

**ABU RAYHON BERUNIY NOMIDAGI URGANCH DAVLAT
UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 RAQAMLI ILMY KENGASH**

ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI

BEGIMQULOV SHERZOD ABDIRASULOVICH

QUYOSH NURIDA ISHLAYDIGAN KO'P STERJENLI LAZERLAR

01.04.11 – Lazer fizikasi

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Urganch - 2025

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori(PhD) dissertatsiyasi
avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)
диссертации**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)
on physical-mathematical sciences**

Begimqulov Sherzod Abdirasulovich Quyosh nurida ishlaydigan ko'p sterjenli lazerlar.....	3
Бегимқулов Шерзод Абдирасулович Мульти-стержневые лазеры с солнечной накачкой.....	21
Begimqulov Sherzod Abdirasulovich Solar-pumped multi-rod lasers.....	40
E'lon qilingan ishlar ro'yxati Список опубликованных работ List of published works.....	44

**ABU RAYHON BERUNIY NOMIDAGI URGANCH DAVLAT
UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMiy DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 RAQAMLI ILMiy KENGASH**

ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI

BEGIMQULOV SHERZOD ABDIRASULOVICH

QUOSH NURIDA ISHLAYDIGAN KO'P STERJENLI LAZERLAR

01.04.11 – Lazer fizikasi

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Urganch - 2025

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.3.PhD/FM1160 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Falsafa doktori dissertatsiyasi Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (резюме)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.urdu.uz) va «Ziyonet» Axborot ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy raxbar:

Payziyev Shermaxamat Daliyevich

fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Eshqobilov Nafas Beknazarovich

fizika-matematika fanlari doktori, professor

Eshonqulov G'ofur Boboqulovich

fizika-matematika fanlari nomzodi, dotsent

Yetakchi tashkilot:

Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti

Dissertatsiya himoyasi Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti huzuridagi PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 raqamli Ilmiy kengashning 2025 yil «16» May soat 14⁰⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 220100, Urganch sh., H.Olimjon ko'chasi, 14-uy. Tel.: (99862) 224-66-11, faks: (99862) 224-67-00.)

Dissertatsiya bilan Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (795 - raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 220100, Urganch sh., H. Olimjon ko'chasi, 14-uy. Tel.: (99862) 224-66-11, faks: (99862) 224-67-00 .)

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil «07» 05 kuni tarqatildi.

(2025 yil «07» 05 dagi 7 - raqamli reestr bayonnomasi).



U.O.Kutliev

Ilmiy daraja beruvchi ilmiy kengash raisi,
fizika-matematika fanlari doktori,
professor

K.R.Yakubov

Ilmiy daraja beruvchi ilmiy kengash
kotibi, fizika-matematika fanlari
nomzodi, dotsent

U.Q.Sapayev

Ilmiy daraja beruvchi ilmiy kengash
qoshidagi ilmiy seminar raisi, fizika-
matematika fanlari doktori, dotsent

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va ahamiyati. Jahonda hozirgi kunda qayta tiklanadigan energiya manbalaridan biri bo'lgan, ekologik toza, barqaror va iqtisodiy foydali energiya manbai hisoblanadigan quyosh energiyasidan unumli foydalanishga alohida e'tibor berilmoqda. Jumladan, hozirgi kunda quyosh energiyasidan lazerlarda optik damlash manbai sifatida foydalanib yangi lazer texnologiyalarini yaratish alohida ahamiyat kasb etmoqda va ushbu yo'nalishda ilmiy izlanishlar jadal sur'atlar bilan olib borilmoqda. Ammo, olib borilgan ko'p yillik ilmiy izlanishlarga qaramay hozirgi paytda quyosh lazerlarining samaradorligi amaliyotda qo'llash uchun yetarli darajaga yetmagan va shu nuqtai nazardan quyosh energiyasini lazer nuri energiyasiga aylantirishdagi muammolarni hal qilish va yuqori samarali quyosh lazerlarini yaratishga alohida e'tibor qaratilmoqda.

Jahonda so'ngi vaqtlarda quyosh lazerlarining asosiy muammolaridan biri samaradorligining pastligi bo'lib uni oshirish yo'llari o'rganilmoqda. Samaradorlikni oshirishning bir qancha usullari mavjud, jumladan: yutilish spektri quyosh radiatsiyasi spektrining katta qismini qamrab oladigan faol elementlarni topish, asosiy va ikkilamchi konsentratörler orqali faol elementga ko'proq yorug'likni yo'naltirish, samarali sovutish tizimlari va ko'p sterjenli faol elementlardan foydalanish, va boshqalar. Ushbu muammolarni o'rganish quyosh lazerlarining samaradorligini oshirishdagi eng dolzarb vazifalari hisoblanmoqda.

Respublikamizda so'ngi vaqtlarda, quyosh energiyasidan keng ko'lamda foydalanilshga qiziqish ortib borayotganligi sababli quyosh nurida ishlaydigan lazerlarga katta e'tibor qaratilmoqda. Quyosh energiyasini lazer energiyasiga aylantirish samaradorligini oshirishga qaratilgan lazer fizikasining dolzarb muammolari bo'yicha tadqiqot va inovatsion ishlar olib borilmoqda. Mamlakatimizda qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirish davlat siyosatining muhim yo'nalishlaridan biriga aylangan. Mazkur soxadagi olib borilayotgan fundamental va amaliy tadqiqotlar yo'nalishlari xamda ularning amaliyotga qo'llanilishi «2030 yilgacha bo'lgan davrda O'zbekiston Respublikasida qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirish strategiyasi»¹ da aks ettirilgan.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 29-oktabrdagi PF-6097-son «Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida»gi, 2021-yil 1-apreldagi «Ilmiy va innovatsion faoliyatni rivojlantirish bo'yicha davlat boshqaruvi tizimini takomillashtirish to'g'risida»gi va 2021-yil 19-martdagi PQ-5032-son «Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida» gi qarorida hamda mazkur foliyatga tegishli boshqa meyoriy-huquqiy xujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining qarori, 02.12.2022 yildagi PQ-436-son «2030 yilgacha bo'lgan davrda O'zbekiston Respublikasida qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirish strategiyasi to'g'risida»gi qarori

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Dissertatsiya ishi bo‘yicha tadqiqotlar O‘zbekiston Respublikasi fan va texnikasini rivojlantirishning IV «Qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish usullarini ishlab chiqish, nanotexnologiya, fotonika va boshqa ilg‘or texnologiyalar asosida texnologiyalar va qurilmalar yaratish» ustuvor yo‘nalishiga mos keladi.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Xalqaro miqyosda quyosh lazerlari bo‘yicha tadqiqotlar olib borayotgan bir qator yetakchi ilmiy markazlar va universitetlar mavjud. Masalan, AQShning MIT (Massachusetts Institute of Technology), Portugaliyaning (Nova University of Lisbon) va Caltech (California Institute of Technology) kabi universitetlarida quyosh lazerlari bo‘yicha ilmiy izlanishlar olib borilmoqda. Shuningdek, Yevropada Germaniyaning Fraunhofer instituti, Yaponiyaning Kyoto universiteti va Xitoyning Pekin universiteti ham quyosh lazerlari sohasida muhim ilmiy ishlanmalar va yangi texnologiyalarni rivojlantirishga hissa qo‘shmoqda.

Keng sohali quyosh nurini monoxromatik lazer nuriga aylantirish jarayonlarini va quyosh lazerinining samaradorligini oshirish bo‘yicha ilmiy masalalarini yechishga xorijlik olimlardan jumladan, T.Yabe, T.Funatsu, T.Dinh, T.Saiki, D. Liang, Z. Guan, Z. Cai, T. Motohiro va boshqalar o‘zlarining ulkan hissalarini qo‘shishgan.

Mamlakatimiz olimlaridan Sh.Payziyev, Kh.Makhmudov, S.Bakhramov, K.Zikrillayev, A. Sherniyozov va boshqalar quyosh energiyasini lazer nuri energiyasiga aylantirish jarayonlarini tadqiq qilishga munosib hissa qo‘shganlar.

Biroq shu bilan birga, quyosh lazerlari yutilish samaradorligini oshirish uchun bir xil hajmdagi faol muhitni ko‘p sterjenli (KS) konfiguratsiyalari quyosh lazeri nurlanishining chiqish quvvatiga ta‘sirini o‘rganish va bu boradagi tadqiqotlarni rivojlantirishga yetarlicha e‘tibor berilmagan.

Tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan ilmiy tadqiqot muassasasining ilmiy tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti ilmiy tadqiqot rejasiga muvofiq «Turli usullar bilan uyg‘otiluvchi lazerlarning yangi materiallar va texnologiyalarni qo‘llash asosida samaradorligini oshirish mexanizmlarini tadqiq qilish» (2021-2024) ilmiy-tadqiqot mavzusi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi quyosh lazeri samaradorligini oshirish uchun ko‘p sterjenli faol muhitlardan va sensibilizatorlardan tashkil topgan turli lazer konfiguratsiyalarini Monte Karlo fotonlarni kuzatish metodiga asoslangan simulyatsiya usuli bilan o‘rganib yuqori lazer chiqish quvvati va samaradorligiga ega bo‘lgan optimal konfiguratsiyalarni aniqlash bo‘yicha yangi yechimlarni taklif qilishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

quyosh lazerining simulyatsion modelini Monte-Karlo foton yo'lini kuzatish metodi asosida ishlab chiqish;

Nd:YAG faol muhiti bilan Ti:Sa sensibilizatori kombinatsiyasidan tashkil topgan kompozit strukturali lazer konfiguratsiyasi uchun simulyatsion modelni ishlab chiqish;

uch sterjenli quyosh lazerining simulyatsiya modelini ishlab chiqish va uning ishonchliligini eksperimental tadqiqotda olingan ma'lumotlar asosida baholash (Validatsiya qilish);

Nd:YAG, Ce:Nd:YAG va Cr:Nd:YAG faol muhitlarini quyosh lazerlarida qiyosiy baholash orqali uch sterjenli faol muhitlardan iborat bo'lgan konfiguratsiyalar uchun simulyatsiya usuli bilan samarali faol muhitni aniqlash;

past (<1kWatt) va yuqori (>1kWatt) optik damlash rejimlarida bitta sterjenli va ko'p sterjenli quyosh lazerlarida samaradorlikni taqqoslash;

termal effektlarni hisobga olgan holda, ko'p sterjenli konfiguratsiyalarda lazer chiqish quvvatini hamda bitta sterjenli faol muhit o'rniga ko'p sterjenli konfiguratsiyalardan foydalanish samaradorligini aniqlash.

Tadqiqot obyekti qattiq holatdagi bitta va ko'p sterjenli Nd:YAG, Ce:Nd:YAG va Cr:Nd:YAG faol muhitlari, sensibilizatorlar, Ti:Sa, Geliostat ko'zguli parabolik konsentrator (PK), ikkilamchi konsentratorga quyosh nurlarini yanada fokuslovchi asferik linza, konus shaklidagi ikkilamchi konsentrator.

Tadqiqotning predmeti quyosh nurlarining bir va ko'p sterjenli lazer faol muhiti bilan o'zaro ta'sirlanishidagi fizik jarayonlari: fotonlarning faol muhitda yutilishi, temperatura taqsimoti, temperatura taqsimotiga bog'liq bo'lgan termik stress, quyosh nurlanishining keng polosali spektri bilan optik damlangan faol muhitlarda lazer nurlanishini hosil qilish jarayonlari.

Tadqiqotning usullari. Lazerning bir va ko'p sterjenli (KS) faol muhiti, quyosh nurlanishi va faol muhitlarning spektral xususiyatlari hisobga olinib, lazer tizimlarida sodir bo'ladigan tasodifiy jarayonlarni simulyatsiya qilishga asoslangan usullar qo'llaniladi. Simulyatsiya modeli (SM) Monte-Karlo fotonlar yo'lini kuzatish metodidan foydalanishga asoslanadi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

ilk bor Monte-Karlo foton yo'lini kuzatish metodi asosida ko'p sterjenli quyosh lazerining simulyatsion modeli ishlab chiqilgan;

ilk bor Nd:YAG bilan Ti:Sa sensibilizatorini kombinatsiyasi asosidagi kompozit strukturali Nd:YAG/Ti:Sa/Nd:YAG faol muhit uchun simulyatsion modeli ishlab chiqilgan va chiqish quvvatini 25% gacha oshirish mumkinligi ko'rsatilgan;

uch sterjenli quyosh lazerining simulyatsiya modelini ishonchliligi eksperimental tadqiqotda olingan ma'lumotlar bilan solishtirish asosida tasdiqlangan (model validatsiya qilingan) va bunda hisoblash aniqligi 5% atrofida bo'lishi ko'rsatilgan;

Nd:YAG, Ce:Nd:YAG va Cr:Nd:YAG faol muhitlarini uch sterjenli quyosh lazerlarida ishlatilishida qiyosiy baholangan. Unga ko'ra Cr:Nd:YAG da eng

yuqori samaradorlikka erishish mumkinligi, ya'ni Cr:Nd:YAG uchun samaradorlik Nd:YAG ga nisbattan 2 baravar, Ce:Nd:YAG ga nisbattan esa 1.7 baravar yuqori chiqishi aniqlangan;

past va yuqori optik damalash quvvatida quyosh lazerining turli xil ko'p sterjenli konfiguratsiyalarini o'rganish natijasida, ko'p sterjenli konfiguratsiyalar orqali termik muammolarni hal qilish mumkinligi ko'rsatilgan va bunda 7 sterjenli konfiguratsiya uchun samardorlik eng yuqori chiqishi aniqlangan;

ilk bor termal effektlarni hisobga olgan holda, ko'p sterjenli konfiguratsiyalar umumiy effektiv hajmi bir hil bo'lgan bir sterjenlik konfiguratsiyaga nisbatan lazer chiqish quvvati taxminan 2.5 baravargacha yuqoriroq bo'lishi mumkinligi simulyatsiya usuli bilan aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

Monte-Karlo foton yo'lini kuzatish metodi asosida ko'p sterjenli quyosh lazerining simulyatsion modellari yaratilgan;

kompozit strukturali Nd:YAG/Ti:Sa/Nd:YAG faol muhit asosidagi lazer uchun simulyatsion model yaratilgan;

Nd:YAG, Ce:Nd:YAG va Cr:Nd:YAG faol muhitlarini uch sterjenli quyosh lazerlarida ishlatilishida Cr:Nd:YAG uchun samaradorlik eng yuqori ekanligi asoslangan;

ko'p sterjenli konfiguratsiyalar orqali termik muammolarni hal qilish mumkinligi asoslangan;

7 sterjenli lazer konfiguratsiyasi uchun samardorlik eng yuqori chiqishi ko'rsatilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchligi fotonika va lazer fizikasidagi hozirgi kundagi usullar va yondashuvlardan foydalanilganligi bilan tasdiqlanishi, olingan natijalar lazer faol muhitida yuz beradigan optik jarayonlarning fizik mexanizmlari bo'yicha fundamental nazariy tadqiqotlarga asoslanganligi va boshqa tadqiqotchilarning ilmiy natijalariga to'liq mos kelishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati quyosh bilan damlanadigan bitta va ko'p sterjenli ishlab chiqilgan yangi simulyatsion model quyosh yordamida optik damlanadigan lazerlar samardorligini oshirish bo'yicha nazariy tadqiqotlar olib borishda va optimal yechimlarini aniqlashda qo'llanilishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati, taklif qilinayotgan ilmiy yechimlar quyosh nurida ishlaydigan ko'p sterjenli lazerlarning optimal konfiguratsiyalarini aniqlash, samardorligini oshirish, quyosh energiyasidan foydalanishda yangi samarali texnologiyalarni ishlab chiqish va yaratishda foydalanish mumkinligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Quyosh nurida ishlaydigan ko'p sterjenli lazerlar bo'yicha olingan ilmiy natijalar loyihalarda:

ko'p sterjenli lazer uchun yutilish, temperatura taqsimoti va termik stress jarayonlarini modellashtirishda olingan ilmiy natijalar xorijiy nashrlardagi bir qator tadqiqotlarda (1. Costa, H., Liang, D., Matos, A., & Almeida, J. (2024, September). Multi-Fresnel-lens pumping approach for simultaneous emission of

seven TEM00-mode beams with 3.73% conversion efficiency. Photonics Vol. 11, No. 9, p. 889, MDPI; 2. Almeida, J., Costa, H., Vistas, C. R., Tibúrcio, B. D., Matos, A., & Liang, D. (2024). Multirod Pumping Approach with Fresnel Lens and Ce: Nd: YAG Media for Enhancing the Solar Laser Efficiency. Energies, 17(22), 5630; 3. Matos, A., Liang, D., Costa, H., Tibúrcio, B. D., & Almeida, J. (2025). Five-Ce: Nd: YAG-rod solar laser approach with TEM00-mode collection efficiency of 51.7 W/m². Applied Optics, 64(4), 797-807; 4. Boutaka, R., Liang, D., Bouadjemine, R., & Hendaoui, N. (2024). Design of high-power Nd: YAG solar laser pumped with off-axis parabolic concentrators. Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications, 18(November-December 2024), 516-524) foydalanilgan. Natijalardan foydalanish ko‘p sterjenli laser konfiguratsiyalari uchun simulyatsion modellar yordamida o‘tkazilgan nazariy tadqiqotlarda lazerlarning samaradorligini 1.5 baravardan ko‘proqqa oshirish mumkinligini asoslash imkonini bergan;

Monte-Karlo foton yo‘lini kuzatish metodi asosida ishlab chiqilgan model asosida olingan natijalardan O‘zR FA Materialshunoslik instituti “O‘zbekiston Respublikasi fanlar Akademiyasi Materialshunoslik instituti Quyosh Sandonida sintez qilingan keramikalarda fazaviy o‘zgarishlar jihatlari” mavzusidagi AL-4821023123 loyihasida ilmiy-texnikaviy vazifalarini bajarishda foydalanilgan (O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasining 2024-yil 17-dekabrda № 2/1255-2797 sonli ma’lumotnomasi). Natijalardan foydalanish geliostat va konsentrator fasetlarining egrilik radiusi noaniqliklarining konsentrator fokusidagi nurlanishga kuchli ta’sir qilishini aniqroq tavsiflash imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 7 ta konferentsiyada, jumladan, 3 ta xalqaro va 4 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida ma’ruza qilingan va muhokamadan o‘tgan. 1 ta kompyuter dasturiga guvoxnoma olingan.

Tadqiqot natijalarining e‘lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha olingan asosiy natijalar jami 12 ta ilmiy ishlarda chop etilgan, ulardan 4 ta ilmiy maqola, shu jumladan 1 ta xalqaro (Web of Science/Scopus bazasidagi jurnalida) va 3 ta maqola O‘zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyasining asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan jurnallarida nashr etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya ishning tuzilishi kirish, 4 ta bob, xulosalar, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovalardan iborat. Ilmiy ishning hajmi 107 bet matndan iborat bo‘lib, ularda 37 ta rasm va 7 ta jadval mavjud.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning **kirish** qismida tadqiqot mavzusining va bu mavzuga oid tadqiqotlarning dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning maqsad va vazifalari shakllantirilgan, tadqiqot obyekti, predmeti va metodlari, shuningdek dissertatsiya tadqiqotining respublikada fan va texnologiyalarni rivojlantirishning

ustuvor yo‘nalishlari bilan muvofiqligi aniqlangan. Tadqiqotning ilmiy yangiligi bayon qilingan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, ularning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, natijalarning joriy etilishi, aprotatsiyasi, shuningdek dissertatsiya hajmi va tuzilishi to‘g‘risidagi ma‘lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning « **Muammoning zamonaviy holati** » nomli **birinchi bobida** adabiyotlar tahlili asosida so‘ngi vaqtlardagi tadqiqot natijalariga ko‘ra quyosh lazerlarida faol muhitni ikkita usul bilan optik damlash mumkin. Birinchisi ko‘ndalang optik damlash, ikkinchisi bo‘ylama va ko‘ndalang optik damlash orqali faol muhitda invers bandlik hosil qilinib lazer nuri olinadi. Ikkilamchi konsentratorida joylashgan faol muhitni bo‘ylama va ko‘ndalang damlash rejimida ishlatilsa quyosh lazerining samaradorligi yuqori chiqishi aniqlangan. Lekin bo‘ylama-ko‘ndalang (kombinatsion) damlash rejimida yorug‘lik yutilish taqsimoti notekis taqsimlangani uchun faol muhitni ishlatishda qo‘shimcha termik muammolar yuzaga keladi. Bunday termik effektlar (jarayonlar) lazer kristalini sinishiga, lazer pastki energiya sathining termik bandligini oshirishga, termik linza hosil bo‘lishiga va shunga o‘xshash boshqa oqibatlariga olib keladi va lazer umumiy samaradorligiga salbiy ta‘sir qiladi.

Shunday qilib, yuqorida keltirilgan adabiyotlar tahlili natijalari asosida quyosh lazerlarining asosiy muammolari aniqlandi va dissertatsiya ishi uchun maqsad va vazifalar belgilandi.

Dissertatsiyaning “**Parabolik konsentratorli quyosh lazeri**” nomli **ikkinchi bobida** dissertatsiyada qo‘yilgan masalalarni yechish uchun mo‘ljallangan quyidagi tajriba qurilmalari va usullaridan: Monte-Karlo foton yo‘lini kuzatish metodi (MCPT-Monte-Carlo Photon Tracing), Quyosh nurlanishi spektri, Nd:YAG faol muhitining yutilish spektrlari, Monte-Karlo foton yo‘lini kuzatish metodi asosida ishlab chiqilgan simulyatsion modelda Nd:YAG faol muhiti uchun CdZnS ni tashqi sensibilizator sifatida foydalanish, Geliostat - parabolik konsentratorlardan foydalanilgan. Ushbu bobda yuqorida keltirilgan tajriba qurilmalari va usullarining har biri to‘g‘risida ma‘lumot berilgan.

Dissertatsiyaning “**Kichik quvvatlarda ishlaydigan bir va uch sterjenli quyosh lazerlari**” nomli **uchinchi bobida** Ushbu bobda quyosh lazerlari uchun bir nechta sterjenli faol muhitlarni ko‘ndalang va kombinatsion damlash rejimlarida ishlashi o‘rganilgan. Uch sterjenli Ce:Nd:YAG quyosh lazerining simulyatsion modeli ishlab chiqilib eksperiment natijalari bilan solishtiriladi. Ishlab chiqilgan simulyatsion modelning ishonchliligini eksperimental tadqiqot parametrlarida solishtirilgan. Uch sterjenli quyosh lazerlarining simulyatsion modeli ishlash jarayonlari tekshirilgan.

Bu yerda taqdim etilgan simulyatsiya modeli yaqinda elon qilingan uch sterjenli Ce:Nd:YAG aktiv muhitlarida o‘tkazilgan eksperimental tadqiqotga asoslangan. Bu yerda biz quyidagi qismlar va elementlardan iborat quyosh lazerini ko‘rib chiqamiz:

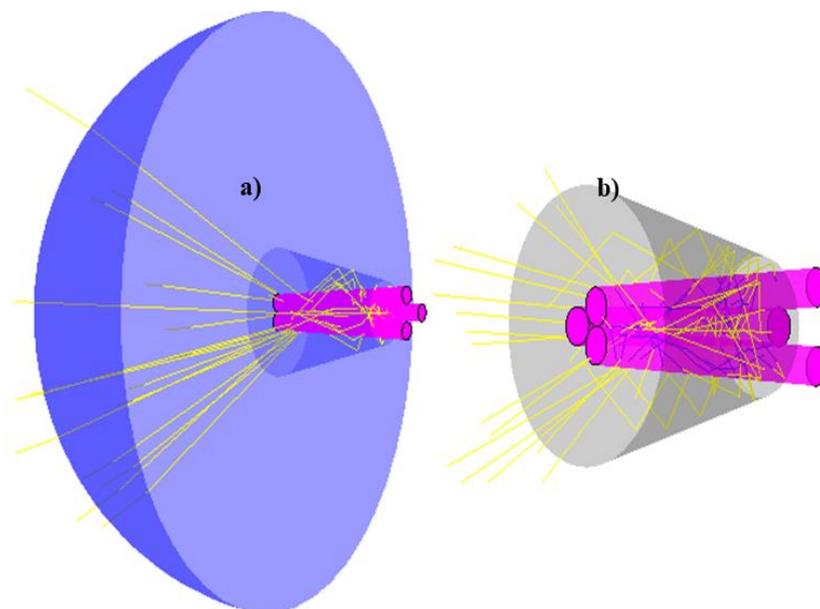
- Parabolik konsentrator

Ushbu ish parabolik konsentrator bilan geliostat ko‘zgularining kombinatsiyasi birlamchi konsentrator sifatida ko‘rib chiqiladi. Geliostat

ko'zgulari va kumush bilan qoplangan parabolik konsentratorning sirtini qaytarish koeffitsiyenti mos ravishda 93,5% va 80% ga o'rnatiladi. Natijada umumiy qaytarish koeffitsiyenti 74,8% ga teng bo'ladi. Parabolik konsentratorning yuzasi 0,5 m² deb hisoblandi, shundan lazer tizimini soyasi 0,1 m² ekanligi aniqlandi. Ushbu parametrlar ishlab chiqilgan simulyatsiya modelida sozlanishi yoki osongina o'zgartirilishi mumkin.

- Asferik linza

Ikkilamchi konsentrator va asosiy konsentrator tizimi o'rtasida diametri 84 mm, qalinligi 37 mm, old yuzasi egrilik radiusi 43 mm bo'lgan asferik linza (1a-rasm) joylashtirilgan. Asferik linza asosiy konsentratoridan keladigan quyosh nurlarini yanada ko'proq fokuslash uchun ishlatiladi. 1b-rasmda konus shaklidagi ikkilamchi konsentrator va uchta sterjenli faol muhit sxematik tarzda taqdim etilgan.



1-rasm. Ikkilamchi konsentrator. a) Asferik linza va ikkilamchi konsentrator b) Konus shaklidagi ikkilamchi konsentrator.

- Konussimon ikkilamchi konsentrator

Kesik konus shaklidagi ikkilamchi konsentrator tarqoq quyosh nurlarni aktiv elementlarga qayta yo'naltirishga yordam beradi (1b-rasm). Uzunligi 1,9 sm bo'lgan kesik konus shaklidagi konsentratorning katta asosi diametri $D=0,9$ sm va kichik asosi diametri $d=0,45$ sm bo'lishi hisobga olinadi. Yana bir muhim parametr - bu ikkilamchi konsentrator ichki devorlarini qaytarish koeffitsiyenti 94% ga teng qilib o'rnatilgan.

- Sovutish tizimi

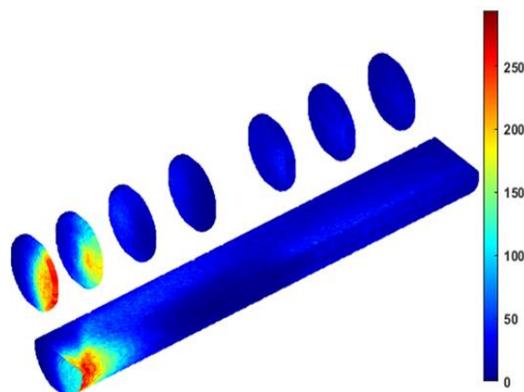
Quyosh lazeri faol muhitlarida harorat rejimini aniqlash uchun lazer sterjenlari yuzasida issiqlik uzatish koeffitsientini o'rnatish kerak. Biz bu koeffitsientlarni 100 sm³/s oqim tezligini va 20⁰ C sovutish suvi haroratini etiborga olgan holda hisobladik.

Ushbu tadqiqotda foydalanilgan simulyatsiya modeli havola qilingan eksperimental tadqiqotda konsentratorning geometrik va fizik parametrlarini yaqindan moslashtirish uchun mo'ljallangan. 1.jadvalda quyosh lazerining

chiqish samaradorligini aniqlash uchun zarur bo'lgan boshqa tegishli parametrlar (turli manbalardan olingan) bilan birga simulyatsiya modelidan olingan taxminiy parametrlar keltirilgan. Jadvaldagi parametrlarga P_{abs} - lazer faol muhiti ichida yutilgan energiya, P_{pump} - ikkilamchi konsentratorga kiradigan umumiy energiya, N_{abs} - yutilgan fotonlar soni, N_{pump} - konsentratorga tushgan fotonlarning umumiy soni.

Jadval.1. Lazer chiqish quvvatini hisoblash uchun zarur bo'lgan parametrlar

Parameters	Ce:Nd: YAG
Yutilish samaradorligi P_{abs} / P_{pump}	$(23.92 \pm 0.001) \%$
Yutilish samaradorligi N_{abs} / N_{pump}	$(16.63 \pm 0.001) \%$
Ichki yo'qotish	0.004
Kvant samaradorligi	0.86
Yutilish taqsimoti va rezonator modasining o'zaro moslik koeffitsiyenti	0.94
Sovutish suvi harorati	$20 \text{ }^\circ\text{C}$
Sterjen uzunligi	2.5 sm
Sterjen radiusi	0.125 sm
Nur sindirish ko'rsatgichi	1.8
Rezonator chiqish ko'zgusi qaytarish koeffitsiyenti	97.5 %



2-rasm. Nisbiy yutilish (yutilgan fotonlar soni) taqsimoti

1-jadvalda keltirilgan parametrlar, 2-rasmda ko'rsatilgan yutilish taqsimoti bilan bir qatorda, to'rt sathli lazerlar uchun tezlik tenglamalari orqali damlash quvvati

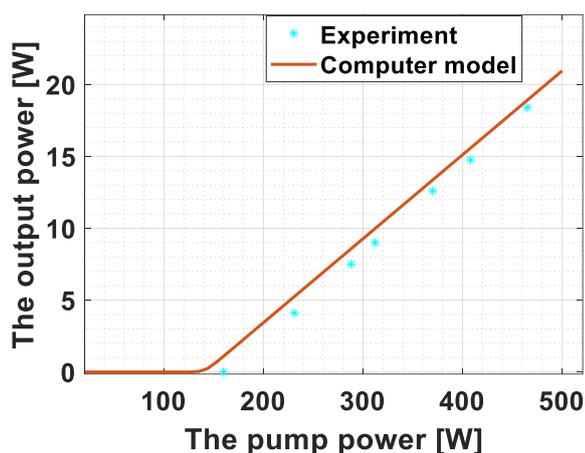
va quyosh lazerining chiqish quvvati o'rtasidagi munosabatni ifodalash uchun foydalaniladi:

$$\phi = \tau_c \iiint_{\text{volume}} \frac{R_p(1+f) - fN_t / \tau}{(1+f) + V / (\phi c \sigma_e \tau |u|^2)} dV \quad (1)$$

Keyin chiqish quvvati quyidagicha aniqlanadi.

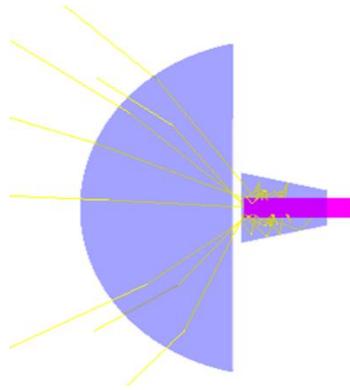
$$P_{out} = k\phi \quad (2)$$

bu yerda proportsionallik koeffitsienti $k = hv\gamma_2 c / 2L_e$ (bu yerda γ_2 rezonator chiqish ko'zglasining o'tkazish koeffitsiyenti, L_e konsentrator uzunligi, h -Plank doimiysi, ν -laser nuri chastotasi, c -yorug'lik tezligi) bu rezonator parametrlariga bog'liq. 1) formula kvazi-uch sathli lazer tizimlari uchun tezlik tenglamalaridan olingan. Binobarin, hisoblashdagi noqulayliklarga qaramay, aniqlik yuqori. 3-rasmda eksperimental tadqiqotlardan olingan ma'lumotlar nuqtalari bilan birga modellashtirilgan chiqish chizig'i (qizil chiziq bilan) ko'rsatilgan. Ushbu grafikdagi natijalar simulyatsiya modeli va eksperiment o'rtasidagi yuqori darajadagi moslikni ko'rsatdi. 3-rasmda ushbu moslikning ko'rinishi keltirilgan va ishlab chiqilgan model ko'p sterjenli lazerlarni o'rganish uchun ishlatilishi mumkinligini aniqlandi.



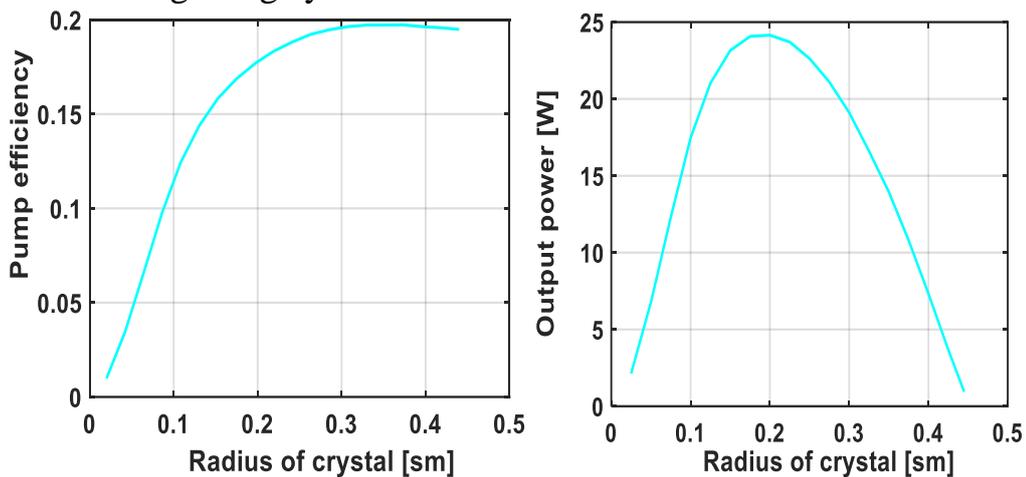
3-rasm. Quyosh lazerida chiqish quvvatining kirish quvvatiga bog'liqligi

Dissertatsiyaning to'rtinchi bobi **“Yuqori quvvatlarda ishlaydigan bir va ko'p sterjenli quyosh lazerlari”** deb nomlangan va ushbu bobda Monte-Karlo foton yo'lini kuzatish metodi bilan ko'p sterjenli turli konfiguratsiyali quyosh lazerlarining simulyatsion modeli ishlab chiqiladi. Past (<1kWatt) va yuqori (>1kWatt) optik damlash rejimlarida bitta sterjenli va ko'p sterjenli quyosh lazerlari o'rtasida ishlash samaradorligini taqqoslandi. Bu ishda ko'p sterjenli konfiguratsiyalarning yutish samaradorligi bilan bitta sterjenli faol muhit yutilish samaradorligi o'rganib chiqiladi. Termal effektlarni hisobga olib ko'p sterjenli konfiguratsiyalarning lazer chiqish quvvati samaradorligiga ta'siri qanday bo'lishi aniqlanadi. Aniqlangan natijalar asosida quyosh lazeri chiqish quvvatiga nimalar kuchliroq tasir qilishi o'rganib chiqiladi. Agar ko'p sterjenli lazerlardan foydalanish istiqbolli bo'lsa bu turdagi konfiguratsiyani quyosh lazerlarida samarali foydalanish imkoniyatlari o'rganib chiqiladi.



4-rasm. Ikilamchi konsentratorida joylashtirilgan bir sterjenli faol muhit

Qaralayotgan ikkilamchi konsentrator uchun bir sterjenli faol muhitning optimal radiusini topishda quyidagi 4-rasmda tasvirlangan simulyatsion modeldan foydalanildi. Simulyatsion model asosida hisoblangan natijalar 5-rasmda ko'rsatilgan, (a) faol muhit sterjen o'lchamiga nisbatan yutilish samaradorligi qiymatlari tasvirlangan. Yutilish samaradorligi radius ortishi bilan proporsional ortib borishini ko'rsatadi, ammo sterjen radiusi 0,25 sm etganidan so'ng, yutilish samaradorligining o'zgarishi juda kichik bo'lib, ikkilamchi konsentrator chegarasiga yetadi.



5-rasm. a) Turli radiusli sterjenlar uchun yutilish samaradorligi va b) Sterjen radiuslariga mos keladigan lazer chiqish quvvatlari.

Endi muhokama qilinishi kerak bo'lgan savol, ko'p sterjenli tizimlar bitta sterjenli quyosh lazer tizimlaridan ustun turadimi. Yuqorida aytib o'tilganidek, qiyosiy mezonni yaratish muhimdir. Ushbu taqqoslash uchun biz ko'p sterjenlar va bitta sterjen hajmlari quyidagicha teng bo'lishini taklif qilamiz:

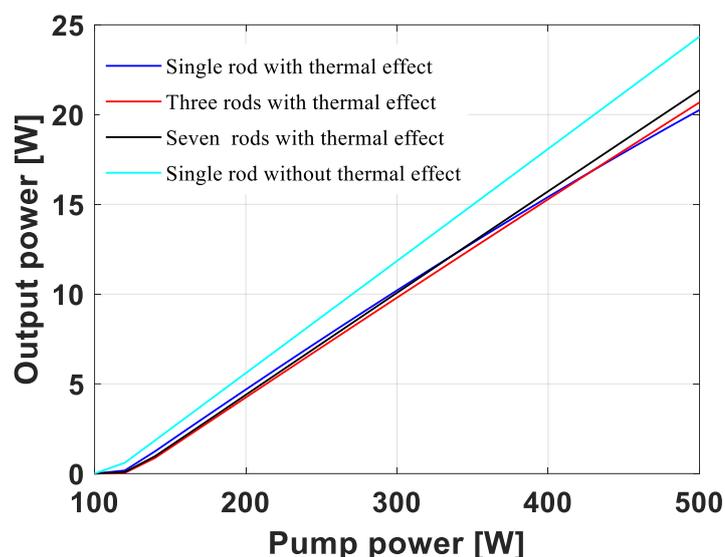
$$\sum_{i=1}^n r_i^2 = R^2. \quad (3)$$

bu yerda r_i - ko'p sterjenli faol muhitlardan birining radiusini, R - esa bitta faol muhitning radiusini bildiradi. Dastlab, quyosh lazerining samaradorligini oshirish uchun optimal 0,2 sm bitta sterjenni kichikroq sterjenlarga bo'lish, ko'rsatilgan.

2.Jadval. Ko‘p turli konfiguratsiyalarni 0,2 sm bo‘lgan bitta sterjen bilan taqqoslash

Sterjenlar soni	Sterjenlar radiusi [sm]	Yutilish samaradorligi %	Sterjenlar soni	Sterjenlar radiusi [sm]	Yutilish samaradorligi %
1	0.2	16.84	6	0.0816	15.67
2	0.1414	15.37	6	0.0816	15.31
3	0.1155	15.77	7	0.0756	15.73
4	0.1	15.63	7	0.0756	15.03
4	0.1	15.1	8	0.0707	14.7
5	0.0894	15.44	8	0.0707	15.46
5	0.0894	14.88			

Natijalar shuni ko‘rsatdiki, yutilish samaradorligi bitta sterjenli faol muhit konfiguratsiyasida yuqori qiymatiga yetadi va har qanday ko‘p sterjenli konfiguratsiyalar erishilgan darajadan yuqori chiqdi. Biroq, etiborli jihati shundaki 2 jadvalda uch va yetti sterjenli faol muhitlar yutilish samaradorligi bitta sterjenli konfiguratsiyasining yutilish samaradorligiga deyarli mos keladi va jadvalda sezilarli darajada ajralib turadi. Yutilish xususiyatlarini solishtirgandan so‘ng, bu ishda termal effektlarni hisobga olgan holda bitta, uch va yetti sterjenli konfiguratsiya uchun lazer ko‘rsatkichlari tahlil qilindi. Quvvat 500 Watt damlash darajasiga ko‘tarilganda issiqlik effektlari sezilarli bo‘ladi. Ko‘p sterjenli konfiguratsiyalarning bir sterjenliga nisbatan biroz yaxshilanishi kuzatilmoqda. Kichikroq quvvatli, shartli ravishda 1 kWatt dan past bo‘lgan konsentratorlar uchun ko‘p sterjenli konfiguratsiyalar bir faol muhitli konfiguratsiyaga nisbatan lazer chiqish quvvati samaradorligini sezilarli darajada yaxshilamaydi. Shunga qaramay, ba’zi bir ko‘p sterjenli konfiguratsiyalar, masalan, uch va yetti sterjenli konfiguratsiyalar, bitta sterjenli faol muhitga nisbatan biroz yuqoriroq samaradorlikni keltirib chiqarishi mumkin.



6-rasm. Radiusi 0,2 sm bo‘lgan bitta sterjen uchun lazer ko‘rsatkichlari va mos keladigan ko‘p sterjenli konfiguratsiyalar.

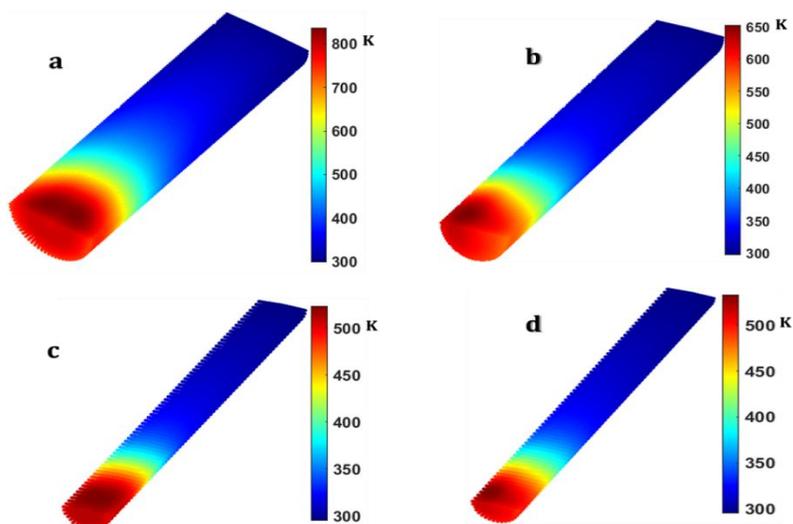
Shunday qilib, bizning maqsadimiz oldingi bo‘limda bo‘lgani kabi, shartli ravishda 1 kWatt dan oshadigan yuqori damlash quvvati ostida bitta sterjenli va ko‘p sterjenli quyosh lazerlarini tekshirishdir. Lazer chiqish quvvatining maksimal chiqish quvvati 0.25 sm bo‘lganda erishildi.

3.Jadval. Eng yuqori ko‘rsatkichli ko‘p sterjenli konfiguratsiyalar

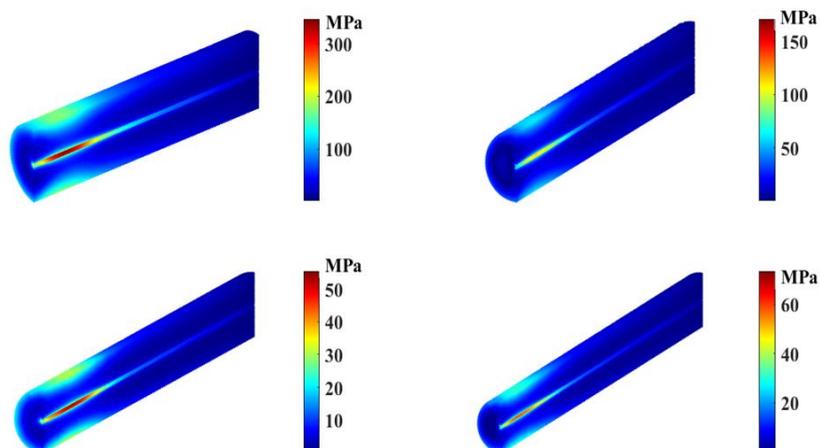
Sterjenlar soni	Sterjenlar radiusi [sm]	Yutilish samaradorligi %
1	0.25	16.88
3	0.1443	16.2
7	0.0945	16.47

Bitta sterjen, uch sterjenli konfiguratsiya va yetti sterjenli konfiguratsiyalarda samaradorlik mos ravishda 16,88%, 16,2% va 16,47% ni tashkil qiladi. Termal effektlarni hisobga olgan holda lazer chiqishini quvvatini hisoblash uchun sterjenlarda harorat taqsimotini hisoblab chiqdik. Ularning shakli va qiymatlari bo‘yicha harorat taqsimoti 7-rasmda ko‘rsatilgan: (a) bitta sterjen maydoni 800 K dan oshadigan, ikkinchisi (b) haroratlar pastroq bo‘lgan uchta sterjen, taxminan 650 K, c) yettitalik sterjenda maksimal temperatura 500 K bo‘lishi aniqlandi. 8-rasmda hisoblangan mexanik termik yuklama taqsimotlari tasvirlangan. Sinish kuchlanishining maksimal chegarasi 250 MPa deb faraz qilsak, radiusi 0,25 sm bo‘lgan sterjen 1300 watt damlash quvvatiga erishganda, yorilish sodir bo‘ladi. Shunisi e‘tiborga loyiqki, 8-rasmda tasvirlangan boshqa

kristallarning termik yuklamasi darajasi sinish chegarasidan ancha past bo'lishi aniqlandi.

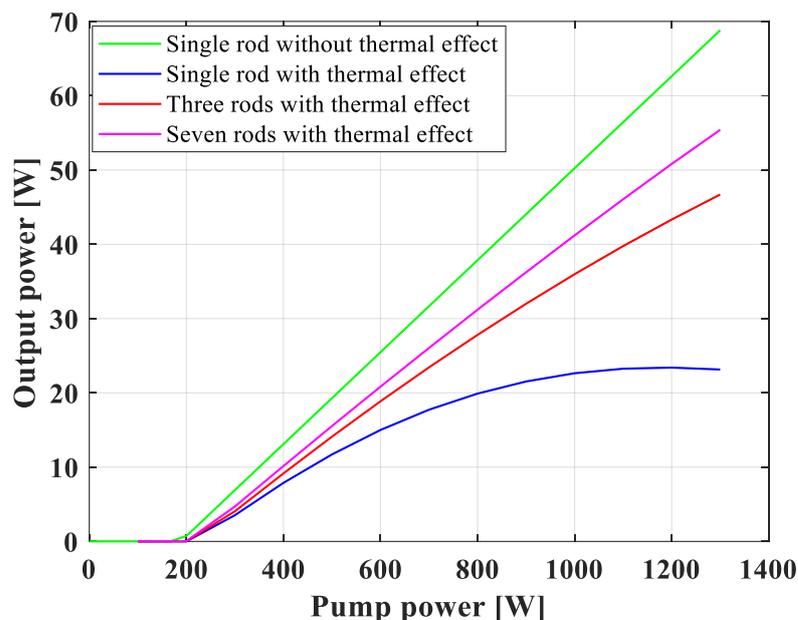


7-rasm. 1300 watt optik damlash quvvatida (a) bitta sterjenda, (b) uchta sterjendan biri, (c) yetti sterjendan iborat markaziy faol muhit va (d) yetti sterjendan bitta tashqi faol muhit haroratning taqsimlanishi.



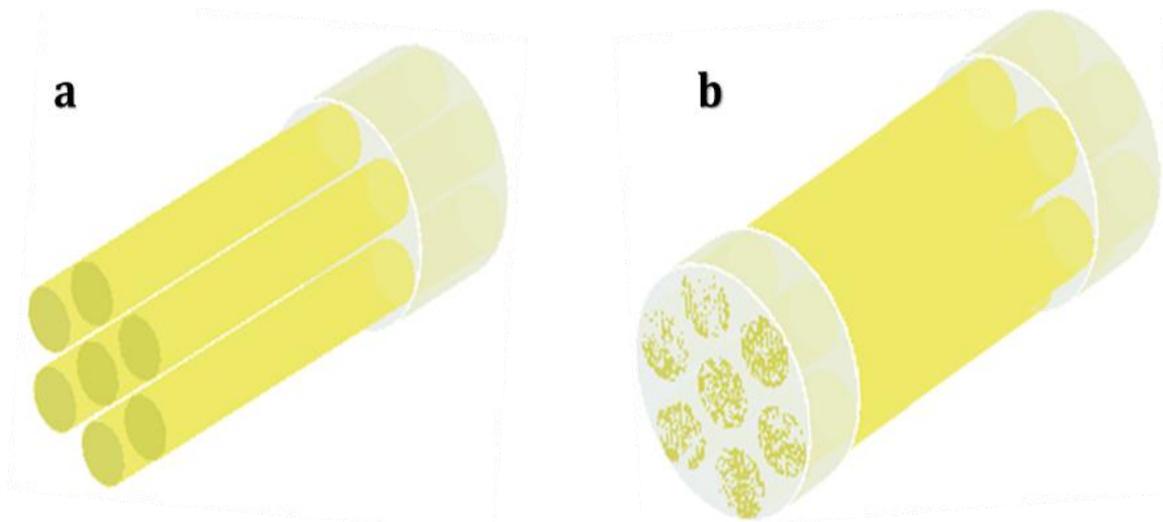
8-rasm. 1300 watt damlash quvvatida a) bitta sterjenli, b) uchta sterjenlidan biri, c) yettita sterjenlining markaziy faol muhit va d) yetti sterjenning bitta tashqi qismidagi termik yuklamaning taqsimlanishi.

Keyinchalik, 1 va 2 tenglamalarda belgilangan harorat va yutilish taqsimotidan foydalanib, lazer chiqish quvvatlari aniqlandi. Natijalar 9-rasmda tegishli belgilar bilan berilgan.



9-rasm. Termal effektlarni hisobga olgan holda lazer chiqish quvvati.

Rasmda haroratning ta'siri etiborga olinmagan ideal munosabat mavjud bo'lib, u yashil chiziq bilan belgilab, harorat ta'sirini to'liq bartaraf etishni nazarda tutadi. Ko'rishimiz mumkinki, kattaroq o'lchamdagi, shartli ravishda 1kW dan yuqori bo'lgan konsentratorlar uchun ko'p sterjenli konfiguratsiyalar yuqori samaradorlikni namoyish etadi. Ko'rinib turibdiki, ko'p sterjenli konfiguratsiyadan foydalanish harorat ta'sirini qisman yumshatadi va lazerning chiqish quvvatlarini mavjud ideal holatdagi qiymatga yaqinlashtiradi. Binobarin, diametrlarini qisqartirgan holda sterjenlar sonini ko'paytirish samarali sovutishni osonlashtiradi va natijada lazerning chiqish quvvati samaradorligini oshiradi. Tadqiqot natijalariga ko'ra quyosh lazerlari uchun yuqori optik damlash quvvatlarida ko'p sterjenli konfiguratsiyalar samaradorlikni oshirishi aniqlandi. Biroq, ularni amalga oshirish eksperimental amalga oshirishda qo'shimcha texnik muammolarni keltirib chiqaradi. Shu tarzda, ko'p rezonatorlar, xususan, quyosh kuzatuv tizimlari bilan jihozlangan mobil quyosh lazerlarida, ularni joylashtirishda muayyan qiyinchiliklarga olib kelishi mumkin. Aslida, bunga erishish texnik jihatdan mumkin emas deb mulohaza qilish mumkin, masalan, katta hajmdagi quyosh konsentratorlari uchun o'nta aktiv muhitli sterjen. Shuning uchun biz bir nechta sterjenlarni birlashtirish uchun diffuzion bog'lash texnologiyasidan DB (Difuzion bog'lash) foydalangan holda bitta rezonator orqali ko'p sterjenli konfiguratsiyasini birlashtirishni taklif qilamiz 10-rasm. Ushbu yondashuv nafaqat ko'p rezonatorli tizimlar bilan bog'liq muammolarni chetlab o'tibgina qolmay, balki ko'p sterjenli rejimda kuchli lazer nurlarini yaratishga imkon beradi, bu esa har bir sterjendan lazer chiqishini birlashtirish zaruratini yo'q qiladi.



10-rasm. a) Bir tamoni birlashtirilgan ko‘p sterjenli faol muhitlar va b) Bitta rezonator uchun ikkita tamoni diffuzion bog‘lash usuli bilan birlashtirilgan ko‘p sterjenli faol muhitlar.

XULOSA

1. Monte-Karlo foton yo‘lini kuzatish metodi asosida ko‘p sterjenli va sensibilizatorli Quyosh lazerlarining simulyatsion modelari ishlab chiqildi.

2. Monte-Karlo foton yo‘lini kuzatish metodi yordamida Nd:YAG bilan Ti:Sa sensibilizatori asosidagi kompozit strukturali faol muhit uchun simulyatsion modeli ishlab chiqildi. 450 watt kirish quvvatida Nd:YAG, kompozit strukturali Ti:Sa/Nd:YAG va Nd:YAG/Ti:Sa/Nd:YAG faol muhitlarda mos ravishda yutilish samaradorligi 12.68 %, 13.78 %, 14.5 %, ekanligi aniqlandi. Yutilish samaradorliklariga proporsional ravishda quyosh lazerining maksimal chiqish quvvatlari 11 watt, 12.7 watt va 13.74 watt qiymatlarga oshishi aniqlandi. Aktiv elemntga Nd:YAG/Ti:Sa/Nd:YAG ko‘rinishda sensibilizator joylashtirilsa chiqish quvvatini 25% gacha oshirish mumkinligi aniqlandi.

3. Nd:YAG, Ce:Nd:YAG va Cr:Nd:YAG faol muhitlarini quyosh lazerlarida ishlatilishida qiyosiy baholash uchun ko‘p sterjenli faol muhitlardan iborat bo‘lgan quyosh lazerining simulyatsion modeli ishlab chiqildi. Natijalarni taqqoslash shuni ko‘rsatdiki, eng yuqori samaradorlikka Cr:Nd:YAG dan foydalanganda erishildi. Quyosh nurlarining 500 Watt damlash quvvatida umumiy samaradorlik 5% ni tashkil etdi, bu Nd:YAG lazeridan ikki baravar yuqori, Ce:Nd:YAG samaradorligi esa Nd:YAGdan taxminan 1,7 baravar yuqoriligi aniqlandi. Cr:Nd:YAG ning chiqish quvvatining yuqori bo‘lishi uning yutilish spektri bilan tushuntirish mumkin. Yani Cr ionlarining yutilish koeffitsiyentlari Ce ionlarinikiga nisbatan kichikroq bo‘lganligi uchun fotonning

yutilish uzunligi katta bo‘ladi. Faol muhit bo‘ylama va kombinatsion rejimda ishlatilganda faol muhitning 2.5 smga teng uzunligi yutilish uchun yetarli bo‘lishi aniqlandi.

4. Bo‘ylama va kombinatsion optik damlash rejimida ishlaydigan quyosh lazerlari uchun ko‘p sterjenli konfiguratsiya simulyatsiya usuli yordamida o‘rganiladi. Monte-Karlo foton yo‘lini kuzatish metodidan foydalangan holda uch sterjenli quyosh lazerining simulyatsiya modelini ishlab chiqildi. Ushbu simulyatsion modelning ishonchligi yaqinda elon qilingan eksperimental ma’lumotlardan foydalangan holda tasdiqlandi (validatsiya qilindi).

5. Quyosh lazerining ishlashini baholash uchun qiyosiy taqqoslash amalga oshirildi va turli xil ko‘p sterjenli konfiguratsiyalarni o‘rganish natijasida, uchta va yetti sterjenli konfiguratsiyalar orqali termik muammolarni hal qilish mumkinligi ko‘rsatildi.

6. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, ko‘p sterjenli konfiguratsiyalarning yutish samaradorligi bitta sterjenli faol muhitnikiga to‘liq yetib bormasa ham, ular juda yaqin chiqdi. Biroq, termal effektlarni hisobga olgan holda, ko‘p sterjenli konfiguratsiyalar sezilarli darajada yaxshilangan lazer chiqish quvvatini ko‘rsatdi. Aslida, bitta sterjenli faol muhit o‘rniga ko‘p sterjenli konfiguratsiyalardan foydalanish chiqish quvvatini ikki baravar oshirdi. Ushbu natijani uchta asosiy omilga bog‘lash mumkin: Yutilish taqsimoti, rezonator yo‘qotishlari va termal effektlar. Bir nechta sterjenlarni o‘z ichiga olgan konfiguratsiyalar bilan bog‘liq texnik muammolarni hal qilsih bo‘yicha yangi yechimlar taklif qilindi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ УРГЕНЧСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ ИМЕНИ АБУ РАЙХАНА БЕРУНИ**

**ИНСТИТУТ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

БЕГИМҚУЛОВ ШЕРЗОД АБДИРАСУЛОВИЧ

МУЛЬТИ-СТЕРЖНЕВЫЕ ЛАЗЕРЫ С СОЛНЕЧНОЙ НАКАЧКОЙ

01.04.11- Лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам**

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве Высшего Образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за B2024.3.PhD/FM1160

Диссертация выполнена в Институт ионно-плазменных и лазерных технологий. Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице научного совета (www.urdu.uz) и на Информационно-образовательном портале «Ziyonet» (www.ziyonet.uz)

Научный руководитель:

Пайзиев Шермахамат Далиевич
доктор физика-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Ешқобилов Нафас Бекназарович
доктор физика-математических наук, профессор

Ешонқулов Гофур Бобоқулович
кандидат физико-математических наук, доцент

Ведущая организация:

Ташкентский государственный технический университет

Защита диссертации состоится «16» май 2025 года в 19:00 часов на заседании Научного совета PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 при Ургенчском государственном университете. (Адрес: 220100, г. Ургенч, ул. Х. Алимджана, дом 14. Тел.: (99862)224-66-11, факс: (99862) 224-67-00.)

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ургенчского государственного университета (зарегистрирована за № 795). (Адрес: 220100, г. Ургенч, ул. Х.Алимджана, дом 14. Тел.: (99862) 224-66-11, факс: (99862) 224-67-00.)

Автореферат диссертации разослан « » 2025 года.
(протокол рассылки № от « » 2025 года).



У.О. Кутлиев,

Председатель научного совета по присуждению ученых степеней, доктор физико-математических наук, профессор

К.Р. Якубов,

Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученой степени, кандидат физико-математических наук, доцент

У.К. Сапаев,

Председатель научного семинара при Научном совете по присуждению ученой степени, доктор физико-математических наук, доцент

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире особое внимание уделяется эффективному использованию солнечной энергии, которая является одним из видов возобновляемых источников энергии и считается экологически чистым, устойчивым и экономически выгодным источником энергии. В частности, создание новых лазерных технологий с использованием солнечной энергии в качестве источника оптической накачки в лазерах в настоящее время приобретает особое значение, и научные исследования в этой области ведутся быстрыми темпами. Однако, несмотря на многолетние научные исследования, эффективность солнечных лазеров в настоящее время недостаточна для практического использования, в связи с этим особое внимание уделяется решению проблем преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения и созданию высокоэффективных солнечных лазеров.

Одной из основных проблем солнечных лазеров в последнее время во всем мире является их низкая эффективность, и изучаются способы ее повышения. Существует несколько способов повышения эффективности, в частности: поиск активных элементов, спектр поглощения которых покрывают большую часть спектра солнечного излучения, направление большего количества света на активный элемент через первичные и вторичные концентраторы, использование эффективных систем охлаждения и много-стержневых активных элементов и т.д. Исследования этих проблем считаются самыми важными задачами для повышения эффективности солнечных лазеров.

В нашей республике в связи с растущим интересом к широкому использованию солнечной энергии большое внимание уделяется лазерам на солнечных батареях. Ведутся научно-исследовательские и инновационные работы по актуальным проблемам лазерной физики, направленные на повышение эффективности преобразования солнечной энергии в лазерную. Развитие возобновляемых источников энергии в нашей стране стало одним из важных направлений государственной политики. Направления фундаментальных и прикладных исследований в этой области и их применение на практике отражены в «Стратегии развития возобновляемых источников энергии в Республике Узбекистан до 2030 года»¹.

Настоящее диссертационное исследование в определенной степени соответствует задачам, обозначенным в указах и постановлениях Президента Республики Узбекистан № УП-6097 «Об утверждении

¹ Постановление Президента Республики Узбекистан, от 04.10.2019 г. № ПП-4477 «Стратегии развития возобновляемых источников энергии в Республике Узбекистан до 2030 года»

Концепции развития науки до 2030 года» от 29 октября 2020 года, № УП-6198 «О совершенствовании системы государственного управления развитием научной и инновационной деятельности» от 1 апреля 2021 года, № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области физики» от 19 марта 2021 года и других нормативно-правовых документах, касающихся данной сферы.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Научно-исследовательская работа была выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и техники Республики Узбекистан: IV «Разработка методов использования возобновляемых источников энергии, создание технологий и устройств на основе нанотехнологий, фотоники и других передовых технологий».

Степень изученности проблемы. В мире существует ряд ведущих научных центров и университетов, проводящих исследования в области солнечных лазеров. Например, научные исследования солнечных лазеров проводятся в таких университетах, как Массачусетский технологический институт (MIT) США, Португалия (Новый университет Лиссабона) и Калифорнийский технологический институт (Калифорнийский технологический институт). Кроме того, в Европе Институт Фраунгофера в Германии, Киотский университет в Японии и Пекинский университет в Китае вносят свой вклад в развитие важных научных разработок и новых технологий в области солнечных лазеров.

Преобразование широкополосного солнечного света в монохроматический лазерный луч и повышение эффективности солнечных лазеров являются важными научными задачами, к решению которых внесли значительный вклад зарубежные ученые, такие как T.Yabe, T.Funatsu, T.Dinh, T.Saiki, D. Liang, Z. Guan, Z. Cai, T. Motohiro и другие.

Среди отечественных ученых Ш. Пайзиев, Х. Махмудов, С. Бахрамов, К. Зикриллаев, А. Шерниязов и другие внесли достойный вклад в исследование процессов преобразования солнечной энергии в лазерную энергию.

Однако, несмотря на это, недостаточно внимания уделено изучению влияния многостержневых (МС) конфигураций активных элементов одинакового объема на выходную мощность излучения солнечных лазеров и развитию исследований в этой области для повышения эффективности поглощения солнечных лазеров.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательской темы Института ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Республики Узбекистан: «Исследование механизмов повышения эффективности лазеров, возбуждаемых

различными методами, на основе применения новых материалов и технологий» (2021-2024).

Цель исследования является изучение различных конфигураций лазеров, состоящих из мультистержневых активных сред и сенсibilизаторов, путем моделирования с использованием метода Монте-Карло с отслеживанием фотонов для повышения эффективности солнечных лазеров и предложения новых решений для определения оптимальных конфигураций с высокой выходной мощностью и эффективностью лазера.

Задачи исследования:

разработка симуляционной модели солнечного лазера на основе метода Монте-Карло с отслеживанием фотонов;

разработка симуляционной модели для лазерной конфигурации с композитной структурой, состоящей из активного элемента Nd:YAG и сенсibilизатора Ti:Sa;

разработка симуляционной модели солнечного лазера с тремя стержнями и оценка ее надежности на основе экспериментальных данных (валидация);

определение эффективного активного элемента для солнечных лазеров с использованием симуляционного метода для трехстержневых конфигураций активных элементов на основе сравнительного анализа Nd:YAG, Ce:Nd:YAG и Cr:Nd:YAG;

сравнение эффективности одно- и многостержневых солнечных лазеров при низких (<1 кВт) и высоких (>1 кВт) режимах оптической накачки;

определение выходной мощности лазера в многостержневых конфигурациях с учетом тепловых эффектов. Оценка эффективности использования многостержневых конфигураций вместо одного активного элемента.

Объект исследования. Твердотельные активные элементы с одним и несколькими стержнями Nd:YAG, Ce:Nd:YAG и Cr:Nd:YAG, сенсibilизаторы, Ti:Sa гелиостат с параболическим концентратором (ПК), асферическая линза для дополнительной фокусировки солнечных лучей на вторичном концентраторе, конический вторичный концентратор.

Предмет исследования. Физические процессы взаимодействия солнечных фотонов с активной средой лазера с одним стержнем и в многостержневых конфигурациях включающие: поглощение фотонов активной средой, распределение температуры, термическое напряжение, связанное с распределением температуры, и процессы генерации лазерного излучения в активных средах, оптически накачиваемых широкополосным спектром солнечного излучения.

Методы исследования. В лазерных системах используются методы, основанные на моделировании случайных процессов, происходящих в лазерной системе, с учетом одного и многостержневого (МС) активных сред, спектральных характеристик солнечного излучения и активных

элементов. Симуляционная модель (МС) основывается на трассировке фотонов методом Монте-Карло.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые на основе трассировки фотонов методом Монте-Карло была разработана симуляционная модель многостержневого солнечного лазера;

впервые разработана симуляционная модель солнечного лазера с композитной структурой Nd:YAG/Ti:Sa/Nd:YAG на основе активных элементов Nd:YAG и сенсibilизатором Ti:Sa и продемонстрирована возможность увеличения выходной мощности до 25%;

при разработке симуляционной модели трехстержневого солнечного лазера была подтверждена (проведена валидация модели) ее надежность на основе сравнения результатов модели с данными, полученными в экспериментальном исследовании, при этом показана, что точность расчета составляет около 5%;

по результатам сравнительной оценки использования активных элементов Nd:YAG, Ce:Nd:YAG и Cr:Nd:YAG в трехстержневых конфигурациях солнечных лазеров установлено, что наибольшая эффективность достигается при использовании Cr: Nd:YAG, то есть эффективность для Cr:Nd:YAG в 2 раза выше, чем для Nd:YAG и в 1,7 раза выше, чем для Ce:Nd:YAG;

на основе исследования различных многостержневых конфигураций солнечного лазера при низкой и высокой оптической мощностях накачки было выявлено, что многостержневые конфигурации могут поспособствовать решению термических проблем и было обнаружено, что наибольшая эффективность была у конфигурации с 7 стержнями;

впервые с учетом тепловых эффектов методом симуляции было установлено, что выходная мощность лазера в многостержневых конфигурациях может быть примерно в 2.5 раза выше по сравнению с конфигурацией с одним стержнем при одинаковом общем эффективном объеме.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

созданы симуляционные модели многостержневого солнечного лазера на основе метода Монте-Карло и трассировки траектории фотонов;

создана симуляционная модель лазера на основе композитной активной среды Nd:YAG/Ti:Sa/Nd:YAG;

при использовании активных сред Nd:YAG, Ce:Nd:YAG и Cr:Nd:YAG в трехстержневых солнечных лазерах обосновано, что наибольшая эффективность наблюдается у Cr:Nd:YAG;

обоснована, что тепловые проблемы могут быть решены с помощью многостержневых конфигураций;

показана, что наибольшая эффективность лазера достигается при использовании конфигурации с 7-стержнями.

Достоверность результатов исследований подтверждается использованием современных методов и подходов в фотонике и лазерной физике, а также тем, что полученные результаты базируются на фундаментальных теоретических исследованиях физических механизмов оптических процессов, происходящих в лазерно-активной среде, и их полным соответствием научным результатам других исследователей.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в том, что разработанная симуляционная модель одно- и многостержневых солнечных лазеров может быть использована при проведении теоретических исследований по повышению эффективности солнечных лазеров и поиску оптимальных решений.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что предлагаемые научные решения могут быть использованы для определения оптимальных конфигураций многостержневых лазеров, работающих в солнечном свете, повышения их эффективности, а также разработки и создания новых эффективных технологий использования солнечной энергии.

Внедрение результатов исследований.

Научные результаты, полученные по многостержневым лазерам, работающим на солнечном излучении, нашли применение в следующих проектах:

научные результаты по моделированию процессов поглощения, распределения температуры и термонапряжений для мульти-стержневого лазера были использованы в ряде исследований в зарубежных публикациях (1. Costa, H., Liang, D., Matos, A., & Almeida, J. (2024, September). Multi-Fresnel-lens pumping approach for simultaneous emission of seven TEM₀₀-mode beams with 3.73% conversion efficiency. *Photonics* Vol. 11, No. 9, p. 889, MDPI; 2. Almeida, J., Costa, H., Vistas, C. R., Tibúrcio, B. D., Matos, A., & Liang, D. (2024). Multirod Pumping Approach with Fresnel Lens and Ce: Nd: YAG Media for Enhancing the Solar Laser Efficiency. *Energies*, 17(22), 5630; 3. Matos, A., Liang, D., Costa, H., Tibúrcio, B. D., & Almeida, J. (2025). Five-Ce: Nd: YAG-rod solar laser approach with TEM₀₀-mode collection efficiency of 51.7 W/m². *Applied Optics*, 64(4), 797-807; 4. Boutaka, R., Liang, D., Bouadjemine, R., & Hendaoui, N. (2024). Design of high-power Nd: YAG solar laser pumped with off-axis parabolic concentrators. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 18(November-December 2024), 516-524). Использование результатов, позволило авторам обосновать возможность повышения эффективности лазеров более чем в 1,5 раза в теоретических исследованиях, проведенных с использованием симуляционных моделей для многостержневых конфигураций лазеров;

результаты, полученные на основе модели, разработанной на основе метода Монте-Карло с отслеживанием траектории фотонов, были использованы при выполнении научно-технических задач в научно-

техническом проекте AL-4821023123 Института материаловедения АН РУз «Особенности фазовых превращений керамики, синтезированной в Солнечной печи Института материаловедения Академии наук Республики Узбекистан» (Справка Академии наук Республики Узбекистан № 2/1255-2797 от 17 декабря 2024 года). Использование результатов, позволило более точно охарактеризовать сильное влияние неопределенностей радиуса кривизны граней гелиостата и концентратора на излучение в фокусе концентратора.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на научно-практических конференциях 7 конференциях, включая 3 международных и 4 республиканских уровня. Получено одно свидетельство на компьютерную программу.

Опубликованность результатов. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 12 научных работах, из которых 4 научные статьи, включая 1 международную (в журнале, входящем в базу данных Web of Science/Scopus) и 3 статьи в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 107 страниц, в том числе 37 рисунков и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении диссертации обоснована актуальность и необходимость исследований по теме исследования, сформулированы цели и задачи исследования, определены объекты, предметы и методы исследования, а также выявлено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в республике. Изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены данные о внедрении, апробации, а также объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации под названием «**Современное состояние проблемы**» на основе анализа литературы и результатов последних исследований установлено, что активный элемент в солнечных лазерах можно оптически накачивать двумя способами. Первый способ — это поперечная оптическая накачка, второй — продольная и поперечная оптическая накачка, при которой в активном элементе создается инверсная заселенность и генерируется лазерное излучение. Установлено, что при использовании активного элемента, расположенного во вторичном концентраторе, в режиме продольной и поперечной накачки эффективность солнечного лазера значительно возрастает. Однако в режиме продольно-поперечной (комбинированной) накачки из-за неравномерного

распределения поглощения света возникают дополнительные термические проблемы при использовании активного элемента. Такие термические эффекты (процессы) приводят к разрушению лазерного кристалла, увеличению термической заселенности нижнего энергетического уровня лазера, образованию термической линзы и другим подобным последствиям, что негативно сказывается на общей эффективности лазера.

Таким образом, на основе анализа вышеуказанной литературы были выявлены основные проблемы солнечных лазеров и определены цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе диссертации под названием «**Солнечный лазер с параболическим концентратором**» описаны следующие экспериментальные установки, методы и другие данные, предназначенные для решения поставленных в диссертации задач: метод отслеживания фотонов Монте-Карло (MCPT-Monte-Karlo Photon Tracing), спектр солнечного излучения, спектры поглощения активного элемента Nd:YAG, использование CdZnS в качестве внешнего сенсбилизатора для активного элемента Nd:YAG в симуляционной модели, разработанной на основе метода отслеживания фотонов Монте-Карло, и использование гелиостатов и параболических концентраторов. В этой главе представлена информация о каждой из вышеуказанных экспериментальных установок и методов.

В третьей главе диссертации под названием «**Солнечные лазеры с одной и тремя стержнями малой мощности**» изучено функционирование одно- и трехстержневых конфигурации активных элементов для солнечных лазеров в режимах поперечной и комбинированной накачки. Разработана симуляционная модель солнечного лазера с тремя стержнями Ce:Nd:YAG и проведено сравнение с экспериментальными результатами. Надежность разработанной симуляционной модели проверена на параметрах экспериментальных исследований. Исследованы процессы работы симуляционной модели солнечных лазеров с тремя стержнями.

Представленная здесь симуляционная модель основана на недавно опубликованном экспериментальном исследовании активных сред с тремя стержнями Ce:Nd:YAG. Здесь мы рассмотрим солнечный лазер, состоящий из следующих частей и элементов:

- Параболический концентратор

В данной работе рассматривается комбинация параболического концентратора с гелиостатически зеркалами в качестве первичного концентратора. Коэффициент отражения поверхности гелиостатических зеркал и параболического концентратора, покрытого серебром, установлен соответственно на 93,5% и 80%. В результате общий коэффициент отражения составляет 74,8%. Площадь параболического концентратора принята равной 0,5 м², из которых тень лазерной системы составляет 0,1 м². Эти параметры могут быть настроены или легко изменены в разработанной симуляционной модели.

- Асферическая линза

Между системой вторичного концентратора и основного концентратора установлена асферическая линза диаметром 84 мм, толщиной 37 мм и радиусом кривизны передней поверхности 43 мм (рисунок 1а). Асферическая линза используется для дополнительной фокусировки солнечных лучей, поступающих от основного концентратора. На рисунке 1б схематически представлен конический вторичный концентратор и активный элемент с тремя стержнями.

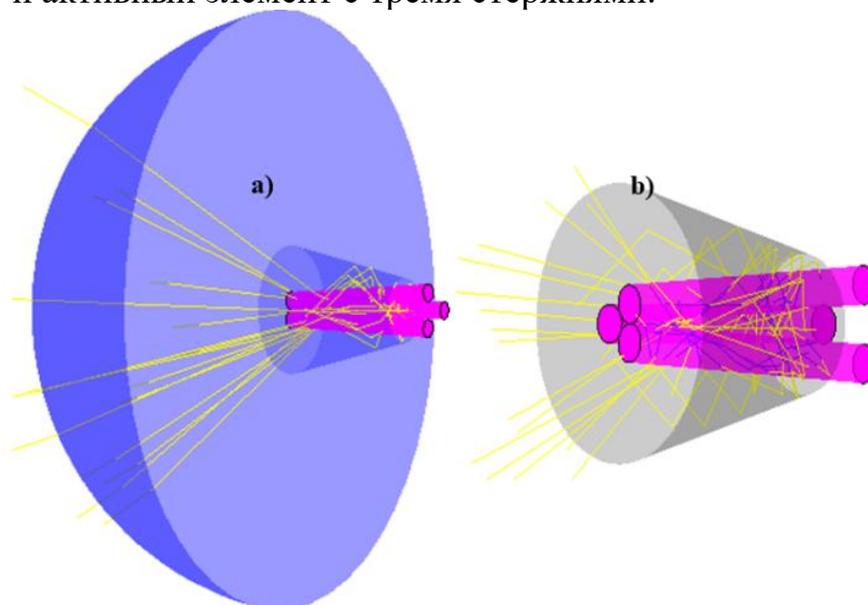


Рисунок 1. Вторичный концентратор. а) Асферическая линза и вторичный концентратор б) Конический вторичный концентратор.

- Конический вторичный концентратор

Конический вторичный концентратор помогает перенаправлять рассеянные солнечные лучи на активные элементы (рисунок 1б). Длина конического концентратора составляет 1,9 см, диаметр большой основы $D=0,9$ см и диаметр малой основы $d=0,45$ см. Еще один важный параметр - коэффициент отражения внутренних стенок вторичного концентратора установлен на уровне 94%.

- Система охлаждения

Для определения температурного режима в активных элементах солнечного лазера необходимо установить коэффициент теплопередачи на поверхности лазерных стержней. Мы рассчитали эти коэффициенты, учитывая скорость потока $100 \text{ см}^3/\text{с}$ и температуру охлаждающей воды 20°C .

В данном исследовании использованная симуляционная модель предназначена для точного соответствия геометрическим и физическим параметрам концентратора, указанным в экспериментальном исследовании. В таблице 1 приведены приблизительные параметры, полученные из симуляционной модели, вместе с другими соответствующими параметрами, необходимыми для определения эффективности солнечного лазера (полученными из различных источников). Параметры в таблице включают

P_{abs} - энергия, поглощенная в активном элементе лазера, P_{pump} - общая энергия, поступающая во вторичный концентратор, N_{abs} - количество поглощенных фотонов, N_{pump} - общее количество фотонов, попадающих в концентратор.

Таблица 1. Параметры, необходимые для расчета выходной мощности лазера:

Параметры	Ce:Nd: YAG
Эффективность поглощения P_{abs} / P_{pump}	$(23.92 \pm 0.001) \%$
Эффективность поглощения N_{abs} / N_{pump}	$(16.63 \pm 0.001) \%$
Внутренние потери	0.004
Квантовая эффективность	0.86
Коэффициент соответствия распределения поглощения и режима резонатора	0.94
Температура охлаждающей воды	$20 \text{ }^\circ\text{C}$
Длина стержня	2.5 см
Радиус стержня	0.125 см
Показатель преломления	1.8
Коэффициент отражения выходного зеркала резонатора	97,5 %

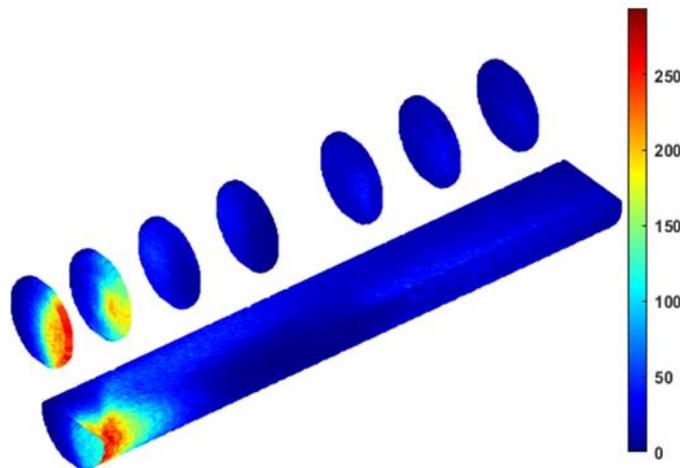


Рисунок 2. Распределение относительного поглощения (количество поглощенных фотонов).

Параметры, приведенные в таблице 1, вместе с распределением поглощения, показанным на рисунке 2, используются для выражения зависимости между мощностью накачки и выходной мощностью солнечного лазера через скоростные уравнения для четырехуровневых лазеров:

$$\phi = \tau_c \iiint_{\text{volume}} \frac{R_p(1+f) - fN_t / \tau}{(1+f) + V / (\phi c \sigma_e \tau |u|^2)} dV \quad (1)$$

Затем выходная мощность определяется следующим образом:

$$P_{out} = k\phi \quad (2)$$

Здесь коэффициент пропорциональности $k = hv\gamma_2 c / 2L_e$ (где γ_2 коэффициент пропускания выходного зеркала резонатора, L_e - эффективная длина резонатора, h - постоянная Планка, ν - частота лазерного излучения, c - скорость света) зависит от параметров резонатора.

Формула получена из уравнений скорости для квази-трехуровневых лазерных систем.

Несмотря на неудобства в расчетах, точность остается высокой. Однако потери в концентраторе и лазерных стержнях должны быть четко указаны. На рисунке 3 показана линия выходной мощности в симуляционной модели (красная линия) вместе с результатами, полученными в эксперименте. Эти результаты на графике демонстрируют высокую точность соответствия между симуляционной моделью и экспериментом. На рисунке 3 представлено это соответствие, и было установлено, что разработанная модель может быть использована для изучения многостержневых лазеров.

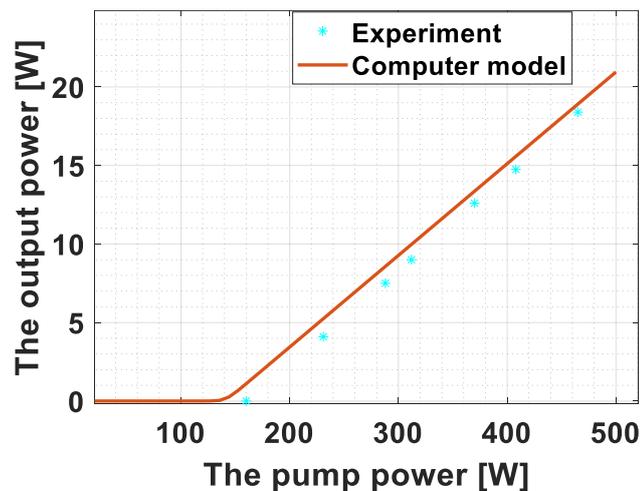


Рисунок 3. Зависимость выходной мощности солнечного лазера от входной мощности.

Четвертая глава диссертации называется “Солнечные лазеры с одним и несколькими стержнями, работающие на высоких мощностях”. В этой главе разрабатывается симуляционная модель солнечных лазеров с различными конфигурациями стержней с использованием метода Монте-Карло с отслеживанием пути фотонов. Сравнивается эффективность работы солнечных лазеров с одним и несколькими стержнями в режимах низкой (<1 кВт) и высокой (>1 кВт) оптической накачки. В данной работе изучается эффективность поглощения в конфигурациях с несколькими стержнями по сравнению с эффективностью поглощения в активном элементе с одним стержнем. Учитывая тепловые эффекты, определяется, как конфигурации с

несколькими стержнями влияют на эффективность выходной мощности лазера. На основе полученных результатов исследуется, какие факторы сильнее всего влияют на выходную мощность солнечного лазера. Вопрос здесь заключался в том, что если использование многостержневых лазеров перспективно, то будут изучены возможности эффективного использования этой конфигурации в солнечных лазерах.

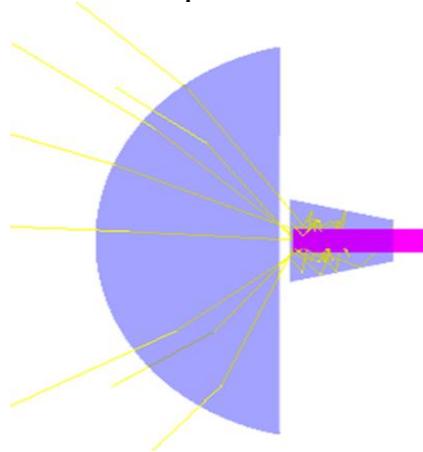


Рисунок 4. Активный элемент с одним стержнем, размещенный во вторичном концентраторе.

Для определения оптимального радиуса активного элемента с одним стержнем для рассматриваемого вторичного концентратора, изображенного на рисунке 4, использовалась симуляционная модель. Результаты, рассчитанные на основе симуляционной модели, показаны на рисунке 5. На рисунке 5(а) представлены значения эффективности поглощения в зависимости от размера стержня активного элемента. Эффективность поглощения пропорционально увеличивается с увеличением радиуса, однако после достижения радиуса стержня 0,25 см изменение эффективности поглощения становится очень незначительным и достигает предела возможности вторичного концентратора.

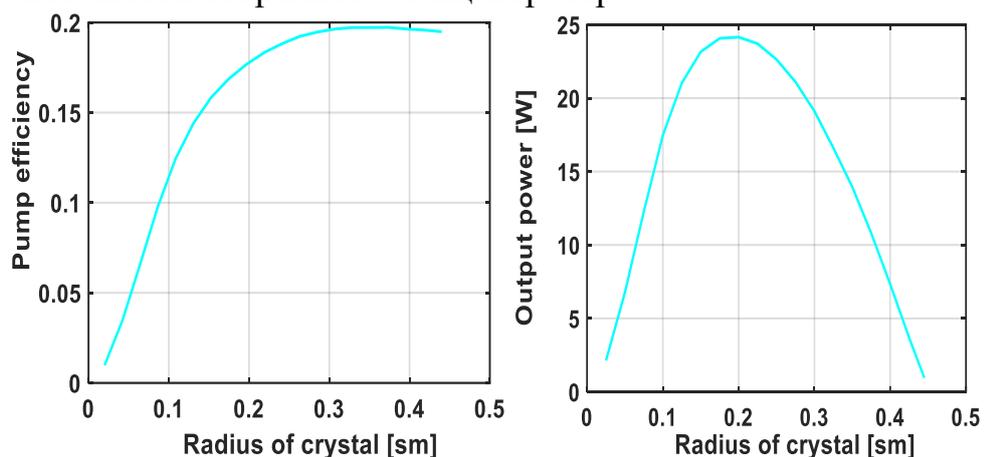


Рисунок 5. а) Эффективность поглощения для стержней различного радиуса и б) Выходная мощность лазера, соответствующая радиусам стержней.

Следующий обсуждавшийся вопрос заключался в том, превосходят ли многостержневые системы солнечные лазерные системы с одним стержнем.

Как упоминалось выше, было важно создать критерий. Для этого сравнения мы предполагаем, что объемы нескольких линий и одиночных линий должны быть равными, а именно:

$$\sum_{i=1}^n r_i^2 = R^2. \quad (3)$$

Здесь r_i обозначает радиус одного из активных элементов с несколькими стержнями, а R - радиус одного активного элемента. Для повышения эффективности солнечного лазера предлагается разделить оптимальный стержень диаметром 0,2 см на более мелкие стержни.

Таблица 2. Сравнение различных конфигураций с одним стержнем радиусом 0,2 см.

Количество кристаллов	Радиус кристалла [см]	Эффективность накачки [%]	Количество кристаллов	Радиус кристалла [см]	Эффективность накачки [%]		
1		0.2	16.84	6		0.0816	15.67
2		0.1414	15.37	6		0.0816	15.31
3		0.1155	15.77	7		0.0756	15.73
4		0.1	15.63	7		0.0756	15.03
4		0.1	15.1	8		0.0707	14.7
5		0.0894	15.44	8		0.0707	15.46
5		0.0894	14.88				

Результаты показали, что эффективность поглощения достигает своего максимума в конфигурации с одним стержнем и превышает любую конфигурацию с несколькими стержнями. Однако стоит отметить, что в таблице 2 эффективность поглощения активных элементов с тремя и семью стержнями почти соответствует эффективности поглощения конфигурации с одним стержнем и четко выделяется в таблице. После сравнения характеристик поглощения в данной работе были проанализированы лазерные характеристики для конфигураций с одним, тремя и семью стержнями с учетом тепловых эффектов. При увеличении мощности накачки до 500 Вт тепловые эффекты становятся заметными. Наблюдается небольшое улучшение конфигураций с несколькими стержнями по сравнению с одной стержневой конфигурацией. Для концентраторов с меньшей мощностью, условно ниже 1 кВт, конфигурации с несколькими

стержнями не значительно улучшают эффективность выходной мощности лазера по сравнению с конфигурацией с одним активным элементом. Тем не менее, некоторые конфигурации с несколькими стержнями, такие как конфигурации с тремя и семью стержнями, могут обеспечить немного более высокую эффективность по сравнению с одним активным элементом.

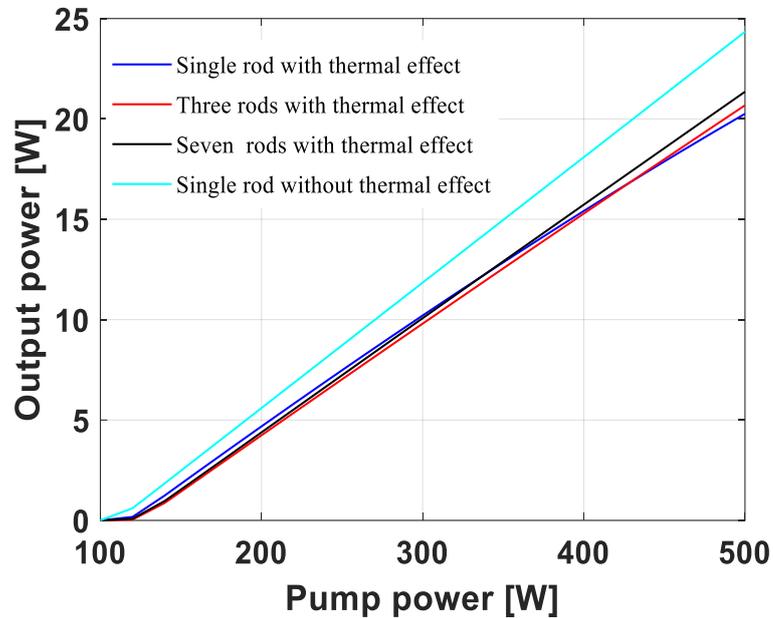


Рисунок 6. Лазерные характеристики для одного стержня радиусом 0,2 см и соответствующие конфигурации с несколькими стержнями.

Итак, наша цель - проверить работу солнечных лазеров с одним и несколькими стержнями при высокой мощности накачки, условно превышающей 1 кВт, как указано выше. При высокой мощности накачки, без учета теплового эффекта, максимальная выходная мощность лазера была определена при радиусе активного элемента 0,25 см.

Таблица 3. Конфигурации с наивысшими показателями для многостержневых конфигураций.

Количество кристаллов	Радиус кристалла [см]	Эффективность накачки [%]
1 	0.25	16.88
3 	0.1443	16.2
7 	0.0945	16.47

Эффективность поглощения (накачки) для конфигураций с одним стержнем, тремя стержнями и семью стержнями составляет соответственно 16,88%, 16,2% и 16,47%. Для расчета выходной мощности лазера с учетом тепловых эффектов мы рассчитали распределение температуры в стержнях. Их форма и значения температуры показаны на рисунке 7: (а) для одного стержня область превышает 800 К, (b) для трех стержней с более низкими температурами, примерно 650 К, и (с) для семи стержней максимальная температура составляет 500 К. На рисунке 8 показаны рассчитанные распределения механического термического напряжения. Если предположить, что максимальный предел напряжения на разрыв составляет 250 МПа, то монокристалл с радиусом 0,25 см при мощности накачки 1300 Вт будет разрушен. Примечательно, что уровень термической нагрузки других кристаллов, показанных на рисунке 8, значительно ниже предела разрушения.

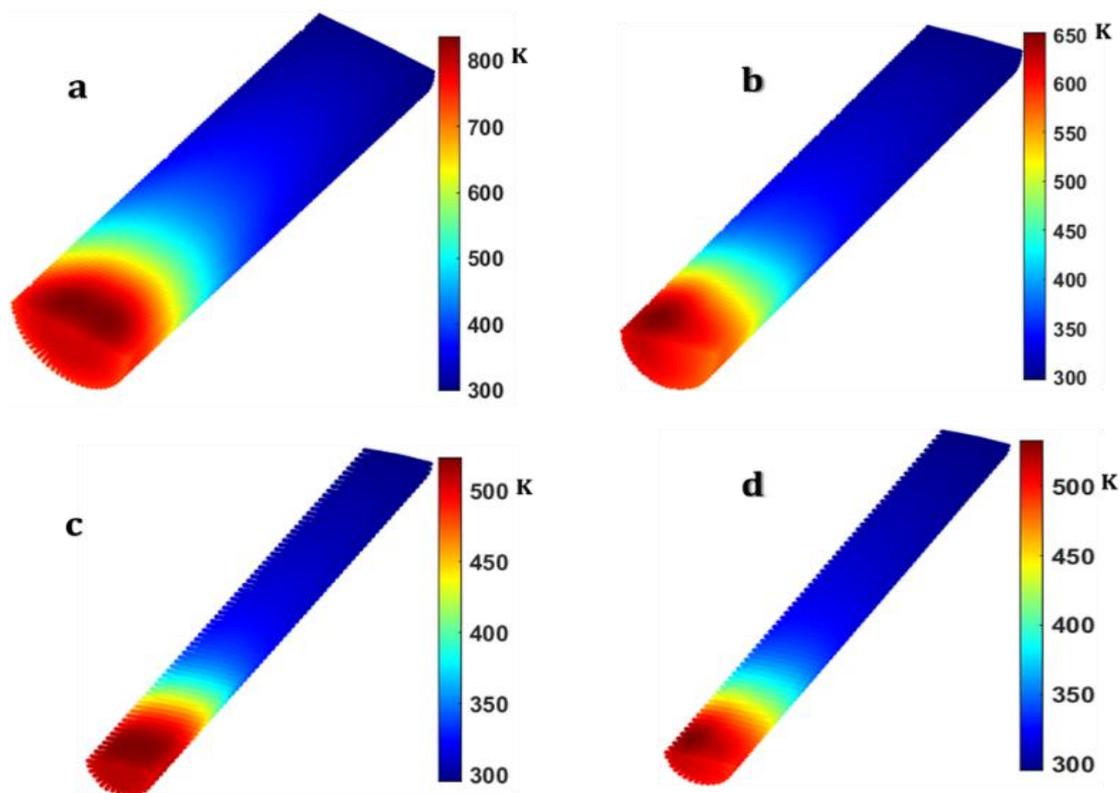


Рисунок 7. Распределение температуры при солнечной накачке мощностью 1300 Вт: (а) в одном стержне, (b) в одном из трех стержней, (с) в центральном активном элементе из семи стержней и (d) в одном из внешних активных элементов из семи стержней.

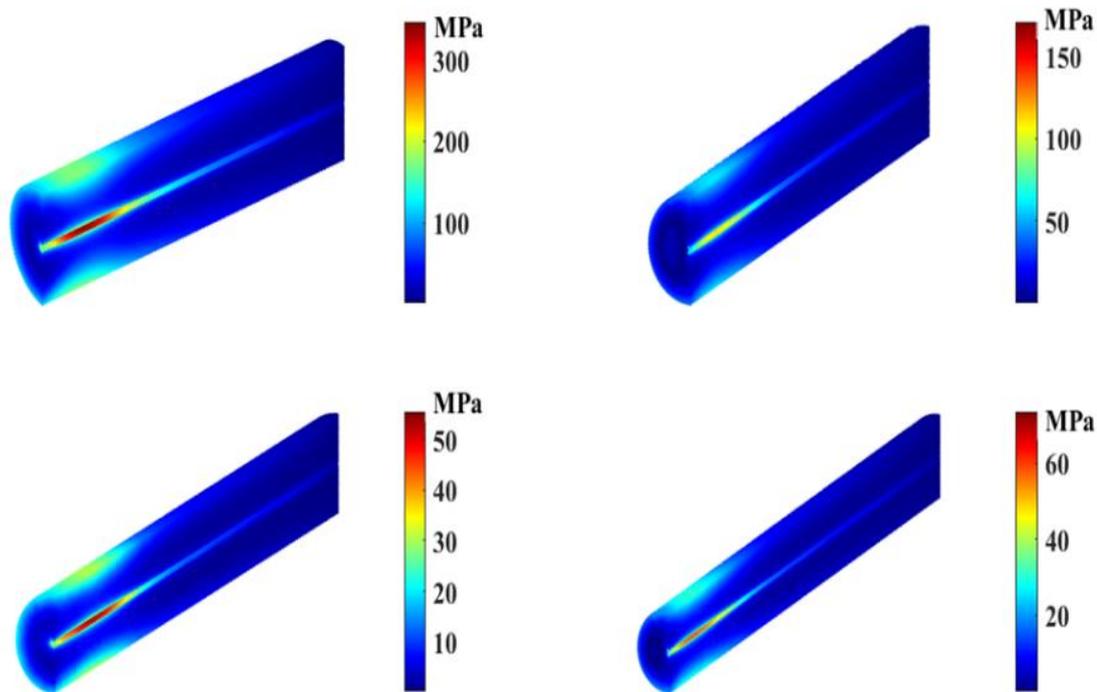


Рисунок 8. Распределение термического напряжения при мощности накачки 1300 Вт: (а) для одного стержня, (b) для одного из трех стержней, (с) для центрального активного элемента из семи стержней и (d) для одного из внешних активных элементов из семи стержней.

Далее, используя распределение температуры и поглощения, указанные в уравнениях 1 и 2, были рассчитаны выходные мощности лазера. Результаты представлены на рисунке 9 с соответствующими обозначениями.

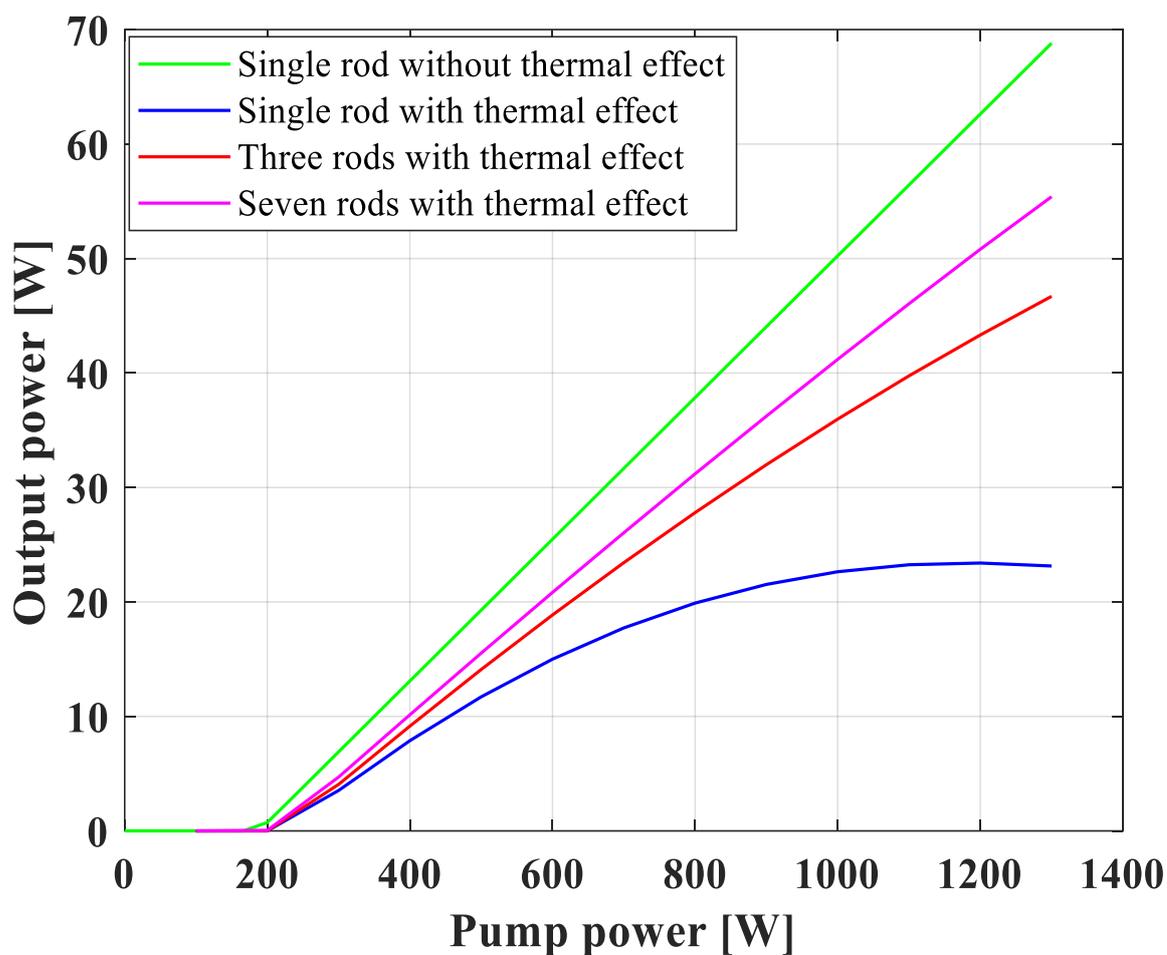


Рисунок 9. Выходная мощность лазера с учетом тепловых эффектов.

На рисунке показана идеальная зависимость без учета теплового воздействия, обозначенная зеленой линией, которая предполагает полное устранение теплового влияния. Видно, что для более крупных концентраторов, условно превышающих 1 кВт, многостержневые конфигурации демонстрируют высокую эффективность. Использование многостержневой конфигурации частично смягчает тепловое воздействие и приближает выходную мощность лазера к идеальному значению. Уменьшение диаметра и увеличение количества стержней облегчает эффективное охлаждение, что в свою очередь повышает эффективность выходной мощности лазера. Результаты исследования показывают, что многостержневые конфигурации повышают эффективность при высоких уровнях оптической накачки для солнечных лазеров. Однако их реализация вызывает дополнительные технические проблемы при экспериментальном выполнении. Многорезонаторные системы, особенно мобильные солнечные лазеры, оснащенные системами слежения за солнцем, могут столкнуться с определенными трудностями при размещении. В действительности, это может быть технически невозможно, например, для крупных солнечных

концентраторов с десятью активными средами. Поэтому мы предлагаем использовать технологию диффузионного связывания (DB) для объединения нескольких стержней в одну многостержневую конфигурацию через один общий резонатор (рисунок 10). Этот подход не только обходит проблемы, связанные с многорезонаторными системами, но и позволяет создавать мощные лазерные лучи в многостержневом режиме, устраняя необходимость объединения выходной мощности каждого стержня.

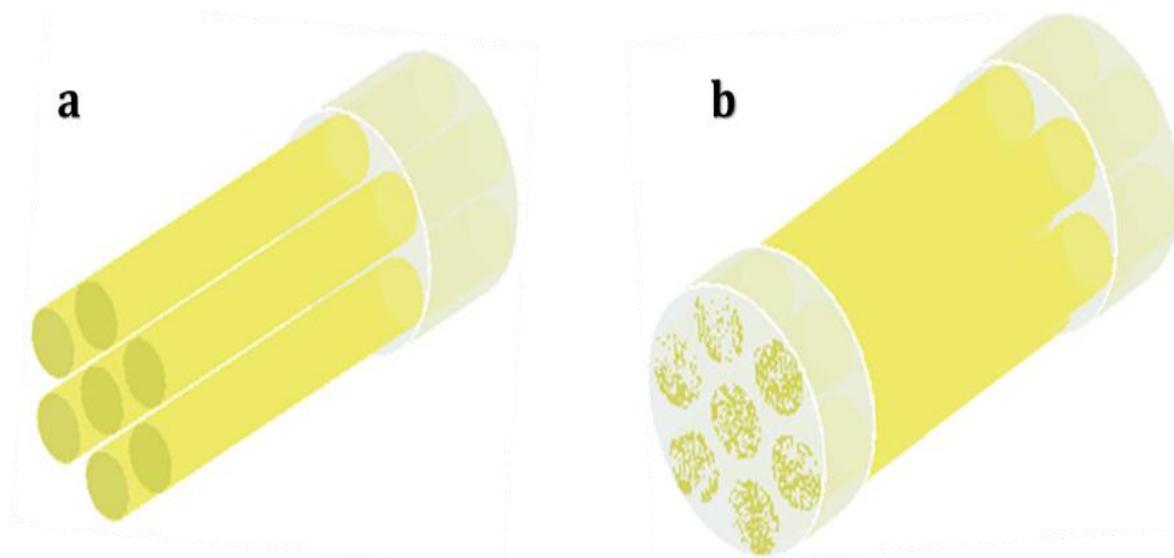


Рисунок 10. а) Активные элементы с несколькими стержнями, объединенные с одной стороны, и б) Активные элементы с несколькими стержнями, объединенные с обеих сторон методом диффузионного связывания для одного резонатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе метода Монте-Карло с отслеживанием пути фотонов были разработаны симуляционные модели солнечных лазеров с несколькими стержнями и сенсбилизаторами.

2. С помощью метода Монте-Карло с отслеживанием пути фотонов была разработана симуляционная модель для композитной структуры с активным элементом Nd:YAG и сенсбилизатором Ti:Sa. При входной мощности 450 Вт коэффициенты поглощения для Nd:YAG, Ti:Sa/Nd:YAG и Nd:YAG/Ti:Sa/Nd:YAG составили соответственно 12,68%, 13,78% и 14,5%. Пропорционально коэффициентам поглощения максимальная выходная мощность солнечного лазера увеличилась до 11 Вт, 12,7 Вт и 13,74 Вт соответственно. Было установлено, что размещение сенсбилизатора в

активном элементе в виде композитной структуры Nd:YAG/Ti:Sa/Nd:YAG может увеличить выходную мощность до 25%.

3. Для сравнительной оценки использования активных элементов Nd:YAG, Ce:Nd:YAG и Cr:Nd:YAG в солнечных лазерах была разработана симуляционная модель солнечного лазера с несколькими стержнями. Сравнение результатов показало, что наибольшая эффективность была достигнута при использовании Cr:Nd:YAG. При мощности накачки солнечными лучами 500 Вт общая эффективность в случае Cr:Nd:YAG составила 5%, что в два раза выше, чем у лазера Nd:YAG, а эффективность Ce:Nd:YAG была примерно в 1,7 раза выше, чем у Nd:YAG. Высокая выходная мощность Cr:Nd:YAG объясняется его спектром поглощения. Поскольку коэффициенты поглощения Cr малы, длина поглощения фотонов велика. Было установлено, что при использовании активного элемента в продольном и комбинированном режимах его 2.5 сантиметровая длина была достаточна для эффективного поглощения.

4. Методом симуляции была изучена конфигурация с несколькими стержнями для солнечных лазеров, работающих в продольном и комбинированном режимах оптической накачки. Была разработана симуляционная модель солнечного лазера с тремя стержнями, используя метод Монте-Карло с отслеживанием пути фотонов. Надежность этой симуляционной модели была подтверждена с использованием недавно опубликованных экспериментальных данных.

5. Для оценки работы солнечного лазера было проведено сравнительное исследование, и в результате изучения различных конфигураций с несколькими стержнями было показано, что конфигурации с тремя и семью стержнями могут решить термические проблемы.

6. Результаты показали, что хотя эффективность поглощения конфигураций с несколькими стержнями не полностью достигает эффективности поглощения активного элемента с одним стержнем, они очень близки. Однако с учетом тепловых эффектов конфигурации с несколькими стержнями показали значительно улучшенную выходную мощность лазера. Фактически, использование конфигураций с несколькими стержнями вместо одного активного элемента удвоило выходную мощность. Этот результат можно объяснить тремя основными факторами: распределением поглощения, потерями в резонаторе и тепловыми эффектами. Были предложены новые решения для решения технических проблем, связанных с конфигурациями, включающими несколько стержней.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFIC DEGREES
PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 OF URGENCH STATE UNIVERSITY
NAMED AFTER ABU RAYHAN BIRUNI**

INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

BEGIMQULOV SHERZOD ABDIRASULOVICH

SOLAR-PUMPED MULTI-ROD LASERS

01.04.11– Laser physics

ABSTRACT
of the dissertation for the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences

Urgench–2025

The theme of doctor of philosophy (PhD) dissertation was registered at the Supreme Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, science and innovations of the Republic of Uzbekistan under number B2024.3.PhD/FM1160

The dissertation has been prepared at the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies.
The abstract of the dissertation is posted in Three languages (Uzbek, Russian, English (resume))
Is placed on the web page of the Scientific Council (www.urdu.uz) and on the Information and Educational Portal "Ziyonet" (www.ziyonet.uz).

Scientific adviser:

Payziyev Shermakhamat Daliyevich

doctor of physical and mathematical sciences, professor

Official opponents:

Eshqobilov Nafas Beknazarovich

doctor of physical and mathematical sciences,
professor

Eshonqulov Gofur Boboqulovich

candidate of physical and mathematical sciences,
dotsent

Leading organization:

Tashkent state technical university

The defense will take place on « 16 » may 2025 at 14⁰⁰ at the meeting of the Scientific Council number PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 at Urgench State University. (Address: 14 Kh. Olimjan str., Urgench city, 220100, Uzbekistan, Ph.: (99862)224-66-11, fax: (99862)224-67-00).

Dissertation is possible to review in Information-resource centre at Urgench state university (is registered № 735) (Address: 14 Kh. Olimjan str., Urgench city, 220100, Uzbekistan, Ph.: (99862) 224-66-11, fax: (99862)224-67-00).

Abstract of dissertation sent out on « ____ » _____ 2025 year
(Mailing report № _____ on « ____ » _____ 2025 year)



U.O.Kutliev,

Chairman of the scientific council on award of scientific degree, doctor of physical and mathematical Sciences, professor

K.R.Yakubov,

Scientific secretary of scientific council on award of scientific degree, candidate of physical and mathematical sciences, dotsent

U.K. Sapaev,

Chairman of scientific Seminar under Scientific Council on award of scientific degree, doctor of physical and mathematical sciences, dotsent

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The purpose of the research work is to investigate different laser configurations consisting of multi-rod active media and sensitizers by using Monte Carlo photon tracing simulations to improve the efficiency of solar lasers and propose new solutions to determine the optimal configurations with high output power and laser efficiency.

The object of the research work is solid-state single and multi-rod Nd:YAG, Ce:Nd:YAG and Cr:Nd:YAG active elements, sensitizers, Ti:Sa, parabolic concentrator (PC) with heliostat mirror, aspherical lens for further focusing sunlight onto the secondary concentrator, cone-shaped secondary concentrator.

The Scientific novelty of the research is as follows:

for the first time, a simulation model for a multi-rod solar laser was developed using the Monte-Karlo photon tracing method;

for the first time, a simulation model of a composite Nd:YAG/Ti:Sa/Nd:YAG structure, featuring an Nd:YAG active element and a Ti:Sa sensitizer, was developed, demonstrating the potential for increasing output power by up to 25%;

when developing a simulation model of the three-rod solar laser, its reliability was confirmed (validation of the model was performed) based on the comparison of the model results with the data obtained in the experimental study, and it was shown that the calculation accuracy is about 5%;

based on the results of a comparative assessment of the use of active elements Nd:YAG, Ce:Nd:YAG and Cr:Nd:YAG in three-rod configurations of solar lasers, it was found that the highest efficiency is achieved when using Cr:Nd:YAG, that is, the efficiency for Cr:Nd:YAG is 2 times higher than for Nd:YAG and 1.7 times higher than for Ce:Nd:YAG;

based on the study of various multi-rod configurations of the solar laser at low and high optical pump powers, it was revealed that multi-rod configurations can contribute to solving thermal problems and it was found that the highest efficiency was in the configuration with 7 rods;

for the first time, taking into account thermal effects, it was found by simulation that the laser output power in multi-rod configurations can be approximately 2.5 times higher compared to a single-rod configuration with the same total effective volume.

Implementation of research results. The scientific results obtained from multirod lasers operating on solar radiation have been applied in the following projects:

scientific results on modeling the processes of absorption, temperature distribution and thermal stress for a multi-rod laser were used in a number of studies in foreign publications (1. Costa, H., Liang, D., Matos, A., & Almeida, J. (2024, September). Multi-Fresnel-lens pumping approach for simultaneous emission of seven TEM00-mode beams with 3.73% conversion efficiency. Photonics Vol. 11, No. 9, p. 889, MDPI; 2. Almeida, J., Costa, H., Vistas, C. R.,

Tibúrcio, B. D., Matos, A., & Liang, D. (2024). Multirod Pumping Approach with Fresnel Lens and Ce: Nd: YAG Media for Enhancing the Solar Laser Efficiency. *Energies*, 17(22), 5630; 3. Matos, A., Liang, D., Costa, H., Tibúrcio, B. D., & Almeida, J. (2025). Five-Ce: Nd: YAG-rod solar laser approach with TEM00-mode collection efficiency of 51.7 W/m². *Applied Optics*, 64(4), 797-807; 4. Boutaka, R., Liang, D., Bouadjemine, R., & Hendaoui, N. (2024). Design of high-power Nd: YAG solar laser pumped with off-axis parabolic concentrators. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 18(November-December 2024), 516-524). The use of the results made it possible to substantiate the possibility of increasing the efficiency of lasers by more than 1.5 times in theoretical studies conducted using simulation models for multi-rod laser configurations;

the results obtained with the use of the model developed on the basis of the Monte-Carlo photon tracing method were used in the implementation of scientific and technical tasks in the scientific and technical project AL-4821023123 of the Institute of Materials Science of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan "Features of phase transformations of ceramics synthesized in the Solar Furnace of the Institute of Materials Science of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan" (Certificate of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan No. 2/1255-2797 dated December 17, 2024). The use of the results made it possible to more accurately characterize the strong influence of uncertainties in the radius of curvature of the heliostat and concentrator faces on the radiation at the concentrator focus.

Structure and size of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and appendices. The total volume of the dissertation is 107 pages, including 37 figures and 7 tables.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (Част I, Part I)

1. Sherniyozov, Anvarjon, Shermakhamat Payziyev, and Sherzod Begimqulov. "Enhancing solar laser performance through multirod configurations" *Journal of Photonics for Energy* 14.2 (2024): 024501-024501. <https://doi.org/10.1117/1.JPE.14.024501> (01.00.00, № 3, IF: 1.6).
2. Begimqulov, S. A., Payziyev, S. D., Boltaev, G. S., & Sherniyozov, A. A. (2023). "Simulation model for multirod configuration in end-side pumped solar lasers", "Uzbek Journal of Physics", 25(2). <https://doi.org/10.52304/.v25i2.422> (01.00.00, № 5).
3. Begimqulov, S. A., Payziyev, S. D., Sherniyozov, A. A., Shermatova, F. A., Kamoliddinov, F. M., & Boltaev, G. S. (2024). "Solar laser with Ti: Sa/Nd: YAG composite structure active medium". "Uzbek Journal of Physics", 26(2). <https://doi.org/10.52304/.v26i2.524> (01.00.00, № 5).
4. Payziyev, S. D., Begimqulov, S. A., Sherniyozov. (2024). "Comparative study of various types of laser active media for solar pumping in multi-rod configurations". "Uzbek Journal of Physics", 26(2) <https://doi.org/10.52304/.v26i3.539> (01.00.00, № 5).

II bo'lim (Част II; Part II)

5. Sh.D.Payziyev, Sh.A. Begimqulov, A.A.Sherniyozov, "Quyosh nurlari bilan optik damlanadigan ko'p faol muhitli lazerlarning ishlashini optimallashtirish algoritmi" *Elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro'yxatdan o'tkazilganligi to'g'risidagi guvohnoma*, № DGU 33539.
6. А. Шерниёзов, Ш. Пайзиев, Ш. Бегимкулов, Ф. Шерматова, Ф. Камолиддинов, А. Каххоров, А. Алибоев, "Новые сенсibiliзирующие материалы для Nd:YAG лазеров с солнечной накачкой", *Восьмая Международная конференция по физической электронике ИРЕС-8 // Сборник тезисов докладов*. Ташкент, 2021. -224 с., стр.209-210.
7. Sh.A.Begimqulov, Sh.D. Payziyev, A.A. Sherniyozov "Kompozit strukturali Ti:Sa/Nd:YAG quyosh lazeri", *Proceedings of International Conference "Fundamental and Applied Research in Physics"*, NUUz, May 24-25, 2024, стр.25-27.
8. Sh.A.Begimqulov, Sh.D. Payziyev, A.A. Sherniyozov, "Quyosh lazerida Ce:Nd:YAG va Cr:Nd:YAG faol elementlaridan samarali foydalanish", *Физика*

электроника бўйича тўққизинчи халқаро анжуман IPES-9 // Сборник тезисов докладов. Ташкент, 2024., стр.215-216.

9. Sh.Begimqulov, Sh.Payziyev, A.Sherniyozov, “Effectiveness of CdSe/CdZnS sensitizers in solar lasers”, “Fotonika muammolari va rivojlanish istiqbollari” Respublika ilmiy-amaliy anjumani materiallari 27-28 may.

10. Ш. Бегимкулов, Г. Болтаев, Ш. Пайзиев, А. Шерниёзов, Ф. Шерматова “Влияние конструкции камеры накачки на эффективность солнечных лазеров”, Республиканская научно-практическая конференция “Актуальные проблемы полупроводников, наноматериалов и фотоэнергетики”, Ургенч – 9-10 декабря 2022 г., стр.205-208.

11. Sh.A.Begimqulov*, Sh.D. Payziyev, G. S. Boltaev, A.A. Sherniyozov “Turli konfiguratsiyali ko‘p aktiv muhitli quyosh lazeralari uchun simulyatsion model” fizika fanining rivojida iste’dodli yoshlarning o‘rni (RIAK-XVI-2023), 28-29-aprel 2023-yil., 28-32 betlar.

12. Sh.A.Begimqulov, A.A. Sherniyozov, G. S. Boltaev, Sh.D. Payziyev, “Ko‘p faol muhitli quyosh lazerlari”, “Optika va lazer fizikasining muammo va istiqbollari”, Tashkent – 26 oktyabr 2023-y.

Avtoreferat “O‘zbekiston to‘qimachilik jurnali” ilmiy texnikaviy jurnali tahririyatida
tahrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus, ingliz tillaridagi matnlari mosligi tekshirildi
(25.04.2025 y.)

Bosishga ruxsat etildi: 1.05.2025 yil.
Bichimi 60x45 1/8, “Times New Roman”
garniturada, raqamli bosma usulida bosildi.
Shartli bosma tabog‘i 3,25. Adadi: 60. Buyurtma №64.
TTYSI bosmaxonasida chop etildi.

Toshkent shahri, Yakkasaroy tumani, Shohjahon ko‘chasi, 5-uy. 54