

**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

QAHHOROV ABDULLA G'AFUR O'G'LI

**QUYOSH NURIDA ISHLAYDIGAN NEODIM KIRITILGAN TOLALI
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 доктор философии (PhD) физико-
математических наук**

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

Qahhorov Abdulla G'afur o'g'li	
Quyosh nurida ishlaydigan neodim kiritilgan tolali lazerlar.....	3
Каххоров Абдулла Гафур угли	
Неодимовые волоконные лазеры с солнечной накачкой.....	21
Qakhkhorov Abdulla Gafur ugli	
Solar pumped neodymium fiber lasers.....	39
E'lon qilingan ishlar ro'yxati	
Список опубликованных работ	
List of published works.....	43

**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

QAHHOROV ABDULLA G'AFUR O'G'LI

**QUYOSH NURIDA ISHLAYDIGAN NEODIM KIRITILGAN TOLALI
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/FM1161 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 rahbar	Payziyev Shermakhamat Daliyevich, fizika-matematika fanlari doktori, professor
Rasmiy opponentlar:	Sapaev Usmon Qalandarovich, fizika-matematika fanlari doktori, dotsent Vapayev Murodbek Ergashovich, fizika-matematika fanlari nomzodi, PhD
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 « 15 » 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 (796- 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 6 - 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.K. Sapaev,
Ilmiy daraja beruvchi ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi, fizika-matematika fanlari doktori, dotsent

KIRISH (Falsafa fanlari doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda, so‘nggi yillarda quyosh energiyasidan samarali foydalanish yo‘lida quyosh energiyasini issiqlik va elektr energiyalariga aylantirish bilan bir paytda yana bir istiqbolli yo‘nalishlardan biri deb qaralayotgan keng polosali quyosh spektrini to‘g‘ridan to‘g‘ri kogerent lazer nurlanishiga aylantirishga alohida e‘tibor berilmoqda. Hozirgi kunda quyosh energiyasini lazer energiyasiga aylantirishda asosan qattiq jisimli lazer faol muhitlari bilan bir qatorda nisbatan qulay va arzon bo‘lgan tolali lazer faol muhitlardan foydalanishga qiziqish ortib bormoqda. Biroq bunday lazerlarning hozirgi paytda asosiy muammosi umumiy samaradorlikning pastligi bo‘lib ushbu muammoni hal qilish uchun quyosh nurida ishlaydigan tolali lazerlarda faol muhit uchun yangi materiallar izlash, sensibilizator tanlash, dixroik ko‘zguvar, ko‘p yadroli optik tolalar va boshqa shunga oxshash usullardan foydalanishga alohida e‘tibor qaratilmoqda.

Jahondagi rivojlangan davlatlarning universitet va ilmiy markazlarida, quyosh nurlari bilan ishlaydigan tolali lazerlarning samaradorligini oshirish uchun yuqori samarali lazer faol muhitlarini aniqlash, ularga mos sensibilizatorlarni tanlash, konsentratorlar hamda quyosh lazeri konfiguratsiyasini optimallashtirishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Ushbu yo‘nalishda, jumladan, quyosh spektrining foydalanilmayotgan qismini o‘zgartiruvchi ichki va tashqi sensibilizatorlar yordamida bir va ko‘p yadroli optik tolalarning yutilish spektriga moslashtirish orqali samaradorlikni oshirish bo‘yicha tadqiqotlar ustuvor hisoblanmoqda. Shu bilan birga, quyosh nuri bilan optik damlanadigan optik tolali lazer sistemasida, eng yuqori lazer samaradorligiga erishish uchun lazer tizimida sodir bo‘ladigan fizik jarayonlarni to‘liqroq hisobga oluvchi simulyatsion modelini yaratish va uning asosida optimal yechimlarni aniqlash dolzarb vazifalardan hisoblanmoqda.

O‘zbekiston Respublikasida quyosh energiyasidan samarali foydalanish, uni lazer nurlanishiga aylantirish orqali yangi texnologiyalar yaratish imkoniyatlarini o‘rganish bo‘yicha tadqiqotlar o‘tkazish va ularni amalda qo‘llash bo‘yicha keng ko‘lamli chora-tadbirlar amalga oshirilmoqda. 2017-yil 17-fevraldagi PQ-2789-son “Fanlar akademiyasi faoliyati, ilmiy-tadqiqot ishlarini tashkil etish, boshqarish va moliyalashtirishni yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi qarori¹ bo‘yicha vazifalar belgilangan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, xususan, quyosh energiyasini to‘g‘ridan-to‘g‘ri lazer energiyasiga aylantirish va samaradorlikni oshirish uchun konsentratorlar, sensibilizatorlar, bir va ko‘p yadroli optik tolalarni o‘rganish, respublikamizda ushbu yo‘nalishni rivojlantirish uchun simulyatsiya modellarini yaratish, ular asosida turli optik tolali quyosh lazerlarida fizik jarayonlarni modellashtirish, tolali lazerlarning optimal parametrlarini baholash va yangi istiqbolli lazer materiallarini aniqlash muhim hisoblanadi.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017-yil 7-fevraldagi “O‘zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo‘yicha Harakatlar strategiyasi to‘g‘risida”gi PF-4947-sonli farmonida² va 2020-yil 29-oktabrdagi PF-6097-sonli “Ilm-fanni

¹ O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining Qarori, 17.02.2017-yildagi PQ-2789-son.

² O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni, 7.02.2017-yildagi PF-4947-son.

2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida³gi farmonida hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirish uchun ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

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.

Dunyodagi turli xil ilmiy markazlarda quyosh nurida ishlaydigan optik tolali lazerlar bo'yicha ilmiy tadqiqotlar o'tkazilgan. Quyosh nuri bilan damlanadigan optik tolali lazerning chiqish quvvati parametrlari, umumiy samaradorligini oshirish bo'yicha xorijlik olimlar tomonidan tadqiqotlar olib borilgan. Masalan: Yaponiyada (Taizo Masuda, Mitsuhiro Iyoda, Yuta Yasumatsu, Masamori Endo), Kanadada (Jean-Francois Bisson), Germaniyada (Stephan Dottermusch, Ian A. Howard, Bryce S. Richards), Xitoyda (Pan Guo, Mingyu Ou, Yan Liu, Yulong Tang, Jun Zhou, LanLing Lan, Pengfei Xiang, Hongfei Qi, Xiuhua Ma, Zhang Mo, Wang Zirong, Wang Shuxin, Zhang Xinxiang) va boshqalar.

Taizo Masuda va uning hamkasblari 2017-yilda, sensibilizator eritmasi yordamida quyosh nuri bilan ko'ndalang damlanadigan optik tolali lazerni tadqiq qilgan. Bu tajriba uchun konsentrator sifatida toroidal linza ishlatilgan. 2020-yilda shu guruh, Nd³⁺-kiritilgan kvartslar optik tolali lazerning maksimal chiqish quvvati atigi 1.3 mW ekanligini rodanim 6G eritmadan (sensibilizator) foydalanib ko'rsatgan.

Germaniyalik Stephan Dottermusch va uning hamkasblari 2023-yilda, birlamchi konsentratorsiz Nd³⁺-kiritilgan kvartslar optik tolali lazer uchun 15 mW lazer chiqish quvvati, umumiy samaradorligi 0.023 % bo'lishi aniqlangan. Ushbu tadqiqot uchun qattiq holatdagi sensibilizatorlardan foydalanilgan. Xitoylik Pan Guo va boshqalar 2021-yilda, simulyatsion metod yordamida, birlamchi konsentratorli quyosh nuri bilan damlanadigan optik tolali lazerlar uchun 2.6 W lazer chiqish quvvatiga erishgan. Umumiy samaradorlik tushayotgan quvvatga nisbatan 0.26 % ni tashkil etgan.

2012-yildan boshlab quyosh nuri bilan damlanadigan optik tolali lazerlar o'rganib kelingan bo'lsada, lazerning umumiy samaradorligini oshirish uchun turli xil konsentratorlardan foydalanish, bir hamda ko'p yadroli optik tolalarning turli konfiguratsiyalari, lazer chiqish quvvati bilan bog'liq parametrlarni o'rganish bo'yicha tadqiqotlarni rivojlantirishga yetarlicha e'tibor berilmagan va hozirgi kunda dolzarb vazifa hisoblanadi.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim va ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi.

Dissertatsiya ishi O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Ion plazmasi va lazer texnologiyalari institutining quyidagi "Turli usullar bilan uyg'otiluvchi

³ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni, 29.10.2020-yildagi PF-6097-son.

lazerlarning yangi materiallar va texnologiyalarni qo'llash asosida samaradorligini oshirish mexanizmlarini tadqiq qilish“ (2021-2024) byudjet mavzusi doirasida amalga oshirilgan.

Tadqiqotning maqsadi. Birlamchi konsentratorli va konsentratorsiz quyosh nuri bilan ishlaydigan bir hamda ko'p yadroli optik tolali lazerlarning turli konfiguratsiyalari uchun Monte Karlo fotonlarni kuzatishga asoslangan simulyatsiya usuli yordamida, lazer chiqish quvvati va samaradorligini oshirish, optimal tolali lazerlar konfiguratsiyalarini aniqlash bo'yicha yangi yechimlarni taklif qilishdan iborat.

Tadqiqot vazifalari:

birlamchi konsentratorsiz quyosh nuri bilan damlanadigan Nd^{3+} -kiritilgan kvarts optik tolali lazerlar modelini ishlab chiqish;

birlamchi konsentratorsiz quyosh nuri bilan damlanadigan bir yadroli Nd^{3+} -kiritilgan kvarts optik tolali lazerlarning umumiy samaradorligini va quvvat taqsimotini Monte-Karlo foton yo'lini kuzatish usuli yordamida aniqlash;

chiziqli parabolik konsentrator orqali quyosh nuri bilan damlanadigan Nd^{3+} -kiritilgan kvarts optik tolali lazerlar modelini ishlab chiqish;

chiziqli parabolik konsentrator yordamida quyosh nuri bilan ko'ndalang damlanadigan bir yadroli Nd^{3+} -kiritilgan kvarts optik tolali lazerlarni umumiy samaradorligini va quvvat taqsimotini aniqlash;

birlamchi konsentratorli fokusi halqa shaklidagi Frenel linza orqali quyosh nuri bilan damlanadigan Nd^{3+} -kiritilgan kvarts optik tolali lazerlar modelini ishlab chiqish;

fokusi halqa shaklidagi Frenel linzasi orqali quyosh nuri bilan ko'ndalang damlanadigan bir va ko'p yadroli Nd^{3+} -kiritilgan kvarts optik tolali lazerlarning umumiy samaradorligini va lazer chiqish quvvatini aniqlash.

Tadqiqot obyeksi. Qattiq holatdagi bir va ko'p yadroli Nd^{3+} -kiritilgan kvarts optik tolalar, sensibilizatorlar, fokusi halqa shaklidagi Frenel linza, chiziqli parabolik konsentrator va lazer rezonatorlari.

Tadqiqot predmeti. Quyosh fotonlarining lazer faol muhiti (tolalar) va sensibilizator (Rhodamine 6G) bilan o'zaro ta'sirlanishidagi fizik jarayonlari: fotonlarning faol muhitda yutilishi, lyuminessensiya, sensibilizatoridan tola yadrosiga energiya uzatilishi, quyosh nurlanishining keng polosali spektri bilan optik damlangan faol muhitlarda lazer nurlanishini hosil qilish jarayonlar.

Tadqiqot usullari. Lazer faol muhiti vazifasini bajaruvchi bir va ko'p yadroli optik tolalar, quyosh nurlanishi va sensibilizatorlarning spektral xususiyatlari hisobga olinib, lazer tizimlarida sodir bo'ladigan tasodifiy jarayonlarni simulyatsiya qilishga asoslangan usullar qo'llaniladi. Simulyatsiya modeli Monte-Karlo fotonlar yo'lini kuzatish metodidan foydalanishga asoslanadi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagicha:

Monte-Karlo foton yo'lini kuzatish usuli yordamida birlamchi konsentratorsiz quyosh nuri bilan damlanadigan bir yadroli optik tolali lazerning simulyatsion modeli ishlab chiqilgan;

birlamchi konsentratorsiz, qoplama diametri $125 \mu m$, yadro diametri $16 \mu m$ va uzunligi $190 m$ bo'lgan bir yadroli kvarts optik tola uchun lazer chiqish quvvati 1

mW bo'lib, quyosh nuridan lazer nurlanishiga o'tkazish samaradorligi $1.4 \cdot 10^{-3}$ % ekanligi Monte Karlo foton yo'lini kuzatish usuli yordamida aniqlangan;

chiziqli parabolik konsentrator orqali quyosh nuri bilan damlanadigan Nd³⁺-kiritilgan bir yadroli kvarts optik tolali lazer sistemasining parametrlarini hisobga olgan holatda, Monte-Karlo foton yo'lini kuzatish usuli yordamida simulyatsiya modeli ishlab chiqilgan hamda umumiy quvvat taqsimoti, lazer chiqish quvvati va lazer umumiy samaradorligi aniqlangan;

ilk bor yuzasi 1 m² bo'lgan chiziqli parabolik konsentratoridan foydalanilganda tushayotgan quyosh nurlanishi quvvati 900 W bo'lganda, uzunligi 193 m bo'lgan to'qqiz yadroli optik tola uchun lazerning chiqish quvvati 15.65 W, umumiy samaradorligi 1.74 % ekanligi ko'rsatilgan;

ilk bor tolalar radiusi bo'ylab harorat taqsimotini hisobga olgan holda, fokusi halqa shaklidagi Frenel linzalasi asosidagi birlamchi konsentratorli tolali lazerning simulyatsiya modeli ishlab chiqilgan;

ilk bor birlamchi konsentrator vazifasini bajaruvchi fokusi halqa shaklidagi Frenel linza orqali bir va ko'p yadroli optik tolali quyosh lazerlari simulyatsion usul yordamida umumiy samaradorligi eng yuqori qiymati 9 ta yadroli optik tola uchun 2 % ga, eng yuqori chiqish quvvati 20.36 W ga tengligi aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

birlamchi konsentratorsiz bir yadroli Nd³⁺-kiritilgan optik tolali quyosh lazerining simulyatsion modeli Monte-Karlo foton yo'lini kuzatish metodi yordamida yaratilgan;

chiziqli parabolik konsentrator orqali quyosh nuri bilan damlanadigan bir yadroli Nd³⁺-kiritilgan kvarts optik tolali lazerlar simulyatsiya modeli yaratilgan;

simulyatsion usul yordamida, 1 m² yuzali chiziqli parabolik konsentratorida 193 m to'qqiz yadroli optik tola uchun lazer chiqish quvvati 15.65 W, umumiy samaradorlik 1.74 % ni tashkil etishi asoslangan;

fokusi halqa shaklidagi Frenel linzasi orqali quyosh nuri bilan damlanadigan bir va ko'p yadroli Nd³⁺-kiritilgan optik tolali lazerlar uchun optik tola radiusi bo'yicha temperatura taqsimotini hisobga olgan holda simulyatsion modeli ishlab chiqilgan;

to'qqiz yadroli optik tola uchun fokusi halqa shaklidagi Fresnel linzalari yordamida maksimal samaradorlik 2 % ga va chiqish quvvati 20.36 W ga yetishi mumkinligi ko'rsatilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Tadqiqot ishida o'z aksini topgan xulosalarning ishonchliligi fotonika va quyosh nuri bilan damlanadigan optik tolali lazer fizikasining zamonaviy usullaridan foydalanish bilan izohlanadi. Nazariy olingan natijalar lazer fizikasining barcha jarayon va qoidalari yordamida asoslanib, shu sohada ishlaydigan boshqa mualliflarning tajribaviy natijalariga o'zaro mos kelishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati quyosh nurlanishi bilan ishlaydigan bir va ko'p yadroli Nd³⁺-kiritilgan kvarts optik tolali lazerlarning yangi simulyatsion modeli quyosh yordamida optik damlanadigan lazerlar samaradorligini oshirish bo'yicha nazariy tadqiqotlar olib borishda va optimal yechimlarini aniqlashda

qo‘llanilishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundan iboratki, ushbu taklif qilinayotgan ilmiy yechimlar quyosh nurida ishlaydigan bir va ko‘p yadroli kvartslar optik tolali lazerlarning optimal konfiguratsiyalarini aniqlash, samaradorligini oshirish, quyosh energiyasidan foydalanishda yangi samarali texnologiyalarni ishlab chiqish va yaratishda foydalanish mumkinligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Quyosh nurida ishlaydigan tolali lazerlar bo‘yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

optik tolali quyosh lazerlarning simulyatsiya natijalar xorijiy nashrlardagi bir qator tadqiqotlarda (1. Liu, J., Zheng, B., Yang, J., Li, B., Tang, J., He, H., Zhang, Q., Zhang, X. and Wang, P., 2024. A novel Nd³⁺-doped fiber fabricated by curable nanocomposites for 916 nm laser. *Optics & Laser Technology*, 177, p.111042; 2. Küblböck, M., Will, J. and Fattahi, H., 2024. Solar lasers: Why not?. *APL Photonics*, 9(5); 3. Meehan, B., 2024. A Comprehensive Materials Approach to Thermal Management in Fiber Lasers. A PhD Dissertation (Clemson University, Canada);) foydalanilgan. Olingan natijalardan foydalanish, mualliflarga hozirgi kunda tolali lazerlarning o‘zgartirish samaradorligi bo‘yicha erishilgan natijalardan sezilarli darajada oshirish mumkinligini asoslash imkonini bergan.

optik tolali quyosh lazeri tizimida sodir bo‘ladigan fizik jarayonlarni modellashtirishda olingan natijalari O‘zR FA Konstruktorlik byuro va Tajriba ishlab chiqarish Ilmiy texnik markazida 2021-2024 yillarda olib borilgan “Quyosh uskunalari parametrlarini optimallashtirish va ishlatish uchun hisob modellarini yaratish va tadqiq qilish” byudjet mavzusidagi fundamental tadqiqotlar ilmiy-texnikaviy vazifalarini bajarishda, xususan: Frenel linzasi yordamida mujassamlashgan quyosh nurining hajmiy yutilishini aniqlashda foydalanilgan (O‘zbekiston Fanlar Akademiyasining 2024-yil 17-dekabrda № 2/1255-2801 sonli ma’lumotnomasi). Ilmiy natijadan foydalanish, quyosh nuri energiyasini issiqlik energiyasiga aylantirishda quyosh kollektoridagi konvektiv va nurlanish orqali issiqlik almashinuv jarayonini tadqiq qilish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari 9 ta xalqaro va respublika miqyosidagi ilmiy-amaliy konferensiyalarida muhokamadan o‘tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e‘lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 14 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan 4 tasi maqola, O‘zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etishga tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 4 ta maqola, jumladan, 2 tasi xorijiy ilmiy jurnallarida chop qilingan. Bitta elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro‘yxatdan o‘tkazilganligi to‘g‘risidagi guvohnoma olingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to‘rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning umumiy hajmi 102 sahifani tashkil etib, ularda 29 ta rasm va 7 ta jadval mavjud.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

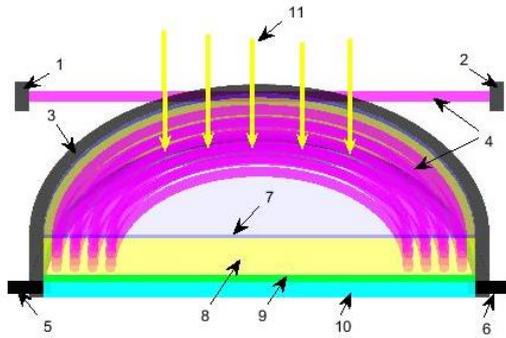
Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari shakllantirilgan, tadqiqot obyekti, predmeti va usullari aniqlangan, olingan natijalarning ilmiy yangiligi, ilmiy va amaliy ahamiyati, tadqiqotning ishonchliligi hamda tadqiqot natijalarining joriy qilinishi, ishning aprobatsiyasi va dissertatsiya tuzilishi haqida qisqacha ma'lumot keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Quyosh nuri bilan damlanadigan optik tolali lazerlar muammolarining hozirgi holati”** deb nomlangan birinchi bobida adabiyotlar tahlili asosida birlamchi konsentratorsiz va konsentratorli quyosh nuri bilan damlanadigan tolali lazerlarning samaradorligiga oid tajribaviy va nazariy tadqiqotlar haqida umumiy ma'lumotlar keltirilgan. Sensibilizator vazifasini bajaruvchi rodamin 6G (R6G) eritmasi orqali neodim kiritilgan kvarts tolali lazerlarning chiqish quvvatlari tahlil qilingan. Lekin, bugungi kungacha bir va ko'p yadroli Nd^{3+} - kiritilgan kvarts tolali lazerlarning optimal uzunligini, shu optimal uzunlik uchun eng yuqori lazer chiqish quvvatini tadqiq qilinmaganligini e'tiborga olgan holda dissertatsiya ishining asosiy maqsad va vazifalari shakllantirilgan.

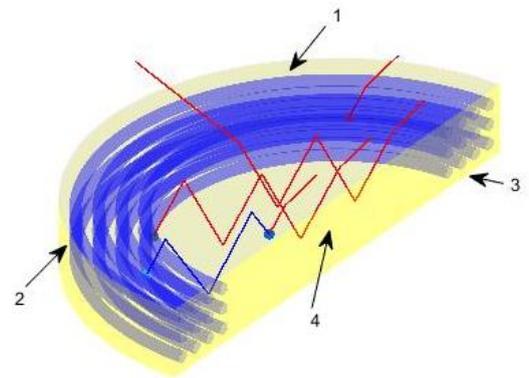
Dissertatsiyaning **“Quyosh nuri bilan damlanadigan optik tolali lazerlarni simulyatsiya usuli bilan tadqiq qilish”** deb nomlangan ikkinchi bobida Monte Karlo foton yo'lini kuzatish usulidan foydalanilgan. Yorug'likning yutilish uzunligi, qaytish koeffitsienti, qaytish burchagi, sinish burchagi, yutilish jarayonlarini modellashtirish, simulyatsion model orqali optik tola shakli (torus) va undagi tenglamalar, bo'yicha ma'lumot keltirilgan. Uch o'lchamli Dekart koordinatalar sistemasida torusning koordinatalarini topish tenglamalari orqali torusgacha bo'lgan masofani topish uchun to'rtinchi darajali parametrik tenglama keltirib chiqarilgan.

Dissertatsiya ishining **“Birlamchi konsentratorsiz quyosh nuri bilan damlanadigan bir yadroli optik tolali lazerlar”** deb nomlangan uchinchi bobida birlamchi konsentratorsiz quyosh nuri bilan damlanadigan bir yadroli tolali lazerlar tadqiq qilingan. Tolali quyosh lazeri qurilmasining qismlari, lazer samaradorligini oshirish uchun foydalanilgan sensibilizator va dixroik oynaning xususiyatlari, sensibilizatorning yutilish va nurlanish spektri, optik tolaning yutilish spektri, neodim kiritilgan kvarts tolali lazer energetik sathlari uchun tezlik tenglamalari keltirilgan hamda chiqish quvvati hisoblangan. Birlamchi konsentratorsiz tolali lazerlarning sxematik konstruksiyasi 1-rasmda ko'rsatilgan.

Tolali quyosh lazerining barcha qismlarini o'z ichiga oladigan radiusi 15 sm va balandligi 1.5 mm bo'lgan silindrsimon kamera tanlab olingan. Kameraning devorlari: pastki asosi va ichki tomonlari bir nechta dielektrik qatlamlardan iborat bo'lgan qoplama texnologiyasi bilan qayta ishlangan va uning qaytarish koeffitsienti 96 % ga teng (2-rasm). Kameraning ishchi yuzasi 707 sm^2 ni tashkil qilib, yorug'lik nurlari shu yuzadan kamera ichiga kiradi. Uzunligi 190 m, qoplama diametri 125 μm va yadro diametri 16 μm bo'lgan uzun ingichka optik tola silindrsimon kamera ichida halqa shaklida o'raladi.



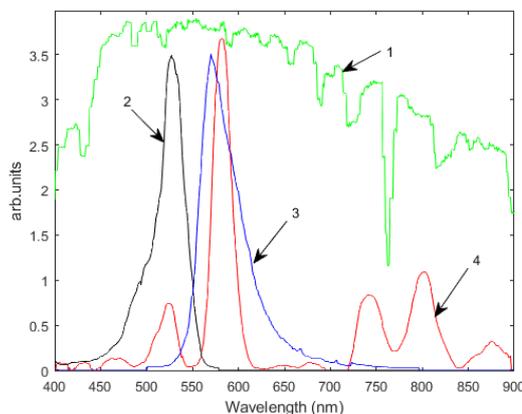
1-rasm. Lazerning sxematik konstruksiyasi. 1, 2-rezonator ko'zgulari 3-tashqi qoplama, 4-optik tolalar, 5, 6-sovutish suvi uchun kirish va chiqish, 7-dixroik oyna, 8-R6G eritma, 9-yuqori qaytaruvchi oyna, 10-sovutuvchi qism, 11-quyosh nurlari.



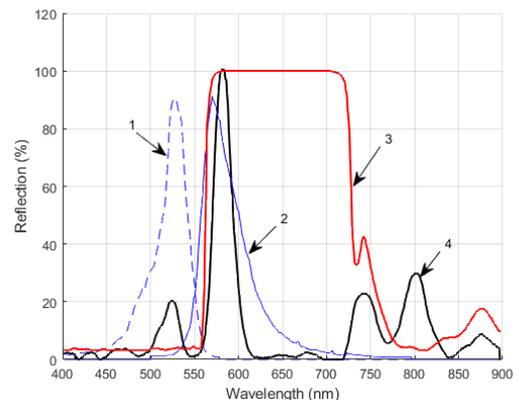
2-rasm. Foton yo'lining sxematik diagrammasi va uning tolada yutilishi. 1-dixroik oyna, 2-yon devor, 3-pastki devor, 4-R6G eritmasi.

R6G eritma Nd^{3+} ionlari uchun sensibilizator rolini o'ynaydi, chunki 3-rasmdagi spektrlardan ko'rinib turibdiki, R6G sensibilizator 400 nm dan 587 nm gacha bo'lgan kengroq spektrni yutadi va eng yuqori nuqtasi 527 nm to'lqin uzunligi uchun 3.49 sm^{-1} ga to'g'ri keladi. R6Gning nurlanish spektri 501 nm va 796 nm oralig'ida joylashgan bo'lib, bu tola yadrosidagi Nd^{3+} ionlarining eng yuqori yutilish diapazoni bilan juda mos keladi.

Silindrsimon kameraning ustki qismiga dixroik oyna joylashtirilgan (2-rasm). Dixroik oynaning maqsadi potensial yutilishi mumkin bo'lgan fotonlarni kameradan chiqib ketishiga to'sqinlik qiladi. Oyna 550 nm dan 725 nm gacha bo'lgan to'lqin uzunliklari uchun 100 % ga yaqin qaytarish qobiliyatiga ega. Bu diapazon Nd^{3+} ionlarining yutilish diapazoni hamda R6G sensibilizatorining nurlanish spektri bilan mukammal tarzda mos keladi (4-rasm). 550 nm va 725 nm diapazonidan tashqari oyna deyarli shaffof bo'lib, yutilmaydigan fotonlarning chiqib ketishiga imkon beradi. Bu tizimning haddan tashqari qizib ketishining oldini olishga yordam beradi.



3-rasm. 1-Quyosh nurlanishi spektri, 2-R6G yutilish spektri, 3- R6G nurlanish spektri, 4- tola yadrosining yutilish spektri.



4-rasm. 1 va 2- R6G yutilish va nurlanish spektri, 3- dixroik oyna qaytarish qobiliyati spektri, 4- tola yadrosining yutilish spektri.

Ishlab chiqilgan modelning “qora quti” turidagi modellashtirishlardan farqli afzalligi shundaki, u tizimdagi har bir elementning ishlashini baholash imkonini beradi. Ushbu afzallikdan foydalanib, biz tizimdagi elementlar o‘rtasida tushayotgan quyosh energiyasining quvvat taqsimotini hisoblab chiqilgan. Natijalar 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Quvvat taqsimoti

Jarayonlar	Quvvat (W)	Nisbiy quvvat (%)
Umumiy tushayotgan fotonlar	70.7	100
Dixroik oyna orqali sinib kirganlar	68.06	96.26
Dixroik oynadan chiqib ketganlar	26.84	37.96
Dixroik oyna yuzasidan qaytganlar	2.62	3.7
Yutilmagan fotonlar	34.34	48.57
R6G eritmasida yutilganlar	7.38	10.44
Pastki asosdagi yo‘qotishlar	5.66	8
Yon tomondagi yo‘qotish	1.21	1.7
Tola yadrosida yutilganlar	0.0297	0.042
Chiqish quvvati	1e-03	1.4e-03

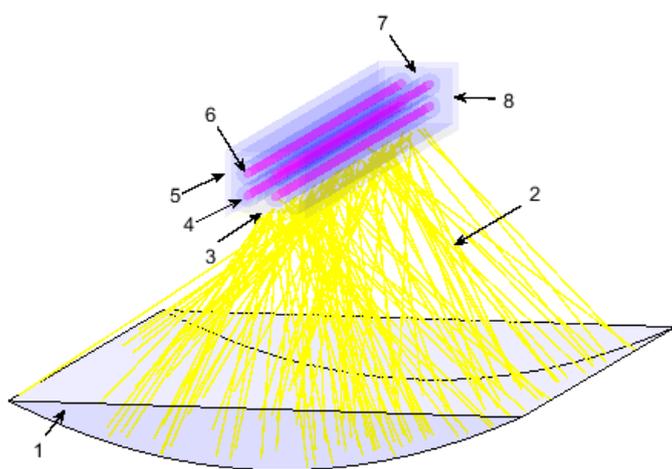
1-jadvaldagi ma’lumotlar tizimdagi har bir element va jarayondagi yo‘qotishlarni ko‘rsatadi. Yuqorida aytib o‘tilgan quvvat taqsimoti, kamera tomonlaridagi yo‘qotishlar va boshqa parametrlarni tahlil qilish bizga lazer chiqish quvvatini hisoblashga olib keladi. Nd³⁺-kiritilgan kvars tola uchun to‘rt energetik darajali sxemadan foydalaniladi. Lazer chiqish quvvati to‘yinganlik intensivligi (I_s), tola yadrosi hajmi (V_{core}), tola yadrosining radiusi, kichik signalni kuchaytirish koeffitsienti (γ'_0), tola yadrosida yutiladigan quvvat, rezonator oynalarida qaytarish koeffitsientlari, faol muhitning ichki yo‘qotish koeffitsienti va boshqa parametrlarga bog‘liq. Shunday qilib, yadro diametri $16 \mu m$, qoplama diametri $125 \mu m$ va uzunligi $190 m$ bo‘lgan bir yadroli neodim kiritilgan kvars tolali lazerning chiqish quvvati (1)-tenglama asosida $1 mW$ ga teng ekanligi topilgan.

$$P_{ext} = \frac{\gamma'_0 hc}{\delta_e \tau_f \lambda_L} V_{core} \left(1 - \sqrt{\frac{\alpha_{res}}{\gamma'_0}} \right)^2 \quad (1)$$

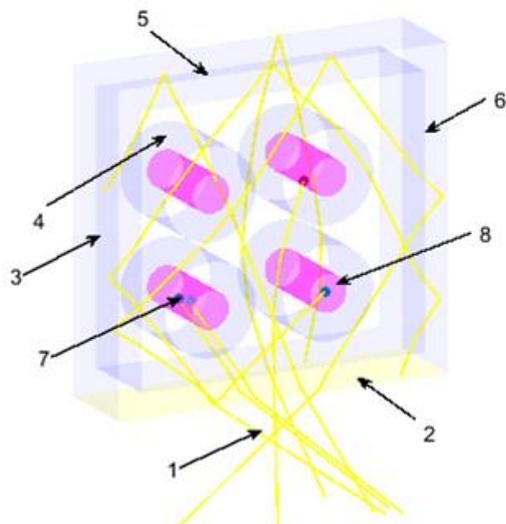
Bu quyosh nurini lazer nuriga aylantirish samaradorligi $1.4 \cdot 10^{-3} \%$ ga to‘g‘ri keladi. Ushbu tadqiqotda, ishlab chiqilgan model va hisoblash usulidan olingan natijalar boshqa eksperimental tadqiqot natijalari bilan mos keladi.

Dissertatsiyaning “**Chiziqli parabolik konsentrator va Frenel linza asosidagi bir va ko‘p yadroli optik tolali quyosh lazerlar**” deb nomlangan

to'rtinchi bobida birlamchi konsentrator vazifasini bajaruvchi chiziqli parabolik konsentrator va fokusi halqa shaklidagi Frenel linza asosidagi bir va ko'p yadroli tolali quyosh lazerlari o'rganilgan. Chiziqli parabolik konsentrator orqali Monte-Karlo fotonlarni kuzatish metodiga asosan bir yadroli Nd^{3+} -kiritilgan kvarts tolali lazerlarning yangi modeli taklif etilgan. Fokus uzunligi 35 sm bo'lgan konsentrator fokusiga qoplama diametri 1 mm va yadro diametri $200 \mu m$ Nd^{3+} -kiritilgan kvarts tola joylashtirilgan. Kamerani kengligi 6 mm, uzunligi 30 sm, chuqurligi 4.5 sm (5-rasm).



5-rasm. Lazer tizimining umumiy ko'rinishi. 1- chiziqli parabolik konsentrator, 2-quyosh nuri, 3-kvarts shisha, 4-tola qoplama, 5, 7, 8-kamera tomonlari, 6- tola yadrosi.



6-rasm. Foton yo'lining sxematik diagrammasi va uning tolada yutilishi. 1-quyosh nuri, 2-kvarts shisha, 3, 5, 6-kamera tomonlari 4-tola qoplama, 7-tola yadrosida yutilgan foton, 8- tola yadrosi.

6-rasmda kamera kesim yuzasining kattalashtirilgan ko'rinishi ko'rsatilgan. Kamera qalinligi 2 mm bo'lgan to'rtburchak kvarts trubkasidan iborat. Uzunligi 91.5 m bo'lgan bir yadroli tolalar kameraga ustunlar va qatorlar shaklida joylashtirilgan. Tolalar to'plami 5 ta ustun va 40 qatordan iborat. Kameraning turli qismlarida quvvat taqsimoti hisoblab chiqilgan (2-jadval). Boshqa barcha quvvat taqsimotlari 70.7 W bo'lgan fotonlarning umumiy quvvatiga nisbatan foiz sifatida ko'rsatilgan.

2-jadval

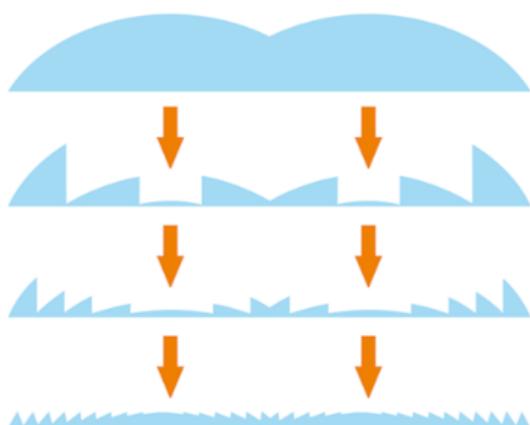
Quvvat taqsimoti

Jarayonlar	Quvvat (W)	Nisbiy quvvat(%)
Jami kiruvchi fotonlar	70.7	100
Konsentratoridagi yo'qotishlar	3.51	4.96
Kvarts yuzasiga tushmaganlar	0.16	0.22
Kvarts shishadan chiqib ketganlar	25.69	36.33
Kvarts shisha yuzasidan qaytganlar	1.83	2.58
Yutilmaydigan fotonlar	22	31.11

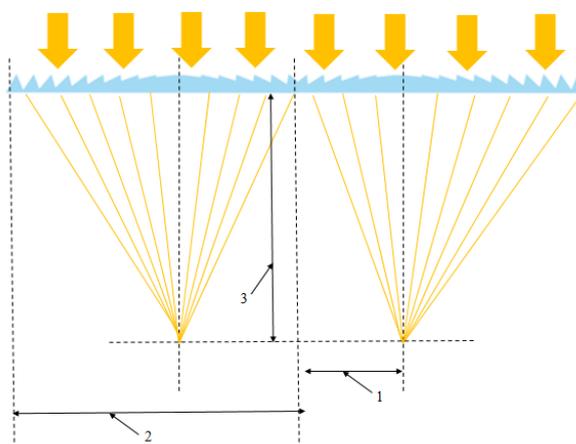
O'ng tomonda yo'qotishlar	5.47	7.74
Chap tomonda yo'qotishlar	5.46	7.73
Yuqori tomonda yo'qotishlar	2.12	2,99
Tola yadrosida yutilgan	4.46	6.3
Chiqish quvvati	0.109	0.15

Quyosh nurlanishining tolalar ichida yutilish taqsimotini hisobga olgan holda, 91.5 m uzunlikdagi optik tola uchun 4.46 % yutilish samaradorligi, 109 mW lazer chiqish quvvati, 0.15 % quyosh energiyasidan lazer nuriga o'tkazish samaradorligi aniqlangan. 1 m² yuzali katta chiziqli parabolik konsentratorida 193 m to'qqiz yadroli optik tola uchun lazer chiqish quvvati 15.65 W, umumiy samaradorlik 1.74 % ni tashkil etishi aniqlangan.

Bir tomoni tekis, ikkinchi tomoni qavariq bo'lgan ikkita yig'uvchi linzani birlashtirish orqali fokusi halqa shaklidagi Frenel linzasi tayyorlangan (7-rasm).

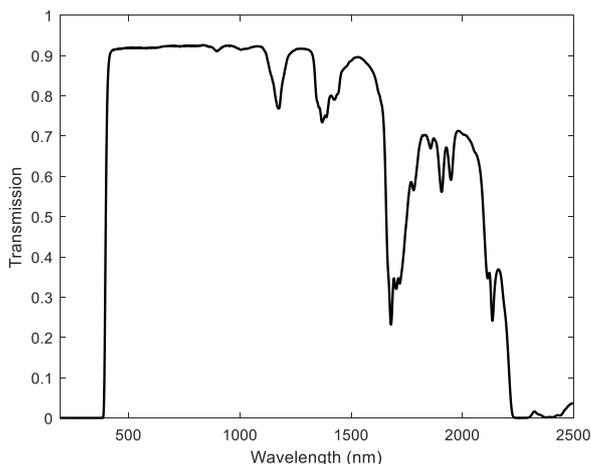


7-rasm. Bir tomoni tekis, ikkinchi tomoni qavariq ikkita sferik linzaning ko'ndalang kesimi sxemasi (Frenel linza).

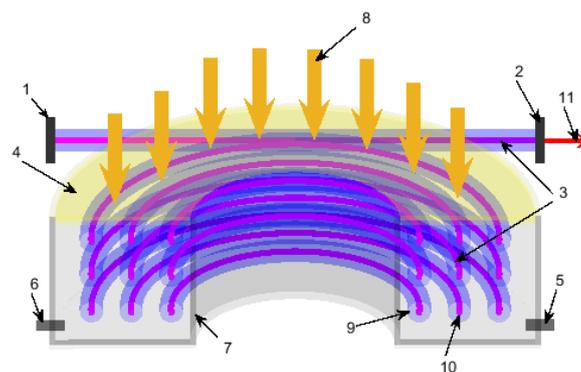


8-rasm. Yorug'likning Frenel linza fokusida yig'ilishi. 1-fokus radiusi, 2-linza radiusi, 3-linza fokus masofasi.

Frenel linzasining radiusi $R=60$ sm, fokus masofasi $f=90$ sm bo'lib, uning fokus tekisligida ichi bo'sh joy hosil bo'ladi. Konsentrator quyoshdan fokus tekisligiga kelayotgan parallel yorug'lik dastasini eni 2 sm bo'lgan halqa shaklida yig'adi. Halqa radiusi $r=9$ sm sifatida tanlangan. Buning sababi shundaki, optik tolaning eng kichik egrilik radiusiga bog'liq ravishda hisoblangan (8-rasm). Quyosh nurlanishi linza yuzasiga tushganda, linza nurlanishning ma'lum bir qismini o'tkazsa, ma'lum bir qismi linza materiali tomonidan yutiladi. 9-rasmda to'lqin uzunliklari 200 nm dan 2500 nmgacha bo'lgan diapazanda Frenel linzaning o'tkazish koeffisienti yorug'lik to'lqin uzunligiga bog'liqligi ko'rsatilgan.

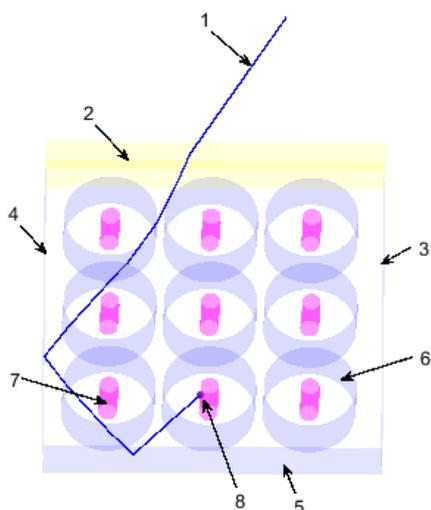


9-rasm. Frenel linza o'tkazish koeffitsientining yorug'lik to'liq uzunligiga bog'liqligi.

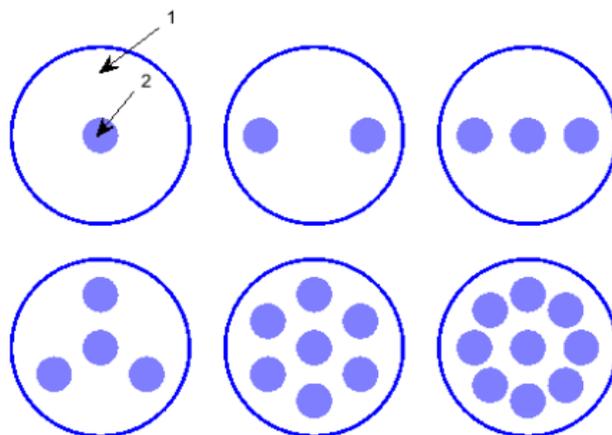


10-rasm. Quyosh tolali lazerning sxematik ko'rinishi. 1, 2—rezonator ko'zgulari 3—tolalar, 4—kvars shisha, 5, 6—sovutish sistemasi uchun suvning kirishi va chiqishi, 7—tashqi qoplama, 8—fokusda to'plangan quyosh nuri, 9—tola qoplama, 10—tola yadrosi, 11—lazer chiqish quvvati.

Quyosh nuri bilan damlanadigan tolali lazer damlash kamerasing sxemasi 10-rasmda ko'rsatilgan. Silindrsimon kamera tashqi radiusi 10.2 sm, ichki radiusi 7.8 sm va balandligi 4.7 sm bo'lgan dumaloq kameradan iborat. Kameraning yon tomonlari: ustki qismi yorug'lik kirishi uchun kvars shishadan, ichki va tashqi tomonlari va pastki qismi qaytarish koeffitsienti 95 % bo'lgan alyuminiy qoplamadan qilingan (11-rasm). Frenel linza fokusida to'plangan yorug'lik ushbu tizimga kvars shisha orqali kiradi va tola yadrosi tomonidan yutilishi mumkin.



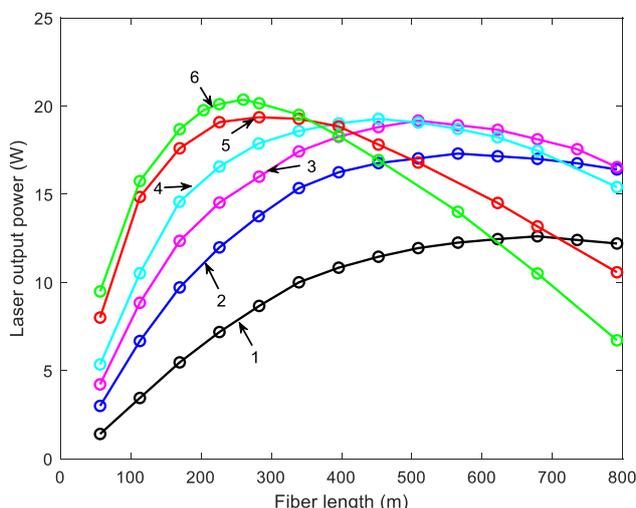
11-rasm. Foton yo'li va uning tolada yutilishi sxematik diagrammasi. 1—quyosh nuri, 2—kvars shisha, 3—ichki devor 4—tashqi devor, 5—pastki devor, 6—tola qoplama, 7—tola yadrosi, 8—tola yadrosida yutilgan foton.



12-rasm. Tola turlari. 1—tola qoplama, 2—tola yadrosi.

Bir va ko'p yadroli optik tolalar dumaloq kameraga o'ralgan. Tolaning kesim yuzasi ikki qismdan iborat: tashqi qism (qoplama) va ichki qism (yadro). Tashqi qismi, qoplama kremniy dioksidi (SiO_2), kvarts shishasidir. Qoplama markazi bo'ylab Nd^{3+} ionlari tola yadrosiga kiritiladi. Qoplama va yadro diametri mos ravishda 1 mm va $200 \mu\text{m}$. Halqa kameraning r radiusi egilishda yo'qotilishlarning oldini olish uchun 9 sm qilib tanlangan. Bir va ko'p yadroli neodim kiritilgan kvarts tolalar ko'ndalang kesimlari 12-rasmda ko'rsatilgan. Har bir tola uchun yutilish samaradorligi, quvvat taqsimoti va lazerning chiqish quvvati hisoblab chiqilgan. Yadrolar optik tola qoplamasida qanday joylashganligini ko'rib chiqaylik. Bir yadroli tolada yadro tolali qoplamaning markazida joylashgan. Ikki yadroli tolada yadrolar qoplama markazidan $300 \mu\text{m}$ masofada joylashgan. Uchta yadroli tolada bir yadro tolaning markaziga, qolgan ikkitasi esa markazdan $300 \mu\text{m}$ masofada joylashtiriladi. To'rt yadroli tolada bir yadro qoplamaning markazida, qolgan uchasi esa markazdan $300 \mu\text{m}$ masofada muntazam uchburchakning uchlarida joylashgan.

Keyin uchburchakning tomonlari taxminan $520 \mu\text{m}$ bo'ladi. Yettita yadroli tolada bir yadro qoplamaning o'rtasiga, qolgan oltitasi esa markazdan $300 \mu\text{m}$ masofada muntazam oltiburchakning uchlariga joylashtiriladi. Bunday holda, olti burchakning tomonlari $300 \mu\text{m}$. Oxirgi tola to'qqiz yadrodan iborat. Bir yadro qoplamaning o'rtasiga, qolgan sakkizta yadro esa teng tomonli sakkizburchakning uchlariga joylashtirilgan. Sakkizburchakning yon tomoni $230 \mu\text{m}$ ga to'g'ri keladi. 12-rasmdagi har xil uzunlikdagi barcha tolalar uchun tola yadrosida yutilgan quvvat va chiqish quvvati Monte-Karlo foton yo'lini kuzatish modeli yordamida hisoblab chiqilgan. Natijalar 13-rasmda keltirilgan.



13-rasm. Har xil turdagi tolalar uchun tola uzunligining chiqish quvvatiga bog'liqligi. 1-bir yadroli tola, 2-ikki yadroli tola, 3-uch yadroli tola, 4-to'rt yadroli, 5-yetti yadroli, 6-to'qqiz yadroli tola.

Bir yadroli tolaning 678 m optimal uzunligi uchun lazer chiqish quvvati 12.61 W, yadroda yutilgan quyosh quvvati 80.52 Wni tashkil qiladi. Eng yuqori chiqish quvvat to'qqiz yadroli tola uchun 20.36 W bo'lib, optimal tola uzunligi 260 m. Bu umumiy samaradorlik 2.0 % ga to'g'ri keladi. Ko'rib chiqilgan barcha tolalar turlari bo'yicha natijalar 3-jadvalda keltirilgan.

3-jadval

Simulyatsiya natijalari

Yadro soni	Optimal uzunlik (m)	Qator soni	Ustun soni	Yadro radiusi (μm)	Yutilgan quvvat (W)	Chiqish quvvati (W)	Umumiy samaradorlik (%)
1	678.57	60	20	100	80.52	12.61	1.23

2	565.47	50	20	100	121.4	17.3	1.7
3	508.93	45	20	100	148.76	19.17	1.89
4	452.38	40	20	100	163.4	19.27	1.895
7	282.74	25	20	100	174.35	19.36	1.9
9	260.12	23	20	100	196.36	20.36	2

Ishlab chiqilgan model tizimning har bir elementining ish faoliyatini baholash imkonini beradi. Shuning uchun lazer tizimining alohida elementlari bo'yicha quyoshdan kirayotgan quvvatning taqsimlanishini hisoblab chiqilgan. To'qqiz yadroli tolaning optimal uzunligi bo'yicha natijalar baholash uchun 4-jadvalda keltirilgan.

4-jadval

Quvvat taqsimoti

Jarayonlar	Quvvat (W)	Nisbiy quvvat (%)
Umumiy kirayotgan fotonlar quvvati	1017	100
Frenel linza yo'qotishlari	141.64	13.92
Fotonlarning damlash kamerasining yuzasiga etib bormasligi sababli quvvat yo'qolishi	30.74	3.02
Damlash kamerasi yuzasiga yetib boradigan fotonlarning quvvati	844.62	83.06
Kamera yuzasidan qaytgan fotonlar tufayli quvvat yo'qolishi	35.21	3.46
Damlash kamerasiga kirgan fotonlarning quvvati	809.41	79.6
Kameraga kirib yutilmagan fotonlarning quvvat yo'qotilishi	330.86	32.56
Nd ³⁺ tomonidan yutilmaydigan fotonlarning umumiy quvvati	228.52	22.47
Damlash kamerasining ichki tomonidagi yo'qotish	17.82	1.75
Tashqi tomondagi yo'qotish	14.25	1.4
Pastki asosda yo'qotish	21.6	2.12
Tola yadrosida yutilgan quvvat	196.36	19.3
Lazer chiqish quvvati	20.36	2

Bir va ko'p yadroli kvars tola uchun 296 K temperturada neodimning $^4I_{9/2}$, $^4I_{11/2}$ va $^4F_{3/2}$ energetik sathlaridagi Bolsman bandlik faktori (Boltzmann Occupation Factor, f_{ij}) hamda bo'linish funksiyasi (Partition Function, Z_i) hisoblab topilgan (5-jadval).

5-jadval

Kvars shishadagi Nd³⁺ energetik sathlari

Sath	Tasnifi (ij)	Energiya E_{ij} (cm^{-1})	Bolsman bandlik faktori (f_{ij})	Bo'linish funksiyasi (Z_i)
$^4I_{9/2}$	01	0	0.3823	2.615

	02	55	0.2926	
	03	155	0.18	
	04	255	0.11	
	05	495	0.0345	
${}^4I_{11/2}$	11	1954	2.86e-05	2.766
	12	2035	1.929e-05	
	13	2145	1.130e-05	
	14	2220	7.849e-06	
	15	2250	6.784e-06	
	16	2301	5.294e-06	
${}^4F_{3/2}$	21	11388	3.439e-25	1.5
	22	11530	1.724e-25	

Quyosh nuri bilan damlanadigan tolali lazerning harorat taqsimoti faol muhitning radiusiga, faol muhitning uzunligiga, sovutish tizimiga, faol muhitda yutilgan quvvatga, issiqlik o'tkazuvchanligiga, tola va sovutish suvi oqimi tomonidan tarqaladigan umumiy issiqlikka bog'liq. Temperaturani topish uchun (2)-differensial tenglamadan foydalanilgan.

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \left(\frac{1}{r}\right)\left(\frac{dT}{dr}\right) + \frac{Q}{K} = 0 \quad (2)$$

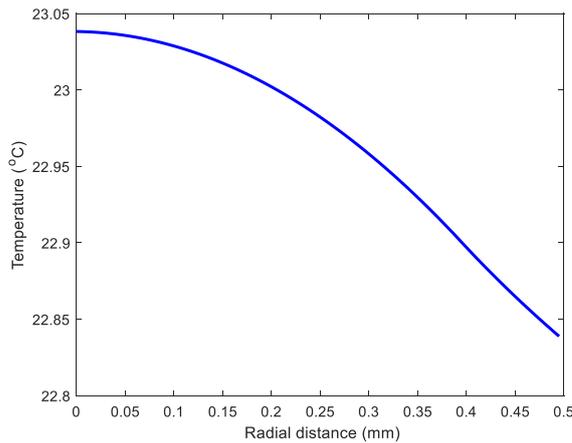
Bu yerda, $Q = P_h/\pi r_0^2 l$ - hajm birligi uchun hosil bo'lgan issiqlik, r_0 - faol muhitning radiusi, P_h - tola tomonidan tarqaladigan umumiy issiqlik quvvati, l - tolaning uzunligi. (2)-tenglamadan ixtiyoriy r radiusda faol muhitning markazi va sirti orasidagi $T(r)$ haroratning radial taqsimotini hisoblanadi.

$$T(r) = T(r_0) + \left(\frac{P_h}{4\pi r_0^2 l K}\right)(r_0^2 + r^2) \quad (3)$$

Bu yerda, $K = 1$ - issiqlik o'tkazuvchanligi, $T(r_0)$ - tola sirtidagi temperatura, Bu parametrlar temperaturani topish uchun yetarli emas. Biz yana bitta parametрни topishimiz kerak bo'ladi va bu h - sirt issiqlik uzatish koeffitsienti (tenglama (4)).

$$h = 10.47 \times 10^{-3} \frac{(D_2 / D_1)^{0.53}}{(D_2 - D_1)(D_2 + D_1)^{0.8}} f_r^{0.8} \quad (4)$$

Bu yerda, D_1 -faol elementning (tolalar to'plami) ekvivalent diametri, D_2 -sovutish suvli qatlamning ekvivalent ichki diametri, $f_r=25$ ml/s -oqim tezligi. $D_1 = \sqrt{n \cdot m} d_{fiber}$, bu yerda n -satrlar soni, m -tolalar to'plamidagi ustunlar soni, $D_2 = \frac{P}{\pi}$, bu yerda P -damlash kamerasi ko'ndalang kesimining perimetri (perpendikulyar sovutish suvi oqimining yo'nalishiga). Yuqoridagi tenglamalardan foydalanib, optik tolaning radiusi bo'yicha harorat taqsimotini hisoblangan (14-rasm).



14-rasm. Optik tola radiusi bo'yicha temperatura taqsimoti

uchun quyosh nurlanishi qolgan optik tolalarga nisbatan ko'proq yutiladi.

14-rasmdan ko'rinib turibdiki, tolaning markazida temperatura taxminan 23 °C, sirtida esa 25 ml/s oqim tezligi va sovutish suvi temperaturasi 20 °C bo'lganida taxminan 22.8 °C. Bu temperatura taqsimoti faqat to'qqiz yadroli optik tola uchun hisoblangan. Qolgan bir, ikki, uch, to'rt, yetti yadroli optik tolalarning markazidagi temperatura to'qqiz yadroli optik tola markazidagi temperaturadan kichik bo'lishi mumkin. Chunki to'qqiz yadroli optik tolada yadrolarining soni ko'pligi

XULOSA

Dissertatsiya ishida olib borilgan tadqiqotlar asosida quyidagi eng muhim natijalarga erishildi:

1. Monte-Karlo foton yo'lini kuzatish usuli yordamida birlamchi konsentratorsiz quyosh nuri bilan damlanadigan bir yadroli optik tola lazerining simulyatsion modeli ishlab chiqildi.
2. Birlamchi konsentratorsiz optik tola quyosh lazerining quvvat taqsimoti aniqlandi. Qoplama diametri 125 μm , yadro diametri 16 μm va uzunligi 190 m bo'lgan bir yadroli kvarts optik tola uchun lazer chiqish quvvati 1 mW bo'lib, quyosh nuridan lazer nurlanishiga o'tkazish samaradorligi $1.4 \cdot 10^{-3} \%$ ekanligi aniqlandi.
3. Chiziqli parabolik konsentrator orqali quyosh nuri bilan damlanadigan Nd^{3+} -kiritilgan kvarts optik tola lazerlar simulyatsiya modelini ishlab chiqildi;
4. Chiziqli parabolik konsentrator orqali bir yadroli optik tola quyosh lazerining quvvat taqsimoti aniqlandi. 91.5 m uzunlikdagi optik tola uchun 109 mW lazer chiqish quvvati aniqlandi. Natijada quyosh energiyasidan lazer nuriga o'tkazish samaradorligi 0.15 % ni tashkil etishi aniqlandi. 1 m^2 yuzali katta chiziqli parabolik konsentratorida 193 m to'qqiz yadroli optik tola uchun lazer chiqish quvvati 15.65 W, umumiy samaradorlik 1.74 % ni tashkil etishi aniqlandi.
5. Birlamchi konsentratorli fokusi halqa shaklidagi Frenel linzasi orqali quyosh nuri bilan damlanadigan Nd^{3+} -kiritilgan kvarts optik tola lazerlar uchun optik tola radiusi bo'yicha temperatura taqsimotini hisobga olgan holda simulyatsion modeli ishlab chiqildi.
6. Birlamchi konsentrator vazifasini bajaruvchi fokusi halqa shaklidagi Frenel linza orqali bir va ko'p yadroli optik tola quyosh lazerlari simulyatsion usul yordamida o'rganildi. Quyosh nurlanishidan lazer nuriga o'tkazish samaradorligi eng yuqori qiymati 9 ta yadroli optik tola uchun 2 % ga,

maksimal chiqish quvvati 20.36 W ga tengligi aniqlandi. Bu chiqish quvvati bir yadroli optik tola qaraganda 1.61 baravar yuqori va optimal optik tola uzunligi 2.6 baravar qisqa ekanligi aniqlandi.

**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

КАХХОРОВ АБДУЛЛА ГАФУР УГЛИ

**НЕОДИМОВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ С СОЛНЕЧНОЙ
НАКАЧКОЙ**

01.04.11- Лазерная физика

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

Ургенч – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей национальной комиссии при Министерстве Высшего Образования, науки и инновации Узбекистан за B2024.3.PhD/FM1161

Диссертация выполнена в институте ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова.

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: Сапаев Усман Каландарович,
доктор физика-математических наук, доцент
Вапаев Муродбек Эргашович,
кандидат физико-математических наук, PhD

Ведущая организация: Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова

Защита диссертации состоится «15» мая 2025 года в 14⁰⁰ 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 №786 (Адрес: 220100, г. Ургенч, ул. Х.Алимджана, дом 14. Тел.: (99862) 224-66-11, факс: (99862) 224-67-00).

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2025 года.
(Реестр протокола 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 последние годы в мире с целью эффективного использования солнечной энергии особое внимание уделяется прямому преобразованию широкополосного солнечного спектра в когерентное лазерное излучение, что считается одним из наиболее перспективных направлений, наряду с преобразованием солнечной энергии в тепловую и электрическую. В настоящее время растет интерес к использованию активных сред волоконных лазеров, которые относительно удобны и недороги, в дополнение к активным средам твердотельных лазеров для преобразования солнечной энергии в лазерную. Однако основной проблемой таких лазеров в настоящее время является низкая общая эффективность, и для решения этой проблемы особое внимание уделяется поиску новых материалов для активной среды волоконных лазеров, работающих на солнечном свете, подбору сенсibilизаторов, использованию дихроичных зеркал, многоядерных оптических волокон и другим подобным методам.

В университетах и исследовательских центрах развитых стран мира проводятся научные исследования с целью выявления высокоэффективных лазерно-активных сред, выбора подходящих сенсibilизаторов, оптимизации концентраторов и конфигураций солнечных лазеров для повышения эффективности волоконных лазеров с солнечной накачкой. В этом направлении приоритетными считаются исследования, в том числе по повышению эффективности за счет адаптации спектра поглощения одно- и многоядерных оптических волокон с использованием внутренних и внешних сенсibilизаторов, модифицирующих неиспользуемую часть солнечного спектра. В то же время для достижения наибольшей эффективности лазерной генерации при накачке солнечным светом волоконной лазерной системе актуальной задачей является создание симуляционной модели, наиболее полно учитывающей физические процессы, происходящие в лазерной системе, и определение на ее основе оптимальных решений.

В Республике Узбекистан реализуются широкомасштабные мероприятия по проведению исследований и изучению возможностей создания новых технологий по эффективному использованию солнечной энергии и преобразованию ее в лазерное излучение. Задачи поставлены постановлением № ПҚ-2789 от 17 февраля 2017 г. «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научных исследований»¹. При реализации этих задач важным является исследование концентраторов, сенсibilизаторов, одно- и многоядерных оптических волокон для прямого преобразования солнечной энергии в лазерную и повышения эффективности, создание симуляционных моделей для развития этого направления в нашей республике, моделирование на их основе физических процессов в различных волоконно-оптических

¹ Постановление Президента Республики Узбекистан от 17.02.2017 г. № ПП-2789.

солнечных лазерах, оценка оптимальных параметров волоконных лазеров, выявление новых перспективных лазерных материалов.

Настоящее диссертационное исследование в определенной степени служит реализации задач, обозначенных в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан»² от 7 февраля 2017 года и Указе № УП-6097 «Об утверждении Концепции развития науки до 2030 года»³ от 29 октября 2020 года, а также других нормативных документах, касающихся данной деятельности.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Исследования по диссертационной работе соответствуют приоритетному направлению развития науки и техники Республики Узбекистан IV «Разработка методов использования возобновляемых источников энергии, создание технологий и приборов на основе нанотехнологий, фотоники и других передовых технологий».

Степень изученности проблемы.

В различных научных центрах мира проводились научные исследования по теме волоконных лазеров, работающих на солнечном свете, и оценивались выходные параметры лазеров и общая эффективность. Наиболее важные результаты в этой области были достигнуты зарубежными учеными, например, японскими (Taizo Masuda, Mitsuhiro Iyoda, Yuta Yasumatsu, Masamori Endo), канадскими (Jean-Francois Bisson), немецкими (Stephan Dottermusch, Ian A. Howard, Bryce S. Richards), китайцы (Pan Guo, Mingyu Ou, Yan Liu, Yulong Tang, Jun Zhou, LanLing Lan, Pengfei Xiang, Hongfei Qi, Xiuhua Ma, Zhang Mo, Wang Zirong, Wang Shuxin, Zhang Xinxiang) и другие.

В 2017 году Taizo Masuda и его коллеги продемонстрировали волоконный солнечный лазер с поперечной накачкой, используя сенсibiliзирующий раствор и в качестве основного концентратора в этом эксперименте была использована тороидальная линза. В 2020 году эта группа продемонстрировала, что максимальная выходная мощность лазера на основе оптического волокна с внедрённым Nd^{3+} , поперечно накачиваемого солнечным светом через камеру, заполненную раствором R6G (сенсibiliзатора) в метаноле, составила всего 1.3 мВт.

В 2023 году Stephan Dottermusch из Германии и его коллеги достигли выходной мощности лазера 15 мВт и общей эффективности 0.023 % в кварцевом волокне, легированном Nd^{3+} , без какого-либо первичного концентратора. В 2021 году Pan Guo и др. из Китая достигли выходной мощности лазера 2.6 Вт для волоконных лазеров, при накачке солнечным излучением, используя метод моделирования. Для первичного концентратора использовалась линза Френеля с кольцевым фокусом. Общая эффективность составила 0.26 % по сравнению с входной мощностью.

² Указ Президента Республики Узбекистан от 7.02.2017 г. № УФ-4947.

³ Указ Президента Республики Узбекистан от 29.10.2020 г. № УФ-6097.

С 2012 года проводятся исследования оптических волоконных лазеров, работающих на солнечном излучении, однако недостаточно внимания уделено вопросам касаяемо использования различных типов концентраторов, изучения различных конфигураций одно и многоядерных оптических волокон, определения их оптимальной длины, анализа распределения мощности и выходной мощности лазера.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.

Диссертационная работа выполнена в рамках бюджетной темы «Исследование механизмов повышения эффективности лазеров, возбуждаемых различными методами на основе использование новых материалов и технологий» (2021-2024 гг) Института ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Республики Узбекистан.

Целью исследования является предложение новых решений для повышения выходной мощности и эффективности лазера, а также определение оптимальных конфигураций волоконного лазера с использованием метода моделирования Монте-Карло с отслеживанием фотонов для различных конфигураций одно- и многоядерных волоконно-оптических солнечных лазеров с первичным концентратором и без него.

Задачи исследования:

разработка модели волоконных кварцевых лазеров, легированных Nd^{3+} , с солнечной накачкой без первичного концентратора;

определение общей эффективности и распределения мощности одноядерных кварцевых волоконных лазеров, легированных Nd^{3+} , без первичного концентратора с использованием метода отслеживания фотонов Монте-Карло;

разработка модели кварцевых волоконных лазеров, легированных Nd^{3+} , накачиваемых солнечным излучением через линейный параболический концентратор;

определение общей эффективности и распределения мощности одноядерных кварцевых волоконных лазеров, легированных Nd^{3+} , при поперечной солнечной накачке через линейный параболический концентратор;

разработка модели солнечных кварцевых волоконных лазеров, легированных Nd^{3+} , накачиваемых солнечным излучением с помощью линзы Френеля с кольцеобразным фокусом в качестве первичного концентратора;

определить общей эффективности и выходной мощности лазеров на основе одно- и многоядерных кварцевых волокон, легированных Nd^{3+} , накачиваемых солнечным излучением через линзу Френеля с кольцеобразным фокусом.

Объект исследования. твердотельные одно- и многоядерные кварцевые волокна, легированные Nd^{3+} , сенсibilизаторы, линза Френеля с кольцеобразным фокусом, линейный параболический концентратор и рефлекторы, выполняющие роль лазерных резонаторов.

Предмет исследования. физические процессы взаимодействия солнечных фотонов с активной средой лазера (волокнами) и сенсibilизатором (родамин 6G): поглощение фотонов в активной среде, люминесценция, передача энергии от сенсibilизатора к ядру волокна, процессы формирования лазерного излучения в активных средах при накачке широкополосным спектром солнечного излучения.

Методы исследования. Используются методы, основанные на моделировании случайных процессов, происходящих в лазерных системах, с учетом параметров и спектральных свойств активной среды лазера, солнечного излучения и сенсibilизаторов. Симуляционная модель основана на методе трассировки фотонов Монте-Карло.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработана симуляционная модель одноядерного оптического волоконного лазера, работающего от солнечного света без первичного концентратора, с использованием метода Монте-Карло с трассировкой пути фотона;

С использованием симуляционной модели лазера без первичного концентратора определена выходная мощность лазера, которая составила 1 мВт, а эффективность преобразования солнечного света в лазерное излучение оказалась равной $1.4 \cdot 10^{-3}$ % для одноядерного кварцевого оптического волокна с диаметром оболочки 125 мкм, диаметром ядра 16 мкм и длиной 190 м;

рассматривая параметры одноядерного кварцевого волоконного лазера, легированного Nd^{3+} , освещаемого солнечным светом через линейный параболический концентратор, была разработана симуляционная модель с использованием метода трассировки пути фотона Монте-Карло, и были определены общее распределение мощности, выходная мощность лазера и общая эффективность лазера;

впервые было показано, что при использовании линейного параболического концентратора с площадью поверхности 1 м^2 и мощности падающего солнечного излучения 900 Вт выходная мощность лазера для девятиядерного оптического волокна длиной 193 м составляет 15,65 Вт при общей эффективности 1,74 %;

впервые разработана симуляционная модель волоконного лазера с первичным концентратором на основе линзы Френеля с колцевым фокусом, учитывающая распределение температуры по радиусу волокна;

впервые показано, что максимальная эффективность может достичь 2%, а выходная мощность — 20,36 Вт для девятиядерного оптического волокна при использовании линзы Френеля с колцевым фокусом.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

с использованием метода Монте-Карло с трассировкой траектории фотонов создана симуляционная модель одноядерного волоконного солнечного лазера, легированного Nd^{3+} , без первичного концентратора;

создана симуляционная модель одноядерных кварцевых волоконных лазеров, легированных Nd^{3+} , с солнечной накачкой через линейный

параболический концентратор;

методом симуляционного моделирования установлено, что выходная мощность лазера для девятиядерного оптического волокна длиной 193 м в линейном параболическом концентраторе площадью поверхности 1 м² составляет 15,65 Вт при общей эффективности 1,74 %;

разработана симуляционная модель для одно- и многоядерных волоконно-оптических лазеров, легированных Nd³⁺, с солнечной накачкой через линзу Френеля с кольцевым фокусом, с учетом распределения температуры по радиусу оптического волокна;

показано, что при использовании линзы Френеля для девятиядерного оптического волокна можно достичь максимальной эффективности 2% и выходной мощности 20,36 Вт.

Достоверность результатов исследования. Достоверность выводов, отраженных в исследовательской работе, объясняется использованием современных методов фотоники и физики оптоволоконных лазеров, работающих от солнечного света. Полученные теоретически результаты основаны на всех процессах и правилах лазерной физики и объясняются их взаимным согласием с экспериментальными результатами других авторов, работающих в этой области.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в том, что новая симуляционная модель одно- и многоядерных кварцевых волоконных лазеров, легированных Nd³⁺, работающих на солнечном излучении, может быть использована при проведении теоретических исследований по повышению эффективности лазеров с солнечной накачкой и поиску оптимальных решений.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что предлагаемые научные решения могут быть использованы для определения оптимальных конфигураций одно- и многоядерных кварцевых волоконных лазеров с солнечной накачкой, повышения их эффективности, а также разработки и создания новых эффективных технологий с использованием солнечной энергии.

Внедрение результатов исследований. На основе научных результатов волоконных лазеров, работающих на солнечном излучении:

результаты симуляции волоконно-оптических солнечных лазеров были использованы в ряде исследований в зарубежных публикациях (1. Liu, J., Zheng, B., Yang, J., Li, B., Tang, J., He, H., Zhang, Q., Zhang, X. and Wang, P., 2024. A novel Nd³⁺-doped fiber fabricated by curable nanocomposites for 916 nm laser. *Optics & Laser Technology*, 177, p.111042; 2. Küblböck, M., Will, J. and Fattahi, H., 2024. Solar lasers: Why not?, *APL Photonics*, 9(5); 3. Meehan, B., 2024. A Comprehensive Materials Approach to Thermal Management in Fiber Lasers, A PhD Dissertation (Clemson University, Canada);). Использование этих результатов, позволило авторам обосновать возможность существенного повышения эффективности преобразования волоконных лазеров по сравнению с достигнутыми в настоящее время результатами.

результаты, полученные при моделировании физических процессов, происходящих в одно- и многоядерных солнечных волоконных лазерных системах через линзу Френеля с кольцевым фокусом были использованы в НТЦ с КБ и ОП АН РУз. в 2021-2024 гг., при выполнении научно-технических заданий фундаментальных исследований по бюджетной теме «Создание и исследование расчетных моделей для оптимизации и использования параметров гелиотехники» (Справка Академии наук Узбекистана № 2/1255-2801 от 17 декабря 2024 года). Использование научных результатов позволило изучить процесс конвективного и лучистого теплообмена в солнечном коллекторе при преобразовании энергии солнечного света в тепловую энергию.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований обсуждались на 9 международных и республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов. Результаты, полученные по теме диссертации, изложены в 14 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 диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 102 страниц, в том числе 29 рисунков и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследования, определены объект, предмет и методы исследования, указана научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов, обоснованы достоверность исследования. Приведены сведения о внедрении результатов исследования, апробации и опубликованных работах, структуре диссертации.

В первой главе диссертационной работы под названием «**Современное состояние проблем солнечных волоконных лазеров**» приведены общие сведения об экспериментальных и теоретических исследованиях эффективности солнечных волоконных лазеров без первичного концентратора и с концентратором на основе анализа литературы. Проведен анализ выходной мощности неодимовых кварцевых волоконных лазеров через раствор родамин 6G (R6G), выступающий в качестве сенсibilизатора. Однако, учитывая тот факт, что оптимальная длина одно- и многоядерных кварцевых волоконных лазеров, легированных Nd^{3+} и максимальная выходная мощность лазера для этой оптимальной длины до конца не исследованы, были сформулированы основные цели и задачи диссертации.

Вторая глава диссертации под названием «**Исследование волоконных лазеров с солнечной накачкой, методом симуляционного моделирования**» использует метод Монте-Карло отслеживания траектории фотонов. В рамках симуляционной модели оптические волокна берутся в форме тора, коэффициенте отражения, угле отражения, угле преломления, моделировании процессов поглощения, решаются уравнения тора и приводится информация о типах и свойствах оптических волокон. В трехмерной системе координат Декарта получено параметрическое уравнение четвертого порядка для нахождения расстояния до тора через уравнения нахождения координат исследуемого тора. Изучены условия наблюдения явления полного внутреннего отражения в оптоволокне и выведены формулы угла приема оптического волокна и значения апертуры оптического волокна.

В третьей главе диссертации под названием «**Одноядерные волоконные лазеры с солнечной накачкой без первичного концентратора**» были исследованы одноядерные волоконные лазеры с солнечной накачкой без первичного концентратора. Представлены детали волоконного солнечного лазерного устройства, свойства сенсбилизатора и дихроичного зеркала, используемых для повышения эффективности лазера, спектр поглощения и испускания сенсбилизатора, спектр поглощения оптического волокна, длина поглощения, моделирование процессов отражения и преломления фотонов, уравнения скорости для уровней энергии кварцевого волоконного лазера с неодимовыми активными ионами и рассчитана выходная мощность. Схематическая конструкция волоконного лазера без первичного концентратора показана на рисунке 1, измененном для лучшей иллюстрации.

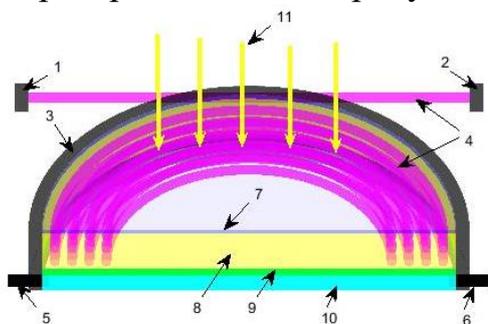


Рисунок 1. Схематическая конструкция волоконного лазера, работающего на солнечной энергии. 1, 2- зеркала резонатора, 3- внешнее покрытие, 4- оптические волокна, выполняющие роль активной среды, 5, 6- вход и выход охлаждающей воды, 7- дихроичное зеркало, 8- родамин 6G (R6G), 9- верхнее отражающее окно, 10-секция охлаждения, 11-солнечные лучи.

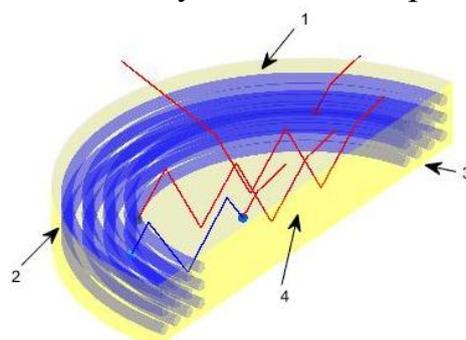


Рисунок 2. Принципиальная схема пути фотона и его поглощения в волокне. 1-дихроичное зеркало, 2- боковая стенка, 3-нижняя стенка, 4- раствор R6G.

Для размещения всех частей волоконного солнечного лазера была выбрана цилиндрическая камера радиусом 15 см и высотой 1.5 мм. Стенки камеры, такие как нижнее основание и внутренние стороны, обработаны по

технологии покрытия, состоящее из нескольких диэлектрических слоев, отражательная способность которого составляет 96 % (рисунок 2). Рабочая поверхность камеры составляет 707 см², через поверхности которой в камеру попадают световые лучи. Длинное тонкое оптическое волокно длиной 190 м, диаметром оболочки 125 μм и диаметром сердцевины 16 μм намотано в кольцо (расположенное рядами и столбцами) внутри цилиндрической камеры. R6G действует как сенсбилизатор для ионов Nd³⁺, как видно из графиков на рисунке 3, что сенсбилизатор R6G поглощает более широкий спектр от 400 до 587 нм с пиком поглощения 3.49 см⁻¹ для длины волны 527 нм. Спектр излучения R6G лежит в диапазоне 501–796 нм, что хорошо перекрывается с пиковой полосой поглощения ионов Nd³⁺ в сердцевине волокна.

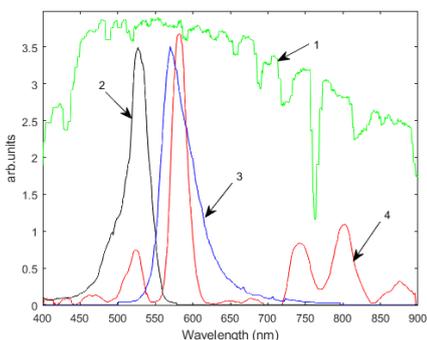


Рисунок 3. 1- Стандартный солнечный спектр, 2- Спектр поглощения R6G, 3- Спектр излучения R6G, 4- Спектр поглощения волокна.

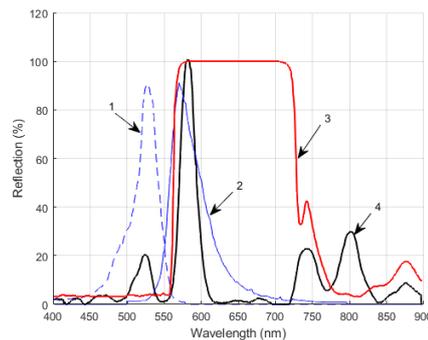


Рисунок 4. 1- спектр поглощения R6G, 2- спектр излучения R6G, 3- коэффициент отражения дихроичного зеркала, 4- спектр поглощения волокна.

В верхней части цилиндрической камеры размещено дихроичное зеркало (рисунок 2). Цель дихроичного зеркала предотвратить выход потенциально поглощаемых фотонов из камеры. Зеркало имеет коэффициент отражения около 100 % для длин волн от 550 до 725 нм. Этот диапазон идеально соответствует диапазону поглощения ионов Nd³⁺ и спектру излучения сенсбилизатора R6G (рисунок 4). За пределами диапазонов 550 нм и 725 нм стекло почти прозрачно, позволяя непоглощенным фотонам выходить наружу. Это поможет предотвратить перегрев системы. Преимущество разработанной модели перед традиционным моделированием типа «черный ящик» состоит в том, что она позволяет оценить работу каждого элемента системы. Используя это преимущество, мы рассчитали распределение мощности поступающей солнечной энергии между элементами системы. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Распределение мощности

Процессы	Мощность (W)	Относительная мощность (%)
Общие падающие фотоны	70.7	100
Преломленный через дихроичное зеркало	68.06	96.26
Фотоны покинувшие дихроичное зеркало	26.84	37.96
Фотоны отраженные от поверхности дихроичного зеркала	2.62	3.7

Непоглощенные фотоны	34.34	48.57
Поглощено раствором R6G	7.38	10.44
Потери на нижней основе	5.66	8
Потери на боковых стенках	1.21	1.7
Фотоны поглощенные сердцевиной волокна	0.0297	0.042
Выходная мощность	1e-03	1.4e-03

Данные в таблице 1 показывают потери в каждом элементе и процессе системы. Анализ вышеупомянутого распределения мощности, потерь со стороны камеры и других параметров позволяет нам рассчитать выходную мощность лазера. Для кварцевого волокна, легированного Nd^{3+} , используется четырех-уровневая схема лазера. Интенсивность насыщения выходной мощности лазера (I_s), зависит от объема сердцевины волокна (V_{core}), радиуса сердцевины волокна, коэффициента усиления малого сигнала (γ'_0), мощности, поглощаемой сердцевиной волокна, коэффициента отражения в зеркалах резонатора, внутреннего коэффициента потерь активной среды и от других параметров. Таким образом, выходная мощность кварцевого волоконного лазера с диаметром сердцевины $16 \mu\text{м}$, диаметром оболочки $125 \mu\text{м}$ и длиной 190 м оказывается равной 1 мВт на основе уравнения (1).

$$P_{ext} = \frac{\gamma'_0 hc}{\delta_e \tau_f \lambda_L} V_{core} \left(1 - \sqrt{\frac{\alpha_{res}}{\gamma'_0}} \right)^2 \quad (1)$$

Это соответствует эффективности преобразования солнечного излучения в лазерное излучение $1.4 \cdot 10^{-3} \%$. В этом исследовании результаты, полученные с помощью разработанной модели и описанного метода расчета, согласуются с результатами других экспериментальных исследований.

В четвертой главе диссертации под названием «**Одно и многоядерные солнечные волоконные лазеры на основе линейного параболического концентратора и линзы Френеля**» описываются одно и многоядерные солнечные волоконные лазеры на основе линейного параболического концентратора и линзы Френеля с кольцевым фокусом, которая выполняет функцию первичного концентратора. Исследована новая модель одноядерного кварцевого волоконного лазера, легированного Nd^{3+} , на основе метода Монте-Карло с отслеживанием фотонов через линейный параболический концентратор. Она была рассчитана путем помещения кварцевого волокна, легированного Nd^{3+} , шириной 6 мм , длиной 30 см , глубиной 4.5 см , диаметром оболочки 1 мм и диаметром сердцевины $200 \mu\text{м}$ в фокус концентратора с фокусным расстоянием 35 см (рисунок 5).

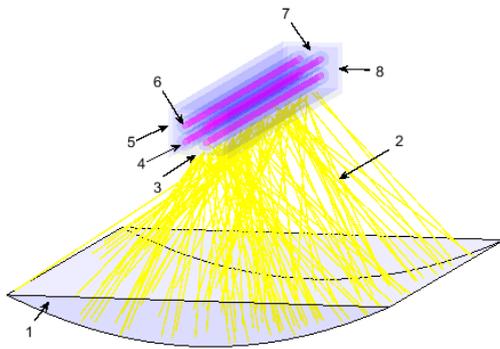


Рисунок 5. Общий вид лазерной системы. 1- линейный параболический концентратор, 2- солнечный свет, 3- кварцевое стекло, 4- оболочка волокна, 5, 7, 8- стороны камеры, 6- сердечник волокна.

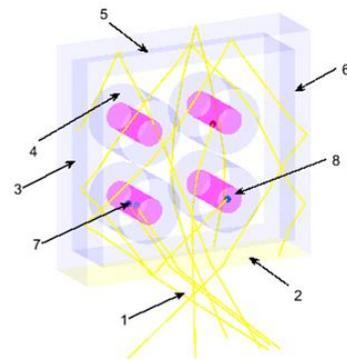


Рисунок 6. Принципиальная схема пути фотона и его поглощения в волокне. 1- солнечный свет, 2- кварцевое стекло, 3, 5, 6- стороны камеры, 4- оболочка волокна, 7- фотон, поглощенный в сердцевине волокна, 8- сердцевина волокна.

На рисунке 6 показан увеличенный вид камеры. Камера состоит из прямоугольной кварцевой трубки толщиной 2 мм. Одноядерные волокна длиной 91.5 м размещены в камере в виде столбцов и рядов. Длина камеры составляет 30 см, глубина 4.5 см. Набор волокон состоит из 5 столбцов и 40 рядов. Рассчитано распределение светопотерь на поверхности и боковых сторонах камеры, непоглощенных фотонов, мощности поглощения в сердечнике волокна (таблица 2). Все остальные распределения мощности показаны в процентах от общей мощности фотонов 70.7 Вт.

Таблица 2

Распределение мощности

Процессы	Мощность (W)	Относительная мощность (%)
Общее количество падающих фотонов	70.7	100
Потери в концентраторе	3.51	4.96
Кварц не упал на поверхность стекла	0.16	0.22
Потери кварцевого стекла	25.69	36.33
Возвращается с поверхности кварцевого окна	1.83	2.58
Непоглощенные фотоны	22	31.11
Потери на правой стороне	5.47	7.74
Потери на левой стороне	5.46	7.73
Потери на верхней стороне	2.12	2,99
Поглощено сердцевинной волокна	4.46	6.3
Выходная мощность	0.109	0.15

Принимая во внимание распределение поглощения солнечного излучения внутри волокон, была достигнута эффективность поглощения 4.46 % для длины волокна 91.5 м. Дальнейшие расчеты показали выходную мощность волоконного солнечного лазера 109 мВт для этой лазерной системы, что привело к эффективности преобразования солнечного излучения в лазерное 0.15 %. Установлено, что выходная мощность лазера для девятиядерного

оптического волокна длиной 193 м в линейном параболическом концентраторе с площадью поверхности 1 м² составляет 15.65 Вт, а общая эффективность составляет 1.74 %.

Путем объединения двух собирающих линз, одна сторона которых плоская, а другая выпуклая, была получена линза Френеля с кольцевым фокусом (рисунок 7).

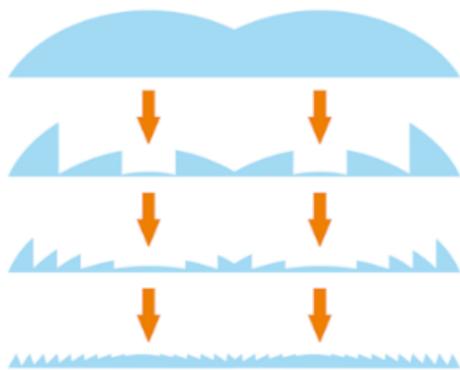


Рисунок 7. Схема поперечного сечения двух сферических линз, одна сторона которых плоская, а другая выпуклая.

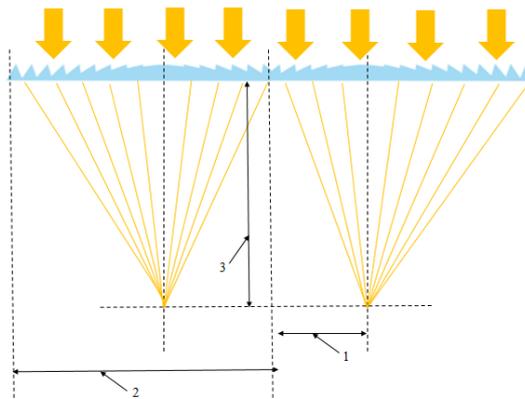


Рисунок 8. Сбор света в фокусе линзы Френеля. 1-Радиус кольцевого фокуса, 2-Радиус линзы, 3-Фокусное расстояние.

Радиус линзы Френеля равен $R=60$ см, фокусное расстояние равно $f=90$ см, а в ее фокальной плоскости образовано полое пространство. Концентратор собирает пучок параллельного света, идущий от солнца, в фокальную плоскость в виде кольца шириной 2 см. Радиус кольца выбран равным $r=9$ см. Причина этого в том, что он рассчитывается в зависимости от минимального радиуса кривизны оптического волокна (рисунок 8). При попадании солнечного излучения на поверхность линзы определенная часть излучения пропускается линзой, а определенная часть поглощается материалом линзы. На рисунке 9 представлена зависимость коэффициента пропускания линзы Френеля от длины волны света в диапазоне длин волн от 200 нм до 2500 нм.

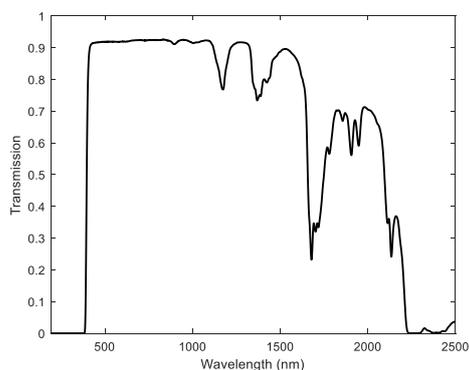


Рисунок 9. Зависимость коэффициента пропускания линзы Френеля от длины волны света.

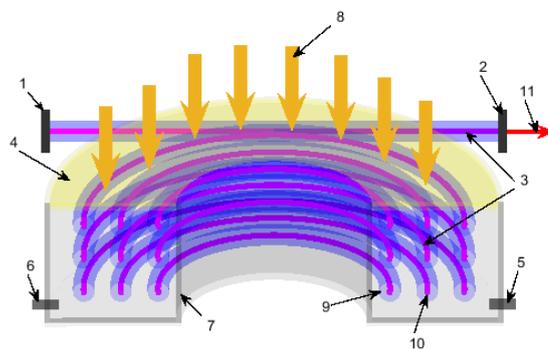


Рисунок 10. Схематический вид солнечного волоконного лазера. 1, 2-зеркала резонатора, 3-оптическое волокно, 4-кварцевое стекло, 5, 6-вход и выход воды для системы охлаждения, 7-внешняя оболочка, 8-солнечный свет, 9-оболочка волокна, 10-сердцевина

Схема камеры накачки волоконного лазера, с солнечной накачкой, показана на рисунке 10, где все размеры увеличены для лучшей иллюстрации. Цилиндрическая камера представляет собой кольцевидную камеру с внешним радиусом 10.2 см, внутренним радиусом 7.8 см и высотой 4.7 см. Стороны камеры: верхняя часть выполнена из кварцевого стекла для проникновения света, внутренняя и внешняя стороны и нижняя часть имеют алюминиевого покрытия с коэффициентом отражения 95 % (рисунок 11). Свет, собранный в фокусе линзы Френеля, попадает в эту систему через кварцевое стекло и может быть поглощен сердечником волокна.

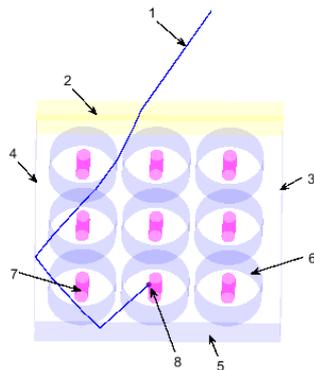


Рисунок 11. Принципиальная схема пути фотона и его поглощения в волокне. 1-солнечный свет, 2-кварцевое стекло, 3-внутренняя стенка, 4-внешняя стенка, 5-нижняя стенка, 6-оболочка волокна, 7- ядро оптического волокна, 8- поглощенный фотон.

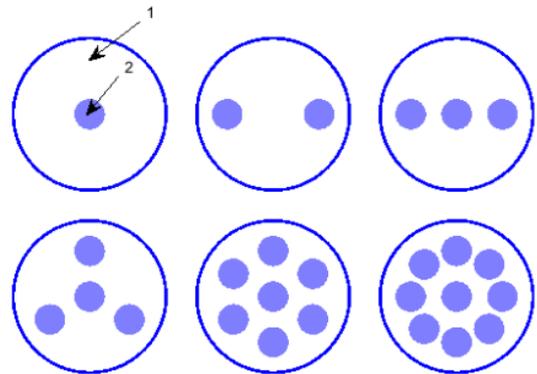


Рисунок 12. Типы волокон. 1-оболочка волокна, 2- ядро оптического волокна.

Одно и многоядерные оптические волокна обернуты в кольцевую камеру. Поперечная поверхность волокна состоит из двух частей: внешней части (оболочки) и внутренней части (ядро). Внешняя часть, покрытие, представляет собой диоксид кремния (SiO_2), кварцевое стекло. По центру оболочки в сердцевину волокна вводятся ионы Nd^{3+} . Диаметры оболочки и сердцевины составляют 1 мм и 200 μm соответственно. Радиус r кольцевой камеры был выбран равным 9 см, чтобы избежать потерь на изгибе. Поперечные сечения одно и многоядерных кварцевых волокон с неодимом показаны на рис 12. Для каждого волокна были рассчитаны эффективность поглощения, распределение мощности и выходная мощность лазера. Далее посмотрим, как расположены сердцевинки в оболочке волокна. В одноядерном волокне сердцевина расположена в центре оболочки волокна. В двухядерном волокне сердцевинки расположены на расстоянии 300 μm от центра оболочки. В трехядерном волокне одна сердцевина размещена в центре волокна, а две другие размещены на расстоянии 300 μm от центра. В четырехядерном волокне одна сердцевина размещена в центре оболочки, а три другие размещены на концах правильного треугольника на расстоянии 300 μm от центра. Тогда стороны треугольника будут составлять около 520 μm . В семиядерном волокне

одна сердцевина размещена в центре оболочки, а шесть других размещены на концах правильного шестиугольника на расстоянии $300\ \mu\text{м}$ от центра. В этом случае стороны шестиугольника составляют $300\ \mu\text{м}$. Последнее волокно состоит из девяти ядер. Одна сердцевина расположена в центре покрытия, а остальные восемь ядер расположены на концах равностороннего восьмиугольника. Сторона восьмиугольника соответствует $230\ \mu\text{м}$. Для всех волокон разной длины на рисунке 12 поглощенная мощность и выходная мощность в ядре волокна рассчитываются с использованием модели отслеживания траектории фотонов Монте-Карло. Результаты представлены на рисунке 13. Найдена оптимальная длина волокна для наибольшей выходной мощности волоконного лазера. При оптимальной длине одноядерного волокна $678\ \text{м}$ выходная мощность лазера составляет $12.61\ \text{Вт}$, поглощаемая солнечная мощность в сердечнике составляет $80.52\ \text{Вт}$. Наибольшая выходная мощность составляет $20.36\ \text{Вт}$ для девятиядерного волокна при оптимальной длине волокна $260\ \text{м}$. Это соответствует общей эффективности $2.0\ \%$. Результаты для всех рассмотренных типов волокон представлены в таблице 3.

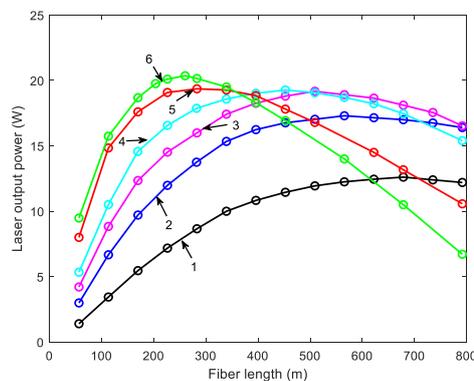


Рисунок 13. Зависимость длины волокна от выходной мощности для различных типов волокон. 1- одноядерное волокно, 2-двухядерное волокно, 3-трехядерное волокно, 4- четырехядерное волокно, 5- семиядерное волокно, 6-девятиядерное волокно.

Таблица 3

Результаты моделирования

Количество ядер	Оптимальная длина (м)	Количество строк	Количество столбцов	Радиус ядра ($\mu\text{м}$)	Поглощаемая мощность (Вт)	Выходная мощность (Вт)	Общая эффективность (%)
1	678.57	60	20	100	80.52	12.61	1.23
2	565.47	50	20	100	121.4	17.3	1.7
3	508.93	45	20	100	148.76	19.17	1.89
4	452.38	40	20	100	163.4	19.27	1.895
7	282.74	25	20	100	174.35	19.36	1.9
9	260.12	23	20	100	196.36	20.36	2

Разработанная модель позволяет оценить эффективность каждого элемента системы. Поэтому было рассчитано распределение поглощенной мощности солнечного излучения для отдельных элементов лазерной системы. Результаты по оптимальной длине девятиядерного волокна представлены в таблице 4 для оценки.

Таблица 4

Распределение мощности

Процессы	Мощность (W)	Относительная мощность (%)
Общая мощность входящих фотонов	1017	100
Потери линзы Френеля	141.64	13.92
Потери мощности из-за того, что фотоны не достигают поверхности концентрационной камеры.	30.74	3.02
Мощность фотонов, достигающих поверхности камеры накачки	844.62	83.06
Потеря мощности из-за фотонов, возвращающихся с поверхности камеры	35.21	3.46
Мощность фотонов, попадающих в камеру накачки	809.41	79.6
Потеря фотонов, который соответствует не поглощенным фотоном внутри камеры	330.86	32.56
Мощность фотонов, не поглощенных неодимом	228.52	22.47
Потери внутри камеры накачки	17.82	1.75
Потеря снаружи	14.25	1.4
Потери на более низкой основе	21.6	2.12
Мощность, поглощаемая в ядре волокна	196.36	19.3
Выходная мощность лазера	20.36	2

Рассчитаны фактор заполнения Больцмана (Boltzmann Occupation Factor, f_{ij}) и функция разделения (Partition Function, Z_i) уровней энергии ${}^4I_{9/2}$, ${}^4I_{11/2}$ и ${}^4F_{3/2}$ неодима при температуре 296 К для одно и многоядерных кварцевых волокон (таблица 5).

Таблица 5

Энергетические уровни Nd^{3+} в кварцевом стекле

Уровень	Классификация (ij)	Энергия E_{ij} (cm^{-1})	Фактор Больцмана, (f_{ij})	Функция разделения (Z_i)
${}^4I_{9/2}$	01	0	0.3823	2.615
	02	55	0.2926	
	03	155	0.18	
	04	255	0.11	
	05	495	0.0345	
${}^4I_{11/2}$	11	1954	2.86e-05	2.766
	12	2035	1.929e-05	
	13	2145	1.130e-05	
	14	2220	7.849e-06	
	15	2250	6.784e-06	
	16	2301	5.294e-06	
${}^4F_{3/2}$	21	11388	3.439e-25	1.5
	22	11530	1.724e-25	

Распределение температуры охлаждаемого солнцем волоконного лазера зависит от радиуса активной среды, длины активной среды, системы охлаждения, мощности, поглощаемой активной средой, теплопроводности и общего тепла, рассеиваемого волокном и потоком охлаждающей жидкости. Для нахождения температуры использовалось дифференциальное уравнение (2).

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \left(\frac{1}{r}\right)\left(\frac{dT}{dr}\right) + \frac{Q}{K} = 0 \quad (2)$$

Здесь $Q = P_h / \pi r_0^2 l$ - тепло, выделяемое в единице объема, r_0 - радиус активной среды, P_h - полная тепловая мощность, рассеиваемая волокном, l - длина волокна. Из уравнения (2) рассчитывается радиальное распределение температуры $T(r)$ между центром и поверхностью активной среды на произвольном радиусе r .

$$T(r) = T(r_0) + \left(\frac{P_h}{4\pi r_0^2 l K}\right)(r_0^2 + r^2) \quad (3)$$

Здесь $K=1$ - теплопроводность, $T(r_0)$ - температура на поверхности волокна, Для нахождения температуры этих параметров недостаточно. Нам понадобится найти еще один параметр, и это коэффициент теплопередачи поверхности h (уравнение (4)).

$$h = 10.47 \times 10^{-3} \frac{(D_2 / D_1)^{0.53}}{(D_2 - D_1)(D_2 + D_1)^{0.8}} f_r^{0.8} \quad (4)$$

Здесь D_1 - эквивалентный диаметр активного элемента (пучка волокон), D_2 - эквивалентный внутренний диаметр слоя охлаждающей воды, $f_r = 25$ ml/s скорость потока. $D_1 = \sqrt{n \cdot m} d_{fiber}$, где n -количество рядов, m -количество столбцов в наборе волокон, $D_2 = P / \pi$, где P -периметр поперечного сечения охлаждающей камеры (перпендикулярно направлению потока охлаждающей жидкости). Используя приведенные выше уравнения, было рассчитано распределение температуры по радиусу активного волокна (рисунок 14).

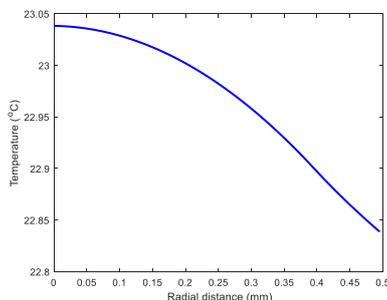


Рисунок 14. Распределение температуры по радиусу оптического волокна.

На рисунке 14 показано, что температура в центре волокна составляет около 23 °С, а на поверхности около 22.8 °С при скорости потока 25 мл/с и температуре охлаждающей воды 20 °С. Это распределение температуры рассчитано только для девятиядерного оптического волокна. Температура в центре других оптических волокон с одним, двумя, тремя, четырьмя и семью ядрами может быть ниже температуры в центре девятиядерного оптического волокна.

Это объясняется тем, что в девятиядерном оптическом волокне из-за большего

числа ядер солнечное излучение поглощается в большей степени по сравнению с другими оптическими волокнами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных в диссертационной работе исследований были достигнуты следующие наиболее важные результаты:

1. Разработана симуляционная модель одноядерного оптоволоконного лазера, возбуждаемого солнечным светом без первичного концентратора с использованием метода трассировки фотонов Монте-Карло.
2. Определено распределение мощности одноядерного оптоволоконного солнечного лазера без первичного концентратора. Для одноядерного кварцевого оптоволокна с диаметром оболочки $125 \mu\text{m}$, диаметром сердцевины $16 \mu\text{m}$ и длиной 190 м выходная мощность лазера составила 1 мВт , а эффективность преобразования солнечного света в лазерное излучение оказалась равной $1.4 \cdot 10^{-3} \%$.
3. Разработана симуляционная модель кварцевых оптоволоконных лазеров, легированных Nd^{3+} , возбуждаемых солнечным светом через линейный параболический концентратор;
4. Определено распределение мощности одноядерного оптоволоконного солнечного лазера через линейный параболический концентратор. Выходная мощность лазера была определена как 109 мВт для оптоволокна длиной 91.5 м . В результате эффективность преобразования солнечной энергии в лазерный свет оказалась равной 0.15% . Установлено, что выходная мощность лазера для девятиядерного оптического волокна длиной 193 м в линейном параболическом концентраторе с площадью поверхности 1 м^2 составляет 15.65 Вт , а общая эффективность составляет 1.74% .
5. Разработана симуляционная модель для кварцевых волоконных оптических лазеров, легированных Nd^{3+} , при падении солнечного света через первичный концентратор линзы Френеля с кольцеобразным фокусом, с учетом распределения температуры по радиусу оптического волокна.
6. Методом симуляционного моделирования исследованы одно- и многоядерные волоконные солнечные лазеры с первичным концентратором, линзой Френеля с кольцеобразным фокусом. Наибольшее значение эффективности преобразования солнечного излучения в лазерный свет составило 2% для 9-ядерного оптического волокна с максимальной выходной мощностью 20.36 Вт . Эта выходная мощность оказалась в 1.61 раза выше, чем у одноядерного оптического волокна, а оптимальная длина оптического волокна оказалась в 2.6 раза короче.

**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

QAKHKHOROV ABDULLA GAFUR UGLI

SOLAR PUMPED NEODYMIUM FIBER 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/FM1161

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:

Sapaev Usmon Qalandarovich,
doctor of physical and mathematical sciences, dotsent

Vapayev Murodbek Ergashovich,
candidate of physical and mathematical sciences, PhD

Leading organization:

**Tashkent State Technical University named after
Islam Karimov**

The defense will take place on « 15 » 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 № 726 (Address: 14 Kh. Olimjan str., Urgench city, 220100, Uzbekistan, Ph.: (99862) 224-66-11, fax: (99862)224-67-00).

The abstract of the dissertation is sent out on « ___ » _____ 2025.

(Mailing report № _____ on « ___ » _____ 2025.)



[Handwritten signatures in blue ink]

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 propose new solutions to increase the laser output power and efficiency, and to determine the optimal fiber laser configurations using Monte Carlo photon tracing simulations for different configurations of single- and multi-core fiber solar lasers with and without primary concentrator.

The object of the research work is solid-state single and multi-core Nd³⁺-doped silica fibers, sensitizers, Fresnel lens with a ring-shaped focus, linear parabolic concentrator and mirrors acting as laser resonators.

The Scientific novelty of the research is as follows:

a simulation model of a single-core optical fiber laser driven by sunlight without a primary concentrator was developed using the Monte Carlo photon tracing method;

using a simulation model of a laser without a primary concentrator, the output power of the laser was determined to be 1 mW, and the efficiency of converting sunlight into laser radiation was found to be $1.4 \cdot 10^{-3}$ % for a single-core quartz optical fiber with a cladding diameter of 125 μm , a core diameter of 16 μm , and a length of 190 m;

considering the parameters of a Nd³⁺-doped single-core silica fiber laser system illuminated by sunlight through a linear parabolic concentrator, a simulation model was developed using the Monte Carlo photon ray tracing method, and the total power distribution, laser output power, and overall laser efficiency were determined;

for the first time, it was shown that when using a linear parabolic concentrator with a surface area of 1 m² and an incident solar radiation power of 900 W, the laser output power for a nine-core optical fiber 193 m long is 15.65 W with an overall efficiency of 1.74%;

for the first time, a simulation model of a fiber laser with a primary concentrator based on a Fresnel lens with a ring focus has been developed, taking into account the temperature distribution along the fiber radius;

for the first time, it was shown that the maximum efficiency can reach 2% and the output power can reach 20.36 W for a nine-core optical fiber when using a ring-focus Fresnel lens.

Implementation of research results. Implementation of research results. Based on the scientific results of fiber lasers operating in sunlight:

the simulation results of fiber optic solar lasers have been used in a number of studies in foreign publications (1. Liu, J., Zheng, B., Yang, J., Li, B., Tang, J., He, H., Zhang, Q., Zhang, X. and Wang, P., 2024. A novel Nd³⁺-doped fiber fabricated by curable nanocomposites for 916 nm laser. *Optics & Laser Technology*, 177, p.111042; 2. Küblböck, M., Will, J. and Fattahi, H., 2024. Solar lasers: Why not?. *APL Photonics*, 9(5); 3. Meehan, B., 2024. A Comprehensive Materials Approach to Thermal Management in Fiber Lasers. A PhD Dissertation (Clemson University, Canada);). The use of these results allowed the authors to substantiate the possibility of a significant increase in the conversion efficiency of fiber lasers compared to the results achieved at present.

the results obtained in modeling the physical processes occurring in single- and multi-core solar fiber laser systems through a Fresnel lens with a ring focus were used in the Scientific and Technical Center with the Design Bureau and OP of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan was used in 2021-2024, when performing scientific and technical tasks of fundamental research on the budget topic “Creation and study of calculation models for optimization and use of solar engineering parameters” (Certificate of the Academy of Sciences of Uzbekistan No. 2/1255-2801 dated December 17, 2024). The use of the scientific result made it possible to study the process of convective and radiative heat exchange in a solar collector when converting sunlight energy into thermal energy.

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 102 pages, including 29 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. Payziyev S., Sherniyozov A., Qakhkhorov A., "Simulation of solar-pumped multicore Nd³⁺-doped silica fiber lasers", //Journal of Photonics for Energy, T.14, №.2, С. (024502-024502), 2024, DOI: 10.1117/1.JPE.14.024502, (01.00.00, №3, IF=1.6).
2. Abdulla G. Kakhkhorov, Anvar A. Sherniyozov, Shermakhamat D. Payziyev, "Solar Powered Nd³⁺-Doped Silica Fiber Lasers Of Various Sizes", (Proceedings APEIE), 1640-1645, 2023, doi: 10.1109/APEIE59731.2023.10347783, (01.00.00, №3, IF=0.36).
3. A.G. Kakhkhorov, A.A. Sherniyozov, Sh.D. Payziyev, "Solar-pumped fiber laser without focusing and sun-tracking systems" Uzbek Journal of Physics, Vol. 25, No.2, pp. 71-76, 2023, doi.org/10.52304/.v25i2.431, (01.00.00, № 5).
4. A.G. Qakhkhorov, A.A. Sherniyozov, Sh.D. Payziyev, "Transversely solar-pumped fiber laser with parabolic trough", Uzbek Journal of Physics, Vol. 26, No. 1, pp. 61-65,2024, doi:10.52304/.v26i1.500, (01.00.00, № 5).

II bo'lim (Част II; Part II)

5. PAYZIYEV SH., QAHHOROV A., SHERNIYOZOV A., "Quyosh nurlanishi bilan damlanadigan optik tola lazerlarning ishlashi uchun optimallashtirilgan algoritm", Elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro'yxatdan o'tkazilganligi to'g'risidagi GUVOHNOMA, № DGU 34283, Tashkent-2024.
6. A.G. Qakhkhorov, A.A. Sherniyozov, Sh.D. Payziyev, "Solar-Pumped Three-Core Fiber Laser With Parabolic Trough", First International Conference on Low-Dimensional Advanced Materials ICLODAM-24, Book of Abstracts, Стр. (114-115), Tashkent-2024.
7. A.G. Kakhkhorov, "Solar-pumped of an Nd³⁺-doped fiber laser with a Fresnel lens", VI Международная конференция по Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро - и наноструктурах, стр. (101-103), 28-30 сентября, Фергана 2023.
8. Qakhkhorov A. G, "Solar-Pumped Of An Nd³⁺-Doped Eccentric Core Circle Fiber Laser", Международная научная конференция молодых учёных "Наука и инновации", Центр передовых технологий, стр. (192-193), 19 октября, Ташкент 2023.
9. A. G'. Qahhorov, "Quyosh bilan damlanadigan Nd³⁺ tolali lazerlarning yutilish taqsimoti", Сборник Материалов Ii Международной Научной Конференции "Современные Тенденции Развития Физики Полупроводников: Достижения, Проблемы И Перспективы", 27-28 декабрь Ташкент-2022.

10. А.Каххоров, Ш.Пайзиев, А.Шерниёзов, Ф.Шерматова, “Волоконные Nd³⁺ лазеры с солнечной накачкой”, Fotonika muammolari va rivojlanish istiqbollari Respublika Ilmiy-amaliy anjumani materiallari, 27-28 May, Urganch-2022.
11. А.Каххоров, Ш.Пайзиев, А.Шерниёзов, Ф.Шерматова, “Влияние первичного концентратора на эффективность волоконных Nd³⁺ лазеров с солнечной накачкой”, Yarimo‘tkazgichlar, nanomateriallar va fotoenergetikaning dolzarb muammolari, Respublika ilmiy amaliy anjumani 9-10 – dekabr, Urganch-2022.
12. А.Г‘. Qahhorov, А.А. Sherniyozov, Sh.D. Payziyev, А.Г‘.Aliboyev, F.G‘.Kamoliddinov, “Frenel linzali optik tolali quyosh lazerlaring samardorligini baholash”, Оптика ва лазер физикасининг муаммо ва истикболлари” мавзусидаги республика илмий амалий конференция, bet (65-66), 26 октябрь Тошкент-2023.
13. Qahhorov A. G‘, “Quyosh bilan damlanadigan Nd³⁺ optik tola lazerlarning umumiy samaradorligi”, Fizika fanining rivojida iste’dodli yoshlarning o‘rni (RIAK-XVI-2023), Respublika ilmiy amaliy konferensiyasi to‘plami, 2-tom, bet (102-104), 28-29-aprel, Tashkent-2023.
14. Qahhorov A. G‘. “Quyoshni kuzatish tizimlarisiz quyosh energiyasi bilan damlanadigan tolali lazerlar” Yosh olimlar va fizik talabalarning III Respublika ilmiy anjumanini, (YoOFTRIA-III), 15 iyun, Tashkent-2023.

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 №62.
TTYSI bosmaxonasida chop etildi.
Toshkent shahri, Yakkasaroy tumani, Shohjahon ko‘chasi, 5-uy.