қувватининг кириш қувватига боғлиқлик графигадан кўриш мумкинки, ретро рефлекторли иккиламчи концентраторлар яхшироқ ишлаб, чиқиш қувватини деярли икки баробарга оширади.

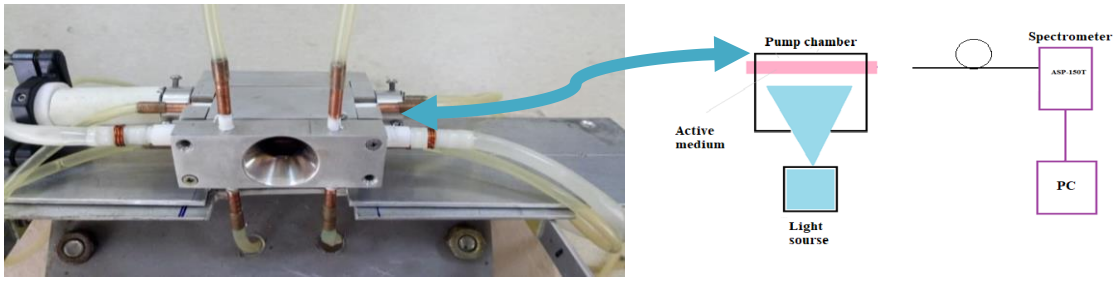


6-расм. Диаметри 2,5 мм ва узунлиги 4 см бўлган Nd: YAG стержни учун лазер чиқиш қувватининг киришдаги қуёш қувватига боғлиқлиги: 1 - ретрорефлекторсиз, 2 – ретрорефлектор билан (думалоқ апертурали) ва 3 – ретрорефлектор билан (конуссимон апертурали)

Биз қуёш нурлари билан ишлайдиган лазерларда кенг тарқалган Nd:YAG ўрнига фаол муҳит сифатида Ce: Nd:YAG кристалининг фаол муҳитидан ва Ce: Nd:YAG кристалининг потенциалидан кўп марта ўтишга имкон берадиган тавсия этилган оптик дамлаш схемасидан фойдаланиш имкониятларини ўрганиб чиқдик. Ce:Nd:YAG материали қуёш спектрининг кўринадиган қисмида кенг ютиш диапазонига эга. Бизнинг рақамли моделимиз Ce: Nd:YAG кристали учун кўп ўтишли оптик дамлаш схемаси билан 12% дан ортиқ ютилишини кўрсатди. Натижада, 1000 Вт/м^2 қуёш нурланиши билан 59,5 Вт лазер қувватига эришиш мумкин. Бу умумий самарадорликнинг 7,5% ни ташкил этади (7-расм, Ce:Nd:YAG графиги). Бу эрда дифференциал самарадорлик қарийб 8,5% ни ташкил этади, бу эса ён томонидан оптик дамланадиган режимдаги ҳозирда мавжуд бўлган қуёш билан ишлайдиган лазерларникидан анча юқори. Диссертация доирасида кўп ўтишли оптик дамлаш схемасини намойиш этиш учун биз кўндаланг оптик дамлаш учун ретро-рефлекторли янги камерани ишлаб чиқдик.

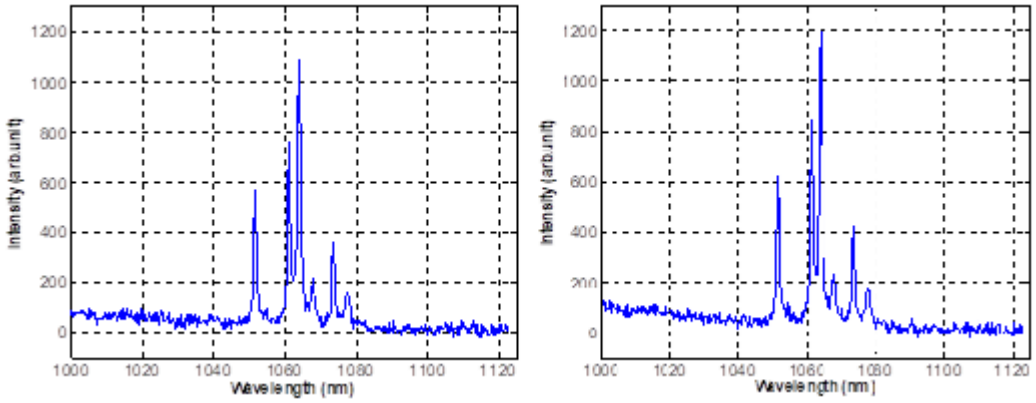


7-расм. Диаметри 2,5 мм ва узунлиги 4 см бўлган Ce: Nd: YAG стержнидан олинган лазер қувватининг қуёш қувватига боғлиқлиги



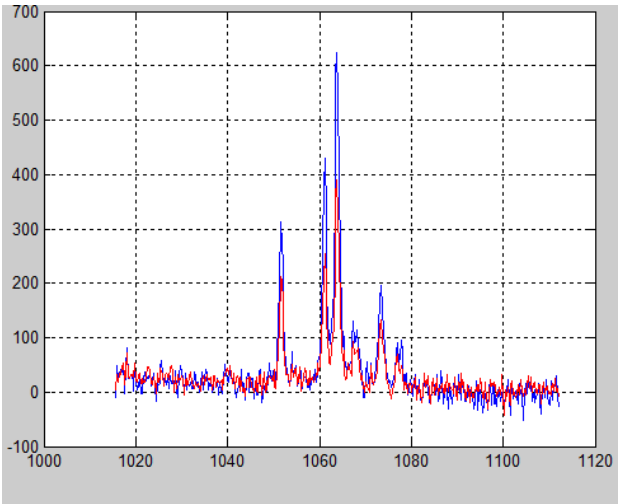
Экспериментал қурилма

Қуйидаги расмларда (8-9) Nd:YAG нинг 1064 нм лазер тўлқин узунлиги атрофида олинган люминесценция спектрлари келтирилган. Ушбу спектрлардан кўриниб турибдики, ретро рефлектордан (конуснинг иккиламчи концентраторли камерасининг олд девори) фойдаланганда ретро рефлектор йўқлигида олинган спектрга нисбатан люминесценциянинг кучайиши кузатилади. Ретро рефлекторли ва у бўлмаган ҳолатлар учун 1050-1080 нм тўлқин узунлиги диапазонидаги чизиқлар нисбатларини ҳисоблаш шуни кўрсатдики, у 1,125 ни ташкил этди, яъни ретро рефлектордан фойдаланганда 12,5% га ўсиш кузатилди,



8-расм. Ретро-рефлекторли ва ретро-рефлекторсиз схемаларда Nd:YAG люминесценция спектри

бу қуёш нурида ишлайдиган лазерларнинг самарадорлигини ошириш учун биз таклиф этган кўп ўтишли оптик дамлаш ғоямизни тасдиқлайди. Биз Ce: Nd:YAG материалидан фаол мухит сифатида фойдаланиб юқори самарали қуёш лазерини олиш мумкинлигини кўрсатдик. Шу муносабат билан Ce:Nd:YAG материалига асосланган сенсибилизаторли фаол муҳитда энергия узатиш жараёнини ўрганиш 454 нм тўлқин узунлигидаги ёруғлик диоди (LED) нурланиши билан оптик дамланган холда амалга оширилди. Қуёш нури билан оптик дамлашда Ce:Nd:YAG таркибидаги Ce ионларининг сенсибиллаш таъсирини баҳолаш учун биз бир хил ўлчамдаги бир хил неодим концентрациясили фаол муҳит Nd:YAG ва Ce: Nd: YAG-лардаги неодимнинг люминесценция спектрларини ўлчаш ва таққослаш орқали неодим люминесценциясининг кучайишини текширдик.



9-расм. Люминесценция спектрларининг қисмлари. Nd:YAG (қизил чизиқлар) ва Ce:Nd:YAG(кўк чизиқлар).

Диссертациянинг **тўртинчи бобида** лазер муҳитида юқори даражадаги иссиқлик юкламалари мавжуд бўлган холда лазернинг хусусиятларини тавсифлаш учун модел ишлаб чиқилди, чунки бу амалда қуёш нурлари билан ишлайдиган лазерлар учун одатий ҳолат. Бўйлама оптик дамлаш схемасида ва иккита ясси ойнали резонаторда, резонатор параметрига киритилган нурнинг кенглиги $u(\mathbf{r})$ доимий деб ҳисоблаш мумкин деб тахмин қилайлик. Кейинги қадам цилиндрсимон фаол муҳитни кўндаланг ҳалқаларга "ажратиш" бўлади (10-расм) ва бу ҳолда ҳар бир ҳалқа (бўлак) учун бир хил оптик дамлаш тезлигини қабул қилиш мумкин. Бошқача қилиб айтганда, фаол мухит яхлит мухит сифатида қаралмайди, аксинча ҳар бири умумий чиқиш қувватига ҳисса қўшадиган алоҳида мустақил ингичка ҳалқалар (бўлаклар) кўриб чиқилади. Шундай қилиб, биз бир хил кўндаланг оптик дамлаш билан алоҳида фаол муҳит сифатида ишлайдиган ҳалқали муҳитларни оламиз.

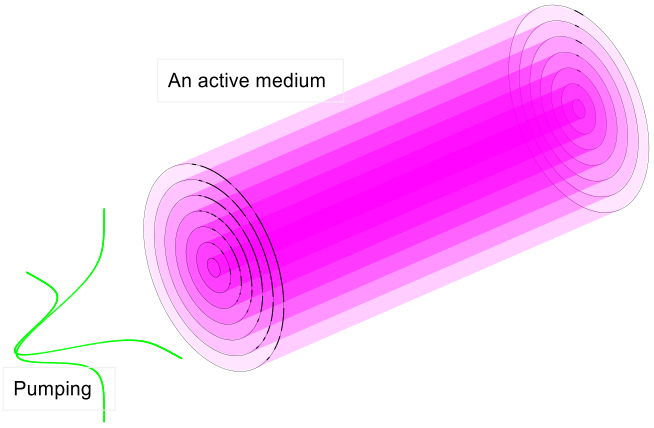


Рисунок 10. Распределение накачки и секционирование активной среды

Ушбу тахминлар асосида биз битта бўлак учун қувватни ҳисоблашнинг қуйидаги аналитик тенгламасига келамиз

$$P_{out} = \left[\frac{A_b(1+\sigma_a N_t l/\gamma)}{\sigma_e + \sigma_a} \right] \left(\frac{h\nu}{\tau} \right) \left(\frac{\gamma_2}{2} \right) \left(\frac{P_p}{P_{th}} - 1 \right) \quad (3)$$

бу ерда A_b - нурнинг кўндаланг кесим юзаси, ν - оптик дамлаш частотаси, γ_2 - чиқиш ойнасининг ўтказиш коэффициенти, P_p - оптик дамлаш қуввати, P_{th} - оптик дамлашнинг чегаравий қуввати. Ушбу формула диод лазерлари билан бир текис оптик дамланадиган квази тўрт сатҳли лазерлар учун амал қилади. Бу шуни англатадики, ушбу формуладан ажратиш натижасида олинган индивидуал фаол муҳит бўлаклари учун фойдаланиш мумкин. Алоҳида бўлакни ҳисобга олган ҳолда, биз оптик дамлашни радиал йўналишда локал даражада бир хил деб тахмин қилдик. Бироқ, оптик дамлаш қуввати ўқ йўналишида, яъни фаол муҳит узунлиги бўйлаб камаяди. Ушбу ўзгаришни ҳисобга олиш учун биз мажбурий нурланиш ва ютилишнинг кўндаланг кесими учун фаол муҳит узунлиги бўйича функциянинг ўртача қийматидан фойдаланишимиз мумкин:

$$\tilde{\sigma}_a = \frac{1}{L}\int_L \sigma_a(T(z))dz, \ \tilde{\sigma}_e = \frac{1}{L}\int_L \sigma_e(T(z))dz \quad (4)$$

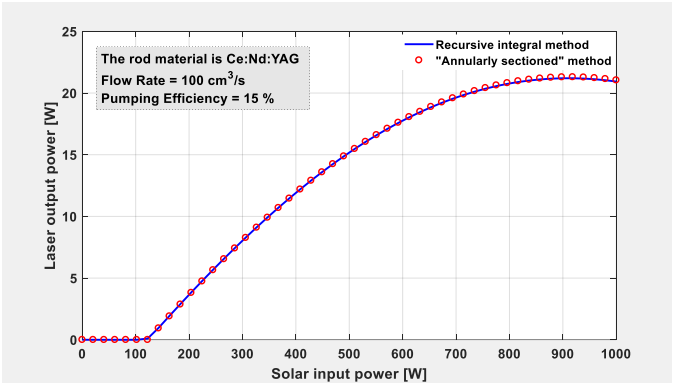
у ҳолда i-ҳалқали қисм учун чиқиш қуввати ифодаси қуйидаги кўринишни олади

$$P^{i}{}_{out} = \left[\frac{A_b^i (1 + \tilde{\sigma}_a^i N_t l / \gamma)}{\tilde{\sigma}_a^i + \tilde{\sigma}_e^i} \right] \left(\frac{h\nu}{\tau} \right) \left(\frac{\gamma_2}{2} \right) \left(\frac{P_p^i}{P_{th}^i} - 1 \right) \quad (6)$$

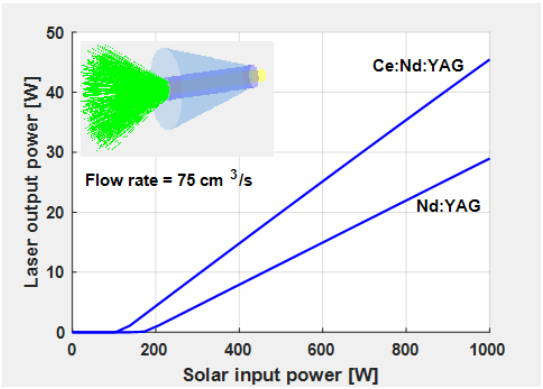
бу ерда i - ҳалқа тартиб рақами. Умумий чиқиш қуввати учун ифода:

$$P_{out}^{total} = \sum_i P_{out}^i \quad (7)$$

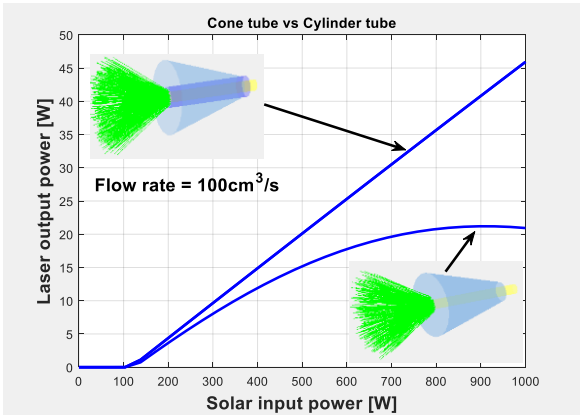
бу ерда сумма ҳалқалар сони бўйича амалга оширилади. Юқори аниқлик даражасини олиш учун бўлаклар сони етарлича кўп бўлиши керак. Биз ишлаб чиққан ярим аналитик моделни тасдиқлаш учун Ce:Nd:YAG фаол элементи учун чиқиш қуввати икки хил, яъни ярим аналитик модел ва рекурсив модел доирасида ҳисоблаб чиқилган ва олинган натижалар таққосланган (11-расм). Ҳисоб-китоблар кварц трубкаси фаол стерженнинг бутун узунлиги бўйлаб доимий иссиқлик узатиш коэффициентини ва юқори совутиш самарадорлигини таъминлаш мақсадида ишлатиладиган конфигурация учун амалга оширилди. 12-расмда кварц найчаси



11-расм. Ce:Nd:YAG учун лазер чиқиш қувватининг оптик дамлаш қувватига боғлиқлиги



13-расм. Фаол стержен учи фокусда жойлашган, ҳамда кварц найча бўлган холда Ce:Nd:YAG ва Nd:YAG учун лазер чиқиш қувватининг оптик дамлаш қувватига боғлиқлиги



12-расм. Фаол стержен учи фокусда жойлашган ҳамда кварц найча бўлган ва бўлмаган холларда Ce:Nd:YAG учун лазер чиқиш қувватининг оптик дамлаш қувватига боғлиқлиги

бўлган ва бўлмаган ҳолда ва фаол стерженнинг учи фокусда бўлганида Ce: Nd:YAG лазеридаги лазер чиқиш қуввати қуёш нури қувватига боғлиқлиги бўйича олинган натижалар таққосланган. Лазер муҳитининг пастки ишчи сатҳларга термик бандлик таъсирининг сезиларли даражада кўпайиши ва деярли йўқ бўлиб кетишини кўриш мумкин. Қуйидаги 13-расмда самарали совутиш тизими (кварц

трубкаси) шароитида Ce:Nd:YAG учун олинган натижалар Nd:YAG натижалари билан таққосланган.
Сўнгги расмлардан кўриниб турибдики, етарлича самарали совутиш билан, сенсибилизаторли Ce: Nd:YAG фаол муҳитни ишлатганда қуёш энергиясини лазер энергиясига айлантириш самарадорлигини Nd:YAG фаол мухитга нисбатан 1,5 ёки ундан кўп марта ошириш мумкин.

ХУЛОСА

1. Френел линзалари асосида қуёш концентратори фокусида консентрланган қуёш нурланиши билан оптик дамланадиган лазернинг компютер модели ишлаб чиқилди. Симуляция усули билан Френел линзалари асосида лазернинг турли хил конструкцияларини ўрганиш амалга оширилди ва 1 м диаметрли Френел линзалари асосида лазернинг оптимал параметрлари аниқланди.
2. Ясси Френел линзасининг фокус доғининг тузилиши ва ўлчамларига дисперсиянинг таъсирини ўрганилди. Френел линзалари ишлаб чиқарилган материалдаги дисперсия туфайли фокал доғлар кенгайиб, фокус текислиги силжиши кўрсатилган. Диаметри 1 м ва фокус узунлиги 88 см бўлган Френел линзалари учун кўндаланг йўналишдаги кенгайиш тахминан 5 мм, бўйламасига фокус ўзгариши 15 мм дан ошган.
3. Кўндаланг оптик дамлаш схемасидан фойдаланганда оптик дамлаш тақсимотининг бир текислигини таъминлаш учун гомогенизатор сифатида эритилган кварц асосидаги шаффоф текис-параллел пластинка ёрдамида фокусланган фотонлар тақсимотининг гомогенизацияси намойиш этилди. Ушбу арзон ва содда гомогенизация техникаси лазер физикасида, айниқса, қуёш нурлари билан ишлайдиган лазерларда тадбиқини топиш имкониятига эга.
4. Френел линзалари асосидаги Nd:YAG қуёш лазерларида кўп ўтишли кўндаланг оптик дамлаш схемаси Монте Карло усули билан фотонларни тақиб қилиш симуляция модели ёрдамида ўрганилди. Кўрсатилганидек, кўп ўтишли оптик дамлаш схемасидан фойдаланиш кўп ишлатиладиган (бир ўтишли) оптик дамлаш схемаси билан таққослаганда оптик дамлаш самарадорлигини икки бараварга ошириш имконни беради. Ушбу тадқиқотлар натижаларига кўра, иккиламчи концентраторнинг прототипи - Френел линзалари асосида концентрловчи тизим учун ретро-рефлекторли оптик дамлаш камераси ишлаб чиқилган, тайёрланган ва синовдан ўтказилган. Ретро рефлектордан фойдаланиш оптик дамлаш самарадорлигини ошириши экспериментал тарзда тасдиқланган.
5. Бир хил ўлчамдаги Nd:YAG ва Ce:Nd:YAG фаол элементларининг люминесценция спектрларини концентрланган қуёш нурлари билан қўзғатиш остида экспериментал тадқиқот амалга оширилди. Люминесценция спектрларини таққослашда Ce:Nd:YAG ҳолатида Ce ионлари билан сенсибилизация туфайли неодимнинг 1064 нм атрофида люминесценцияси

Nd:YAG билан люминесценцияга нисбатан 1,5 баравар ўсганлигини кўрсатди, бу LED ёки лампали оптик дамлашдаги каби Ce - қуёш нурлари остида Nd:YAG учун энг яхши сенсибилизаторлардан бири эканлигини тасдиқлайди.

6. Қуёш нури билан оптик дамланадиган тўрт сатҳли лазерларнинг термик бандликнинг юқори даражадаги иссиқлик юкламалари холида лазер кўрсаткичларига таъсирини ўрганиш учун фазовий координаталарга боғлиқ тезлик тенгламаларини қўллаган ҳолда қуёш билан ишлайдиган лазерлар учун рақамли ва аналитик моделлар ишлаб чиқилган. Ce:Nd:YAG асосида ишлайдиган қуёш лазерининг ишчи сатҳларининг термик бандлиги чиқиш қувватига унинг тўлиқ йўқолишига қадар сезиларли таъсир кўрсатиши мумкинлиги кўрсатилган ва бу қуёш энергиясини лазер нурланишига самарадор айлантришга тўсқинлик қилувчи энг асосий омиллардан биридир. Шунингдек, ушбу муаммони ечими таклиф қилинган ва керакли иссиқлик шароитлари таъминланган тақдирда Ce:Nd:YAG лазерининг чиқиш қуввати Nd:YAG лазернинг чиқиш қувватидан бир ярим-икки баравар ошиши мумкинлиги кўрсатилган.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.FM.65.01
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ИНСТИТУТ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ШЕРНИЁЗОВ АНВАРЖОН АХМЕДЖОНОВИЧ

ЛАЗЕРЫ С СОЛНЕЧНОЙ НАКАЧКОЙ НА ЛИНЗЕ ФРЕНЕЛЯ

01.04.11. –Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ

Ташкент – 2021

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2020.4.PhD/FM552.

Диссертация выполнена в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета по адресу www.iplt.uz и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу www.ziyonet.uz.

Научный руководитель:	**Пайзиев Шермахамат Далиевич** доктор физико-математических наук, снс
Официальные оппоненты:	**Давлетов Икром Юсубович** доктор физико-математических наук, доцент
	Азаматов Закир Тахирович доктор физико-математических наук, профессор
Ведущая организация:	**Ташкентский Государственный Технический Университет**

Защита диссертации состоится «21» сентября 2021 г. в 14^{00} часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий по адресу: 100125, г.Ташкент, ул.Дурмон йули, 33. Тел./Факс: (+99871) 262-32-54, e-mail:info@iplt.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ионно-плазменных и лазерных технологий (зарегистрирована за № 9), по адресу: 100125, г.Ташкент, ул.Дурмон йули, 33. Тел.: (+99871) 262-31-69.

Автореферат диссертации разослан «08» сентября 2021 года.

(реестр протокола рассылки 9 от «08» сентября 2021 года).

Х.Б. Ашуров
Председателя научного совета по присуждению учёных степеней, д.т.н., профессор

И.Д. Ядгаров
Учёный секретарь научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник

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

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время одной из основных мировых проблем является эффективное использование экологически чистой солнечной энергии. Одним из перспективных направлений использования солнечной энергии является преобразование её в энергию лазерного излучения. В этой связи актуальны проблемы и задачи, связанные с выявлением 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.

В мире во многих специализированных научных центрах для решения этих задач ведутся исследования свойств различных лазерных активных сред, возможность применения дополнительных оптических материалов для предварительной модификации спектра солнечного излучение и увеличения эффективности преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения.

В последнее время в Республике Узбекистан усилилось внимание к изучению новых возможностей эффективного использования солнечной энергии, в частности путём преобразования её в монохроматическое когерентное излучение на основе новых керамических, композитных оптических материалов, обладающих высокие термические, механические и другие физические, а также ведутся исследовательские и инновационные работы по актуальным вопросам физики процессов передачи сенсибилизации, направленные на увеличение эффективности прямого преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения. Направления этих фундаментальных исследований и разработок, имеющих большое значение для развития науки нашей страны и их практического применения, отражены в Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 годы.

Данное диссертационное исследование, в определённой степени, соответствует задачам, поставленным в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года и № УП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, имеющих отношение к данной области деятельности.

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».

Степень изученности проблемы. Ряд важнейших научных исследований по данной тематике проведен в различных зарубежных научных центрах, в том числе были оценены эффективности преобразования
различных конфигурации лазеров с солнечной накачкой с целью улучшения их выходных параметеров, термических характеристик. Наиболее значительные результаты в указанной области были достигнуты зарубежными учеными, например, португальскими (D. Liang, H. Costa, J. Almeida, D. Garcia, M. Catela, B.D. Tibúrcio, C.R. Vistas, E. Guillot), японскими (Masamori Endo ,Taizo Masuda, Mitsuhiro Iyoda, Yuta Yasumatsu, Yabe Takashi, Kunio Yoshida, Shigeaki Uchida, Ikesue Akio, Kiichiro Kamata,), канадским (Jean-Francois Bisson), израильскими (Nechayev, Sergey, Carmel Rotschild, V. Krupkin, Y. Kagan, A. Yogev)
немецкими (Stephan Dottermusch, Ian A. Howard, Bryce S. Richards) и другие, а также ученые из нашей страны (Ш. Д. Пайзиев, С.А. Бахрамов, Ш. И. Клычев, А. Фазилов, Х.М. Махмудов, А.К.Касимов, Ф.Ф. Шайимов)

Японские ученые под руководством Yabe Takashi получали 120 Вт лазерной мощности с использованием линзы Френеля площадью 4 $м^2$ в лазере с активной средой на основе Nd:YAG.

D. Liang с сотрудниками получили самую высокую эффективность преобразования солнечной энергий в энергию лазерного излучения в лазере с активной средой на основе Nd:Cr:YAG, которая составляет 6.7%.

Ученые Узбекистана академик С.А. Бахрамов, Ш. Д. Пайзиев, Ш. И. Клычев, А. Фазилов, А.К.Касимов и другие впервые создавали лазерную установку на большой солнечной печи, где было получено 80 Вт лазерной мощности с одного кристалла, демонстрируя возможность получения генерации на больших солнечных концентраторах. Группой Пайзиева Ш.Д. предложена новая концепция, основанная на использование внешних сенсибилизаторов, позволяющая в несколько раз увеличить эффективность преобразования солнечных лазеров. Х.М. Махмудовым методом симуляции исследована и показана возможность создания высокоэффективных лазеров с солнечной накачкой на основе различных активных сред, таких как Александрит, Ti^{3+}:Сапфир, Nd:YAG и Ce:Nd:YAG с сенсибилизаторами на основе Cr3+:YAG, Cr3+: GSGG, Cr3+:YSGG, Cr3+:LICAF, Cr3+:LISAF, Ti3+:Сапфир и т.д

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертационная работа. Диссертационная работа выполнена в рамках следующих проектов Института Ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз: ОТ-Ф3-10 «Исследование и развитие физических основ процессов преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения» (2017–2020 гг.), ФА-Атех-2018-16 «Разработка и создание лазера с солнечной накачкой на линзе Френеля» (2018–2020 гг.).

Целью исследования является выявление основных факторов, препятствующих повышению эффективности преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения при использовании концентраторов на основе линзы Френеля и предложение решений для разработки и создания высокоэффективных лазерных устройств на базе солнечных концентраторов на основе линзы Френеля.

З**адачи исследования**:

- разработка компьютерной модели лазера, накачиваемого сконцентрированным солнечным излучением в фокусе солнечного концентратора на основе линзы Френеля;
- методом симуляций исследование влияния дисперсии на структуру и размеров фокального пятна плоской линзы Френеля;
- методом симуляций исследование различных конструкций лазера на линзе Френеля и определение оптимальных параметров лазера на линзе Френеля с диаметром 1м для эффективного преобразования концентрированного солнечного излучения в фокусе концентратора;
- методом симуляций исследование многопроходной схемы поперечной накачки в солнечных Nd: YAG-лазерах на линзе Френеля;
- разработка и изготовление макетного образца вторичного концентратора – камера накачки с ретро-рефлектором для концентрирующей системе на основе линзы Френеля и проведение её испытание;
- экспериментальное исследование спектров люминесценции Nd:YAG и Ce:Nd:YAG одинаковых размеров при возбуждении концентрированным солнечным излучением;
- разработка численной и аналитической модели для исследования влияния термического заселения лазерных уровней в четырехуровневых лазерах с солнечной накачкой, на характеристики лазера при наличии высокой степени тепловой нагрузки в лазерной среде;
- теоретическое исследование влияния термического заселения рабочих уровней солнечных лазеров на основе Ce:Nd:YAG и Nd:YAG на выходные характеристики.

Объектом исследования являются твердотельные неодимовые лазерные активные среды, сенсибилизаторы, концентрирующие системы солнечного излучения на основе линзы Френеля, и резонаторы лазера, а также макеты преобразователей солнечной энергии различного типа.

Предметом исследования являются физические процессы взаимодействия солнечных фотонов с лазерной активной средой, сенсибилизатором, поглощения, люминесценция фотонов, передача энергии из ионов сенсибилизаторов 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 симуляции случайных процессов, происходящих в лазерной системе с учетом спектральных характеристик активных сред и солнечного излучения. Модель для симуляции основана на использование методов Монте-

Карло и трассировки (прослеживания) фотонов. В экспериментах использовались современные приборы 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, цифровой осциллограф и спектрометр высокого разрешения марки HR4000.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- определены оптимальные параметры лазера на линзе Френеля с диаметром 1м для эффективного преобразования концентрированного солнечного излучения в фокусе концентратора;
- установлено, что вследствие дисперсии в материале, из которого изготовлена линза Френеля, происходит расширение фокальных пятен и смещение фокальной плоскости;
- выявлено, что для обеспечения однородности распределения накачки можно использовать простой гомогенизатор на основе прозрачной плоскопараллельной пластины из плавленого кварца;
- установлено, что многопроходная схема поперечной накачки в солнечных Nd:YAG-лазерах на линзе Френеля позволяет увеличить эффективность накачки до двух раз по сравнению с обычно используемой (однопроходной) схемой накачки;
- экспериментально обнаружено, что интенсивность люминесценции неодима в окрестности 1064нм при возбуждении концентрированным солнечным излучением в случае Ce:Nd:YAG 1.5 раза превышает интенсивность люминесценции Nd:YAG при одинаковых условиях, который подтверждает, что Ce является одним из лучших сенсибилизаторов для Nd:YAG при солнечной накачке, также как при светодиодной или ламповой накачке;
- разработана полуаналитическая модель для лазеров с солнечной накачкой, с использованием пространственно-зависимых скоростных уравнений, для исследования влияния термического заселения лазерных уровней в четырехуровневых лазерах с солнечной накачкой на характеристики лазера при наличии высокой степени тепловой нагрузки в лазерной среде;
- установлено, что термическое заселение рабочих уровней солнечного лазера на основе Ce:Nd:YAG оказывает существенное влияние на выходную мощность вплоть до её полного исчезновения.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

Разработанные методы для моделирования физических процессов в лазерах cs 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 использование внешних преобразователей частоты солнечного спектра, позволит создание солнечных лазеров с высокой эффективностью преобразования, а также разработке новых солнечных лазерных технологий.

Достоверность результатов исследований подтверждается применением современных научных и экспериментальных методов, необходимой статистикой экспериментов, использованием комплекса независимых методик

измерения и обработки данных, а также соответствием полученных результатов для чистых пленок Si и $CoSi_2$ с данными других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследований настоящей диссертации заключается в предложенной новой модели для лазеров с солнечной накачкой для исследования влияния термического заселения лазерных уровней в четырехуровневых лазерах с солнечной накачкой, в предложенной конфигурации, которая дает возможность существенного увеличения эффективности лазеров с солнечной накачкой, и использование 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 солнечной энергии.

Внедрение результатов исследования.

На основе комплекса исследований люминесцентных, термических свойств и генерационных характеристик лазерных активных сред Nd:YAG и Ce:Nd:YAG проведена разработка эффективных преобразователей солнечного излучения в лазерное излучение:

результаты, полученные при моделировании физических процессов в лазерной системе на основе научных работ, выполненных в рамках диссертации были использованы для научно-технических задач фундаментального проекта ОТ-Ф3-14 «Исследование конвективных процессов в плоских солнечных коллекторах и в каналах аккумуляторных систем солнечный коллектор-бак», выполненный под руководством доктора технических наук Кличева Ш. И. в Научно-техническом центре с конструкторском бюро и опытным производством Академии наук Узбекистана в 2017-2020 гг (справка № 2 /1255-2109 АН РУз от 27 июля 2021 г.). Использование научных результатов позволило впервые оценить эффективность преобразования солнечной энергии в тепловую энергию в солнечных коллекторах в процессе объемного поглощения в полупрозрачных теплоносителях;

разработанные на основе результатов исследований, выполненных в рамках диссертации, модель физических процессов в лазерной системе и программное обеспечение «Алгоритм статистического отслеживания фотонов» (№ DGU 07182, 2019), были использованы в фундаментальном проекте № ПФИ ФИ ФА-Ф-3-02 ««Исследование структуры и свойств магнитных материалов на основе ферритов бария, стронция и висмута, синтезированных в потоке концентрированного солнечного излучения и магнитной индукции»» (справка № 2/1255-215 Академия Наук Республики Узбекистан от 25 января 2021 года). Использование научных результатов позволило определить, что скорость охлаждения раствора, которая сильно влияет на дисперсность получаемого материала, зависит от способа его нанесения.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 4 международных и республиканских конференциях.

Публикация результатов исследования. Результаты, полученные по теме диссертации, изложены в 9 научных трудах, в том числе в 4 статьях, опубликованных в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистана для публикации основных научных результатов диссертационных работ и защищено 1 свидетельством о регистрации программного продукта.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы включая 47 рисунка. Текст диссертации изложен на 97 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, определены объект, предмет и методы исследования, а также связь исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республики Узбекистан, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены данные о внедрении результатов, апробации работы, объёме и структуре диссертации.

В **первой главе** диссертации «Современное состояние проблемы» диссертации проведён анализ обзорных и оригинальных научных работ по исследованию в области преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения. Выявлено, что эффективность преобразования солнечного излучения в лазерное излучение существующих лазеров на линзах Френеля всё еще недостаточно высоки, чтобы солнечные лазеры получили широкое распространение. Сделано заключение, что для увеличения эффективности преобразования, необходимо выполнение следующих основных задач:

– поиск новых решений для увеличения эффективности существующих лазеров с солнечной накачкой (лазеры на Nd:YAG, на Ce:Nd:YAG), например с применением композитных структур лазерных материалов, с повышением эффективности концентрирующих систем и т.д.

– детальное исследование влияние термических эффектов, в частности влияния термического заселения рабочих уровней лазерных сред с внутренними сенсибилизаторами (лазеры на активных элементах Cr:Nd:YAG, Cr:Nd:GSGG, Ce:Nd:YAG и т.д.) для повышения их эффективности

Во **второй главе** диссертации «Солнечные концентраторы на основе линзы френеля» дано краткое описание характеристик линз Френеля, приведены результаты исследований влияния дисперсии на структуры фокального пятна солнечного концентратора на основе линзы Френеля, возможности получения равномерного распределения (гомогенизация) в фокальной плоскости солнечного концентратора.

Исследование влияния дисперсии на структуры фокальных пятен плоской линзы Френеля показали, что происходит расширение фокальных пятен и смещение фокальной плоскости. Для линзы Френеля с диаметром 1 м и фокусным расстояние 88 см поперечное расширение составляло около 5мм, а продольное смещение фокуса было более 15мм. Была продемонстрирована гомогенизация распределения сфокусированных фотонов с использованием прямоугольной прозрачной призмы в форме параллелепипеда из плавленного кварца. Этот недорогой и простой метод гомогенизации потенциально может найти применение в лазерной физике, особенно в лазерах с солнечной накачкой.

Неизображающая (non-imaging) линза Френеля предназначена для оптимального сбора солнечной энергии. По этому исследование неизображающей линзы Френеля может быть выполнено с использованием метода отслеживания фотонов. Рассмотрим «grooves out» плоской линзы Френеля для исследования фокального пятна. Предположим, что фокусное расстояние линзы Френеля и количество «призм» даны. Поскольку каждая призма имеет разные углы, необходимо найти их индивидуально (рис. 1).

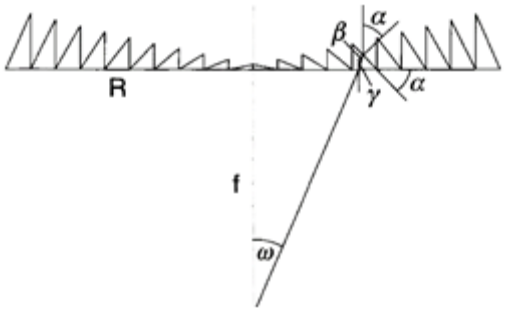


Рисунок 1. Плоская линза Френеля с «канавками»

$$\tan\omega = \frac{r}{f}$$

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{\sin\omega}{n}\right) \qquad (1)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{\sin\gamma}{n-\cos\gamma}\right)$$

$$\alpha = \beta + \gamma$$

Допустим, что фотон (луч) падает на n-ю призму, и нам нужно найти угол этой призмы. Используя закон Снеллиуса [44] и некоторую геометрию, находим уравнения (урав. 1), в которых n-показатель преломления материала призмы, r - расстояние от центра линзы до точки падения. Чтобы применить метод статистической трассировки фотонов, рассмотрим линзу Френеля с фокусным расстоянием 88 см и числом призм 2500. Используемый материал линз - это полиметилметакрилат, зависимость показателя преломления от длины волны которого выражается эмпирически как $n(\lambda) = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4$ где λ в $[\mu]$, A = 1.478419, B = 463182.1·10^{-8} μ^2, C= -8.637338·10$^{-6}\mu^4$. Далее проводилось симуляция процесса формирования концентрированного потока в фокусе линзы Френеля методами Монте-Карло и трассировки фотонов. На рисунке 2 приведены результаты симуляции с и без учета дисперсии материала из

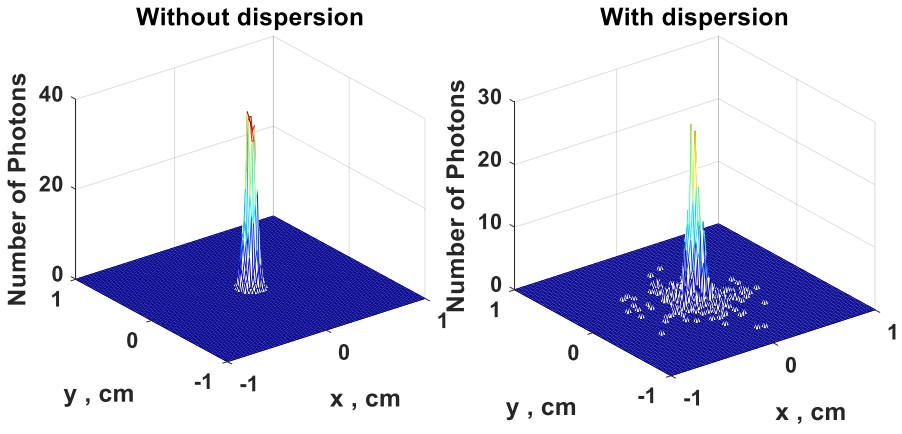


Рисунок 2. Количество фотонов в геометрическом фокусе линзы Френеля

которого сделана линза Френеля. Видно явное различие между этими результатами. Если учитывать дисперсию, диаметр фокального пятна расширяется примерно до 0.5 см. Помимо расширения, вокруг основной массы наблюдается рассеянное распределение фотонов.

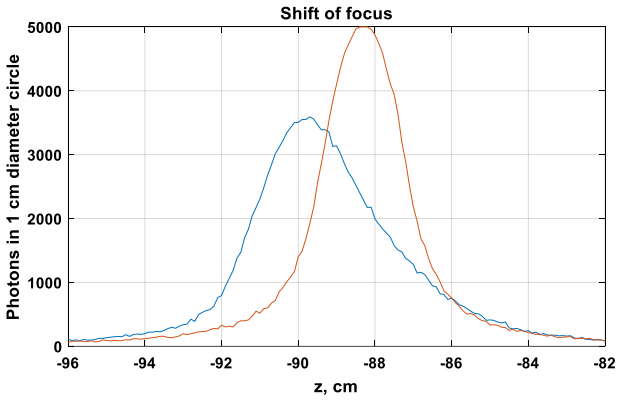


Рисунок 3. Зависимость концентрации фотонов от фокусного расстояния

Если принять во внимание дисперсию, кроме очевидного расширения, наша модель показывает, что практический фокус (фокальная плоскость) перемещается менее чем на 2 см. Это видно из зависимости количества (концентрации) фотонов от фокусного расстояния (рисунок 3). То есть, когда дисперсии нет, геометрическое фокусное составило около 88 см. Однако при учете дисперсии фокус перемещалось в сторону от линзы (как это показано на рис. 3).

В **третьей главе** диссертации используя разработанную трассировку фотонов методом Монте-Карло, мы оценивали эффективность и характеристик трех вторичных концентраторов. Схематическое изображение важных частей смоделированных лазеров с солнечной накачкой можно увидеть на рисунке 4. Входная апертура вторичного концентраторов размещено в фокальной области линзы Френеля, а размеры концентраторов оптимизированы для гомогенизации распределения фотонов. На рисунке 5а видно распределение фотонов на входе концентратора, а на рисунке 5б - распределение фотонов в плоскости, где расположен активный элемент. Как видно, распределение фотонов на этой плоскости равномерное. В результате этого очевидно, что поглощение по всей длине активной среды становится практически равномерным. Это предотвращает тепловые эффекты и помогает создавать высококачественные профили пучка. Отметим, что метод отслеживания фотонов Монте-Карло позволяет нам проводить комплексный анализ. Например, какие части системы испытывают высокие или низкие тепловые нагрузки, а какие части системы не функционируют должным образом. В модели мы установили коэффициент отражения 95% на стенках. Таким образом, были рассчитаны коэффициенты накачки для трех случаев (со ретро-рефлектором и без него, с круглой апертурой и конической апертурой). Для вторичного концентратора без ретро-рефлектора около 4,6%, для концентратора с ретро-рефлектором с круглой апертурой около 6% и для концентратора со ретро-рефлектором с конической апертурой около 8,1%. Кроме того, эффективность накачки использовалась для расчета зависимости выходной мощности лазерного излучения от входной мощности солнечного излучения с использованием известного выражения (урав. 2) для четырехуровневого лазера.

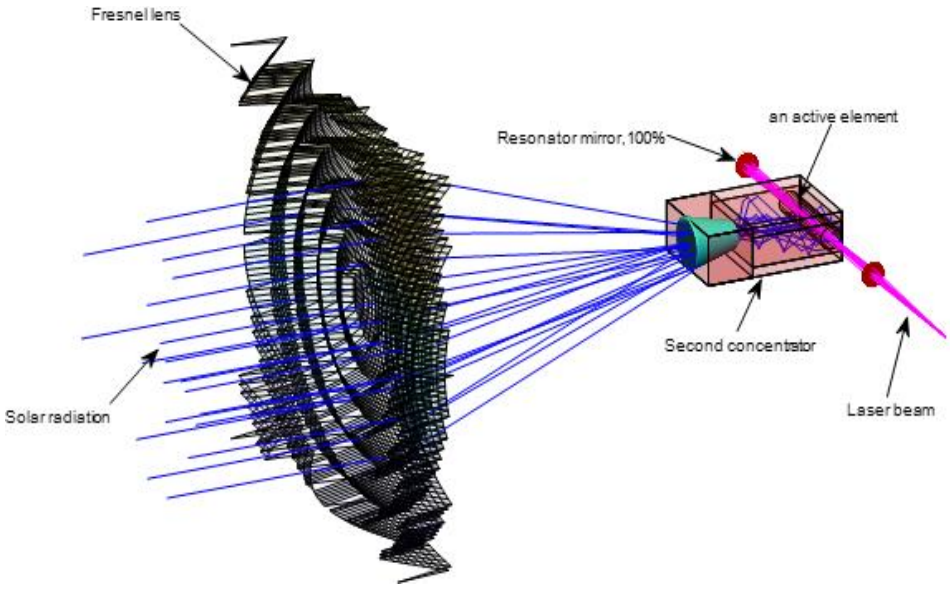


Рисунок 4. Схематическое изображение лазера с солнечной накачкой.

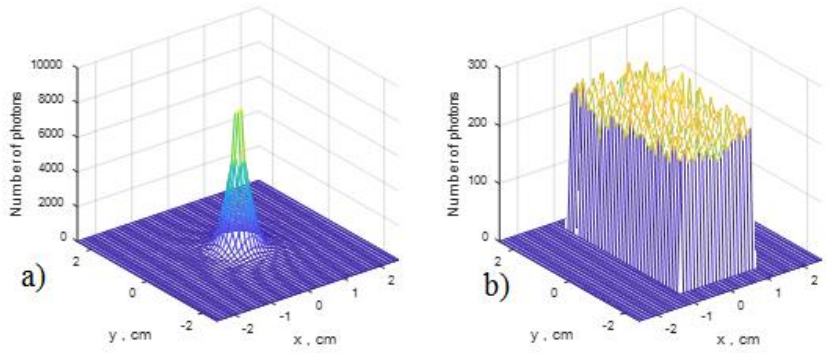


Рисунок 5 - Гомогенизация сфокусированных фотонов: а) Распределение сфокусированных фотонов б) Распределение гомогенизированных фотонов

$$P_{out} = \frac{\gamma_2}{2\gamma}\eta_p(P - P_{\text{thr}}) \qquad (2)$$

где γ_2 - логарифмические потери из-за пропускания выходного зеркала, 2γ - общие потери в обоих направлениях внутри резонатора, μ_p - эффективность накачки, определяемая как $\eta_p = \frac{N_a}{N}\frac{h\nu_L}{h\nu_p}$, $h\nu_L$ - энергия фотонов лазерного излучения, $h\nu_p$ - средняя энергия фотонов солнечной накачки, N_a - число поглощенных фотонов, N - общее количество рассматриваемых солнечных фотонов, $P_{out}, P_{pump}, P_{threshold}$, - мощность лазера, накачки и пороговая мощность соответственно. Результаты показаны на рисунке 3.6. Зависимость выходной мощности от входной мощности показывает, что концентраторы с ретро-рефлектором работают намного лучше, достигая почти вдвое большей мощности.

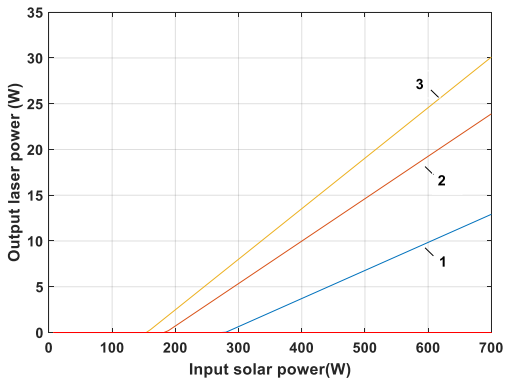


Рисунок 6. Выходная мощность лазера в зависимости от входной солнечной энергии для стержня Nd: YAG диаметром 2,5 мм и длиной 4 см: 1 - без светоотражателя, 2 - со светоотражателем (с круглой апертурой) и 3 - со светоотражателем - отражатель и коническая апертура

Мы исследовали возможности использования предложенной схемы накачки, которая допускает многократный проход солнечных лучей через активную среду и потенциал кристалла Ce:Nd:YAG в качестве активной среды вместо широко распространенного Nd:YAG в лазерах с солнечной накачкой. Материал Ce:Nd:YAG имеет широкую полосу поглощения в видимой области солнечного спектра. Наша численная модель показывает более 12% поглощения при многопроходной схеме накачки для кристалла Ce: Nd: YAG. В результате мощность лазера 59,5 Вт может быть достигнута при солнечном излучении 1000 Вт/м^2. Это составляет 7,5% общей эффективности (рис. 7, линия Ce:Nd:YAG). Здесь дифференциальная эффективность составляет около 8,5%, что намного выше, чем у существующих в настоящее время лазеров с солнечной накачкой в режиме боковой накачки. Для демонстрации схемы многопроходной накачки в рамках диссертации нами была разработана новая камера с ретро-отражателем для поперечной накачки.

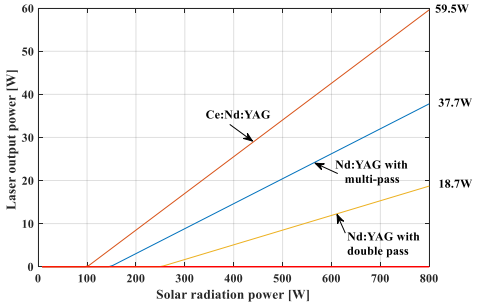
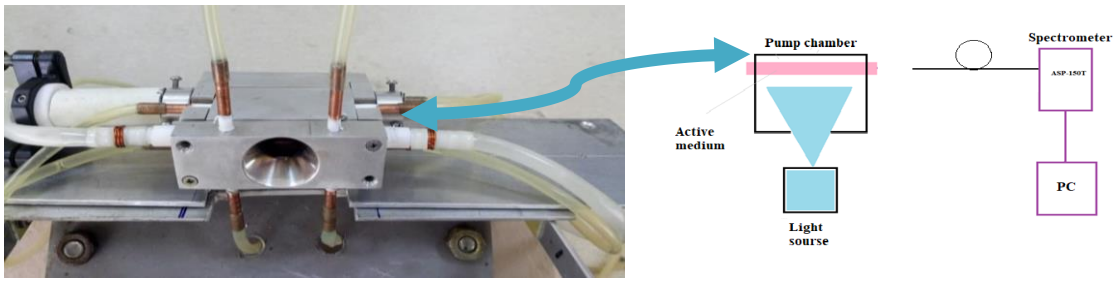


Рисунок 7. Зависимость мощности лазера от солнечной энергии для стержня Ce: Nd: YAG диаметром 2,5 мм и длиной 4 см



Экспериментальная установка

На следующих рисунках (8-9) приведены полученные спектры люминесценции Nd:YAG в окрестности линии генерации 1064нм. Как видно из этих спектров при использовании ретро-отражателя (передней стенки камеры с коническим вторичным концентратором) наблюдается увеличение люминесценции по сравнению со спектром, полученным при отсутствии ретро-отражателя. Вычисление отношений площадей линий в диапазоне длин волн 1050-1080нм для случаев с и без ретро-отражателя показало, что оно составлять 1.125 то есть наблюдается увеличение на 12.5% при использовании ретро-отражателя, что подтверждает предложенную нами идею многопроходной накачки для

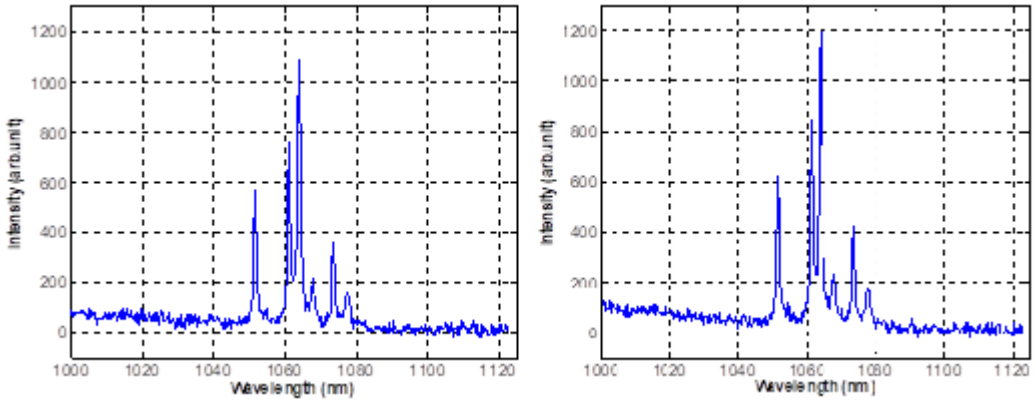


Рисунок 8. Спектр люминесценции Nd:YAG в схеме с и без ретро-отражателя

увеличения эффективности лазеров с солнечной накачкой. мы показали, что, используя материал Ce:Nd:YAG в качестве активной среды, можно получить высокоэффективный солнечный лазер. В связи с этим, проведено исследование процесса передачи энергии в активной среде с сенсибилизатором на основе материала Ce:Nd:YAG при накачке излучением светодиода на длине волны 454нм. Для оценки сенсибилизирующего эффекта ионов Ce в Ce:Nd:YAG при солнечной накачки исследован эффект усиления люминесценции неодима измерением и сравнением спектров люминесценции неодима в активных средах Nd:YAG и Ce:Nd:YAG одинаковых размеров и одинаковой концентрации неодима при солнечном возбуждении.

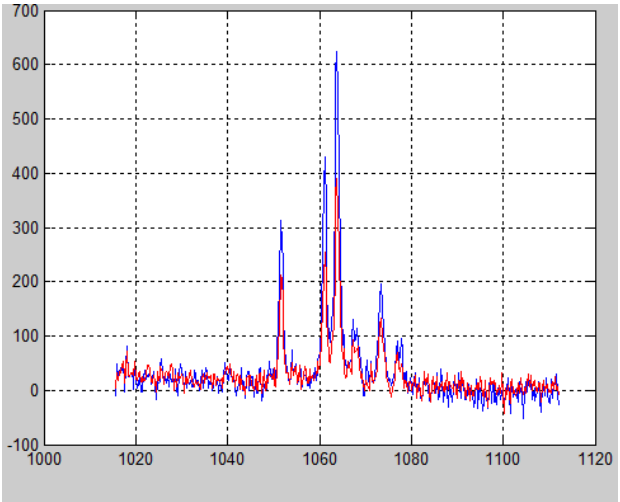


Рисунок 9. Участки спектров люминесценций Nd:YAG (красная линия) и Ce:Nd:YAG(синяя линия).

В **четвертой главе** диссертации было разработана модель для описания характеристик лазера при наличии высокой степени тепловой нагрузки в лазерной среде, поскольку это является типичным случаем на практике для лазеров с солнечной накачкой. Предположим, что схема торцевой накачки и резонатор с двумя плоскими зеркалами, тогда ширину пучка который входит в параметр резонатора $u(\mathbf{r})$ можно считать постоянной. Следующим шагом будет «разбиение» цилиндрической активной среды на поперечно-кольцевые участки (рисунок 10) и, при этом можно предположить одинаковую скорость накачки для каждой секции. Другими словами, активная среда не рассматривается как единое целое, вместо этого рассматриваются тонкие независимые секции, каждая из которых вносит свой вклад в общую выходную мощность. Таким образом, мы получаем кольцевые среды, работающие как отдельные активные среды с поперечной равномерной накачкой. При этих предположениях, мы приходим к следующему аналитическому уравнению для расчета выходной мощности для отдельной секции

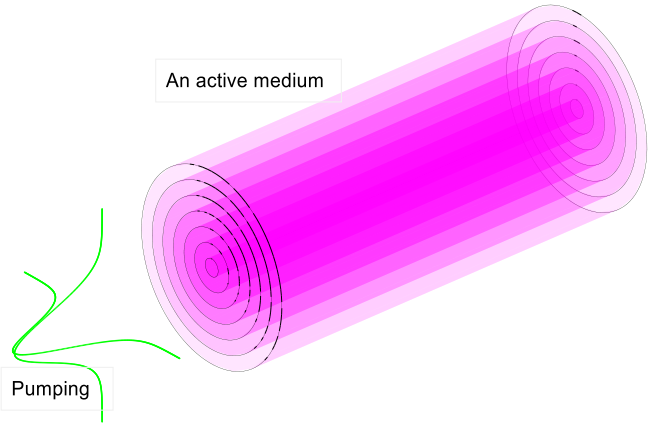


Рисунок 10. Распределение накачки и секционирование активной среды

$$P_{out} = \left[\frac{A_b(1+\sigma_a N_t l/\gamma)}{\sigma_e+\sigma_a}\right]\left(\frac{h\nu}{\tau}\right)\left(\frac{\gamma_2}{2}\right)\left(\frac{P_p}{P_{th}}-1\right) \quad (3)$$

где A_b - площадь поперечного сечения пучка, ν - частота накачки, γ_2 - коэффициент пропускания выходного зеркала, P_p - мощность накачки, P_{th} - пороговая мощность накачки. Эта формула справедлива для квази-четырехуровневых лазеров с однородной накачкой, таких как лазеры с диодной накачкой. Это означает, что эта формулировка может быть использована для индивидуальных активных сред, полученных разбиением на секции. Рассматривая отдельный участок, мы предположили, что накачка локально однородна в радиальном направлении. Однако мощность накачки уменьшается в осевом направлении, то есть по длине активной среды. Чтобы учесть это изменение, мы можем использовать среднее значение функции, взятое по осевой длине для стимулированного излучения и сечений поглощения:

$$\tilde{\sigma}_a = \frac{1}{L}\int_L \sigma_a(T(z))dz,\ \tilde{\sigma}_e = \frac{1}{L}\int_L \sigma_e(T(z))dz \quad (4)$$

Тогда выходное уравнение для i-того кольцевого сечения принимает вид

$$P^{i}{}_{out} = \left[\frac{A_b^i (1 + \tilde{\sigma}_a^i N_t l / \gamma)}{\tilde{\sigma}_a^i + \tilde{\sigma}_e^i} \right] \left(\frac{h\nu}{\tau} \right) \left(\frac{\gamma_2}{2} \right) \left(\frac{P_p^i}{P_{th}^i} - 1 \right) \quad (6)$$

где i - номер секции. Уравнение для общей выходной мощности:

$$P_{out}^{total} = \sum_i P_{out}^i \quad (7)$$

где суммирование производится по номеру секций. Чтобы получить высокую степень точности, количество секций должно быть достаточно большим. Для валидации разработанной нами полуаналитической модели проводились расчеты выходной мощности для Ce:Nd:YAG активного элемента двумя способами, то есть в рамках полуаналитической модели и рекурсивной модели, и сравнивались результаты (рисунок 11).

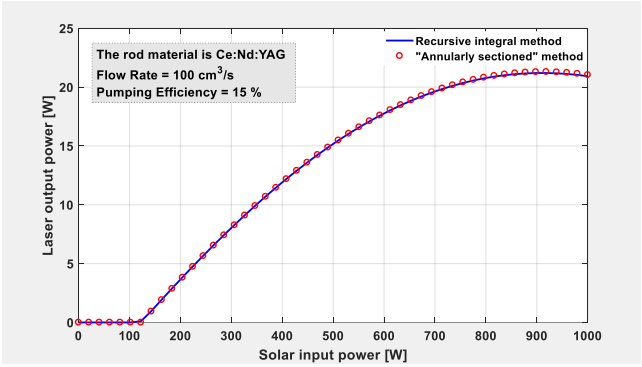


Рисунок 11. Зависимости выходной мощности лазера от мощности накачки для Ce:Nd:YAG

Проводились расчеты для конфигурации, где применяется кварцевая трубка для обеспечения постоянства коэффициента теплопередачи по всей длине активного стержня и высокой эффективности охлаждения. На рисунке 12 сравниваются полученные

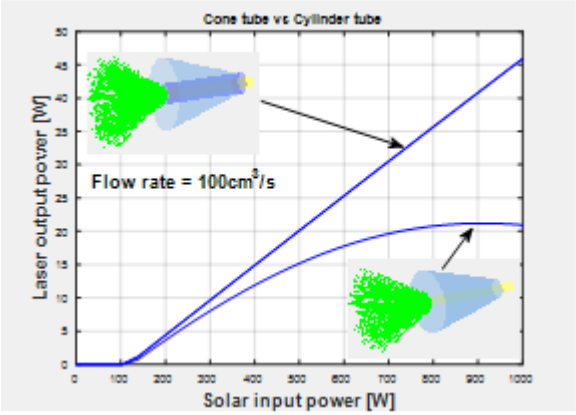


Рисунок 12. Зависимости выходной мощности лазера от мощности накачки для Ce:Nd:YAG для случая с и без кварцевой трубки и когда торец активного стержня находится в фокусе

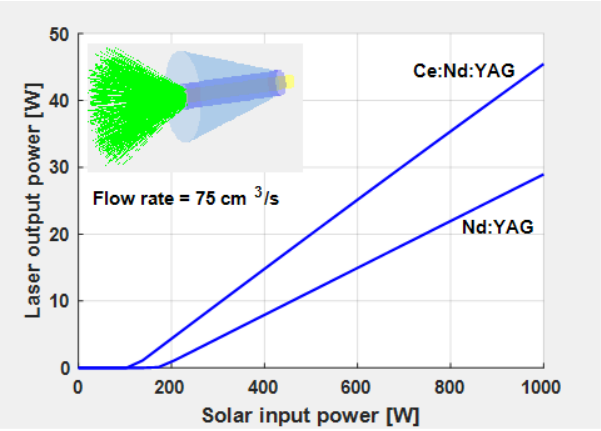


Рисунок 13 - Зависимости выходной мощности лазера от мощности солнечного излучения для Ce:Nd:YAG и Nd:YAG для случая с кварцевой трубки и когда торец активного стержня находится в фокусе

результаты для зависимости выходной мощности лазера от мощности солнечного излучения в лазере с Ce:Nd:YAG для случая с и без кварцевой трубки и когда торец активного стержня находится в фокусе.

Видно существенное увеличение и практическое полное исчезновение влияния термического заселения нижнего рабочего уровня лазерной среды. На следующем рисунке 13 сравниваются результаты для Ce:Nd:YAG с

результатами для Nd:YAG, полученных в условиях с применением эффективной системы охлаждения (кварцевой трубки). Как видно из последних рисунков при достаточно эффективном охлаждении можно достичь увеличении эффективности преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения в 1.5 и более раза при использовании активных сред с сенсибилизатором Ce:Nd:YAG по сравнению без них в Nd:YAG.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1.Разработана компьютерная модель лазера, накачиваемого сконцентрированным солнечным излучением в фокусе солнечного концентратора на основе линзы Френеля. Методом симуляций проведено исследование различных конструкций лазера на линзе Френеля и определены оптимальные параметры лазера на линзе Френеля с диаметром 1м для эффективного преобразования концентрированного солнечного излучения в фокусе концентратора.
2. Проведено исследование влияния дисперсии на структуру и размеров фокального пятна плоской линзы Френеля. Показано, что вследствие дисперсии в материале, из которого изготовлена линза Френеля, происходит расширение фокальных пятен и смещение фокальной плоскости. Для линзы Френеля с диаметром 1 м и фокусным расстояние 88 см поперечное расширение составляло около 5мм, а продольное смещение фокуса было более 15мм.
3. Для обеспечения однородности распределения накачки при использовании поперечной схеме было продемонстрировано гомогенизация распределения сфокусированных фотонов с применением прозрачной плоскопараллельной пластины на основе плавленого кварца в качестве гомогенизатора. Этот недорогой и простой метод гомогенизации потенциально может найти применение в лазерной физике, особенно в лазерах с солнечной накачкой.
4. Методом симуляций исследовалась многопроходная схема поперечной накачки в солнечных Nd: YAG-лазерах на линзе Френеля с использованием симуляционной модели с отслеживанием фотонов методом Монте-Карло. Показано, что использование многопроходной схемы накачки позволяет увеличить эффективность накачки до двух раз по сравнению с обычно используемой (однопроходной) схемой накачки. На основании результатов этих исследований разработан и изготовлен макетный образец вторичного концентратора – камера накачки с ретро-рефлектором для концентрирующей системе на основе линзы Френеля и проведено её испытание. Экспериментально подтверждено, что использование ретро-рефлектора повышает эффективность накачки.
5. Проведено экспериментальное исследование спектров люминесценции Nd:YAG и Ce:Nd:YAG одинаковых размеров при возбуждении концентрированным солнечным излучением. Сравнение спектров

люминесценции показали 1.5 кратное увеличение люминесценции неодима в окрестности 1064нм за счет сенсибилизации ионами Ce в случае с Ce:Nd:YAG по сравнению с люминесценцией с Nd:YAG, что подтверждает, что Ce является одним из лучших сенсибилизаторов для Nd:YAG при солнечной накачке, также как при светодиодной или ламповой накачке.

6. Разработаны численная и аналитическая модели для лазеров с солнечной накачкой, с использованием пространственно-зависимых скоростных уравнений, для исследования влияния термического заселения лазерных уровней в четырехуровневых лазерах с солнечной накачкой на характеристики лазера при наличии высокой степени тепловой нагрузки в лазерной среде. Показано, что термическое заселение рабочих уровней солнечного лазера на основе Ce:Nd:YAG оказывает существенное влияние на выходную мощность вплоть до её полного исчезновения и оно является одним из основных факторов, препятствующих повышению эффективности преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения. Также, предложено решение для этой проблемы и показано, что при обеспечении необходимых термических условий, выходная мощность Ce:Nd:YAG лазера может превышать в полтора-два раза мощности лазера на Nd:YAG.

SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFIC DEGREES DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

SHERNIYOZOV ANVARJON AKHMEDJONOVICH

SOLAR PUMPED LASERS ON FRESNEL LENSES

01.04.11 – Laser physics

ABSTRACT OF DISSERTATION OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

TASHKENT – 2021

The subject of doctoral dissertation is registered at the Supreme Attestation Commision at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2020.4.PhD/FM552.

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

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

Scientific consultant:	**Shermakhamat Payziyev** Doctor of physical and mathematical sciences
Official opponents:	**Ikrom Davletov** Doctor of physical and mathematical sciences
	Zakir Azamatov Doctor of physical and mathematical sciences, professor
Leading organization:	**Tashkent State Technical University**

The defense will take place on « 21 » September 2021 at 14^{00} at the meeting of the Scientific Council number DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 at the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent city, 33 Durmon yuli str. Phone: (+99871) 262-32-54, e-mail:info@iplt.uz.

The doctoral dissertation is can be looked through in the Information-Resource Centre of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (is registered № 9) (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent city, 33 Durmon yuli str. Phone: (+99871) 262-31-69.

The abstract of the dissertation is sent out on « 08 » September 2021.

(Mailing report № 9 on « 08 » September 2021).

Kh.B.Ashurov
Chairman of scientific council on award of scientific degrees, doctor of technical sciences, professor

I.D.Yadgarov
Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, doctor of physical and mathematical sciences

S.A. Bakhramov
Chairman of scientific seminar under scientific council on award of scientific degrees, doctor of physical and mathematical sciences, academician

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The importance and necessity of t opic of dissertation: Today, efficient use of environmentally friendly solar energy is currently one of the world's major problems. One of the promising areas of using solar energy is converting it into laser energy. In this regard, the problems and tasks associated with the identification of new active media with certain physical properties for the efficient conversion of the energy of the broadband spectrum of solar radiation into the energy of monochromatic laser radiation and prevention of negative thermal effects arising during the operation of these active media are urgent.

The purpose of the research is to identify the main factors that prevent an increase in the efficiency of converting solar energy into laser energy when using concentrators based on a Fresnel lens and to propose solutions for the development and creation of highly efficient laser devices on solar concentrators based on a Fresnel lens.

Research objectives:

development of a computer model of a laser pumped by concentrated solar radiation at the focus of a Fresnel lens;

using the simulation method to study the effect of dispersion on the structure and size of the focal spot of a flat Fresnel lens;

using the simulation method, the study of various designs of a laser heads on a Fresnel lens and determination of the optimal parameters of a solar laser on a Fresnel lens with a diameter of 1 m for efficient conversion;

using the simulation method, the study of a multipass side pumping scheme in solar Nd: YAG lasers on a Fresnel lens;

development and design of a prototype of a secondary concentrator - a pumping chamber with a retro-reflector for a concentrating system based on a Fresnel lens and its testing;

experimental study of the luminescence spectra of Nd: YAG and Ce: Nd: YAG of the same size when excited by concentrated solar radiation;

development of a numerical and analytical model to study the effect of thermal population of laser levels in four-level solar-pumped lasers on the characteristics of the laser in the presence of a high degree of thermal load in the laser medium;

theoretical study of the effect of thermal population of the operating levels of solar lasers based on Ce: Nd: YAG and Nd: YAG on the laser output characteristics.

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

optimal parameters of a Fresnel lens laser with a diameter of 1 m for efficient conversion of concentrated solar radiation at the focus of the concentrator have been determined;

it was found that, due to dispersion in the material from which the Fresnel lens is made, the focal spots expand and the focal plane is displaced;

it is revealed that a simple homogenizer based on a transparent plane-parallel fused silica plate can be used to ensure the uniformity of the pump distribution;

it has been found that the multipass transverse pumping scheme in solar Nd: YAG lasers with a Fresnel lens makes it possible to increase the pumping efficiency

by up to two times in comparison with the commonly used (single-pass) pumping scheme;

it was found experimentally that the luminescence intensity of neodymium in the vicinity of 1064 nm upon excitation by concentrated solar radiation in the case of Ce: Nd: YAG is 1.5 times higher than the luminescence intensity of Nd: YAG under the same conditions, which confirms that Ce is one of the best sensitizers for Nd: YAG under solar radiation. pumping as with LED or lamp pumping;

a semi-analytical model has been developed for solar-pumped lasers using space-dependent rate equations to study the effect of thermal population of laser levels in four-level solar-pumped lasers on laser characteristics in the presence of a high degree of thermal load in the laser medium;

it is found that the thermal population of the operating levels of a solar laser based on Ce: Nd: YAG has a significant effect on the output power up to its complete disappearance.

Scientific and practical importance of the research results. The scientific significance of the research results lies in the proposed new model for solar-pumped lasers to study the effect of thermal population of laser levels in four-level solar-pumped lasers, in the proposed configuration, which makes it possible to significantly increase the efficiency of solar-pumped lasers, and the use of the developed model of lasers solar pumped for theoretical research.

The practical significance of the research results consists in the fact that the proposed scientific and technical solutions can be applied to develop and create new efficient technologies based on the use of solar energy.

Structure and volume of dissertation. Dissertation consists of introduction, four chapters, conclusion and a list of references. The dissertation contains 97 pages of printed text including 47 figures.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS
I бўлим (I часть, part I)

1. Sherniyozov, A. A., Payziyev, S.D. Solar Pumped Lasers: High-Efficiency Multi-Pass Side Pumping Scheme with Fresnel Lens. Appl. Sol. Energy 56, 458–465 (2020). https://doi.org/10.3103/S0003701X20060092 [01.00.00, № 3, IF: 1.5]

2. Sapaev, U.K., Yusupov, D.B., Sherniyzov, A.A. et al. Theory of backward second-harmonic generation of short laser pulses in periodically and aperiodically poled nonlinear crystals. J Russ Laser Res 33, 196–210 (2012). https://doi.org/10.1007/s10946-012-9273-z [№ 3, IF: 1.4]

3. Sherniyozov, A., & Payziyev, S. (2019). Focal spot structure of Fresnel lens and its homogenization. "Uzbek Journal of Physics", 21(4), 245–249. https://doi.org/10.52304/.v21i4.113 [01.00.00, № 5]

4. Sherniyozov, A., Ismailov, M., Khalikov, G., & Payziyev, S. (2019). An efficient solar-pumped Ce:Nd:YAG laser with Fresnel lens. "Uzbek Journal of Physics", 21(6), 370–374. https://doi.org/10.52304/.v21i6.144 [01.00.00, № 5]

5. А.А.Шерниёзов, Ш.Д.Пайзиев «Программное обеспечение для симуляции и оптимизации параметров солнечных концентраторов, используемых в солнечных лазерах» Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, № DGU 07182, 2019

II бўлим (II часть, part II)

6. S. Bakhramov, V. Orlovich, A. Sherniyozov, Sh. Payziyev, Kh. Zikrillayev, G.Khalikov, Kh. Makhmudov, M. Ismailov, D. Payziyeva, "Improving of solar-to-laser-power conversion efficiency by using external solar spectrum frequency converters", The 11th international conference on photonics and applications (ICPA-11), Hoa Binh City, Vietnam. 4-7 November 2020

7. Sherniyozov A.A., Yusupov J.B. "Tailoring spatial distribution of light fields", The International Symposium "New Tendencies of Developing Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements, Prospectives" November 10-11, 2016, p. 74-75

8. A. A. Sherniyozov, M. Z. Ismailov, G. A. Khalikov, Sh. D. Payziyev, "An efficient solar-pumped Ce:Nd:YAG laser with fresnel lens", Republican Conference on Physical Electronics and Photonics, Tashkent, Uzbekistan, October 23, 2019, p. 143-144.

9. A. A. Sherniyozov, Sh. D. Payziyev, "Solar powered efficient mini lasers", Международная научная конференция «НАУКА И ИННОВАЦИИ», 26 Ноября, 2020. p. 143-144.

Автореферат “Til va adabiyot ta’limi” журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек, рус ва инглиз тилидаги матнлар ўзаро мувофиқлаштирилди.

Босмага рухсат этилди: 08.09.2021 йил
Бичими 60x84 1/16, “Times New Roman”
Гарнитурада рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 2,75. Адади: 20. Буюртма: №95

Тел.:(99) 832 99 79; (97) 815 44 54

«IMPRESS MEDIA» МЧЖ босмахонасида чоп этилди.
Манзил: Тошкент ш., Яккасарой тумани, Қушбеги кўчаси,6 уй.