

URGANCH DAVLAT UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/29.12.2022.FM.55.07 RAQAMLI ILMIY KENGASH

URGANCH DAVLAT UNIVERSITETI

VAPAYEV MURODBEK ERGASHOVICH

**METALLAR SIRTIDA NANO O‘LCHAMLI STRUKTURALAR
SHAKLLANISHIGA LAZER PLAZMASI PARAMETRLARINING
TA’SIRI**

01.04.11- Lazer fizikasi

**fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Urganch – 2024

**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**

Vapayev Murodbek Ergashovich

Metallar sirtida nano o'lchamli strukturalar shakllanishiga lazer plazmasi
parametrlarining ta'siri 3

Вапаев Муродбек Эргашович

Влияние параметров лазерной плазмы на формирование
наноразмерных структур на поверхности металлов..... 21

Vapayev Murodbek Ergashovich

Influence of laser plasma parameters on the formation of nanoscale
structures on metal surfaces 41

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works 45

URGANCH DAVLAT UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/29.12.2022.FM.55.07 RAQAMLI ILMIY KENGASH

URGANCH DAVLAT UNIVERSITETI

VAPAYEV MURODBEK ERGASHOVICH

**METALLAR SIRTIDA NANO O‘LCHAMLI STRUKTURALAR
SHAKLLANISHIGA LAZER PLAZMASI PARAMETRLARINING
TA’SIRI**

01.04.11- Lazer fizikasi

**fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Urganch – 2024

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida №B2022.3.PhD/FM772 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Falsafa doktori dissertatsiyasi Urganch davlat universitetida 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 **Davletov Ikram Yusubovich,**
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar: **Azamatov Zokir Tohirovich,**
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Matnazarov Anvar Rustamovich,
fizika-matematika fanlari nomzodi, dotsent

Yetakchi tashkilot: **Toshkent davlat texnika universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Urganch davlat universiteti huzuridagi PhD.03/29.12.2022.FM.55.07 raqamli Ilmiy kengashning 2024-yil «01» iyun soat 10⁰⁰ 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 Urganch davlat universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (**HS**- 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 2024-yil «10» may kuni tarqatildi.
(2024-yil «10» may dagi 1 -raqamli reestr bayonnomasi)



Sh.D. Payziyev,

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

M.K. Qurbanov,

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

U.K. Sapayev,

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

KIRISH (Falsafa fanlari doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda bugungi kunda fan, texnika va texnologiyalar sohasida, jumladan, qattiq materiallar sirtlarini fizik va kimyoviy usullar yordamida modifikatsiya qilish orqali ularning morfologik, optik va kimyoviy xususiyatlarini o'zgartirishda zamonaviy lazer qurilmalaridan foydalanish yetakchi o'rinda hisoblanadi. Odatda, qattiq jism sirtlarida mikro/nano o'lchamli davriy strukturalarni shakllantirish, yuqori energiya zichligi ($0.1-10 \text{ J/sm}^2$)ga ega bo'lgan lazer nurlanishi ta'sirida metall sirtlarini juda yuqori haroratlargacha ($5000-7000 \text{ K}$) qizdirish va ionlashgan plazma holatiga o'tkazish natijasida nano o'lchamli plazmonik nanozarrachalari ko'rinishida metall sirtlarida qoplama shakllanishi orqali kimyoviy bo'yoqlarsiz rangli tasvir hosil qilishi muhim ahamiyat kasb etadi. Bu borada lazer nurlanishi ta'sirida materiallar sirtlarining fizik va kimyoviy xususiyatlarini yaxshilash uchun lazer nuri hamda plazma parametrlarini aniqlash muhim vazifalardan biri hisoblanadi.

Jahonda so'nggi vaqtlarda nano o'lchamli strukturalar shakllanishiga lazer nurlanishining asosiy parametrlarining va tashqi atmosferaning ta'siri hamda tahlil qilinayotgan materialning tabiatiga bog'liqligini o'rganishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar amalga oshirilmoqda. Ushbu yo'nalishlarda nano o'lchamli strukturalarni shakllantirishda kam energiya talab qiladigan va nisbatan arzon usullardan foydalanib tahlil qilish hamda lazer nurlanishi bilan moddalarga ta'sir qilish orqali yuzaga keladigan fizik jarayonlarni modellashtirish bo'yicha tadqiqotlar ustuvor hisoblanmoqda. Shu bilan birga, lazer plazmasi parametrlarini metallar sirtida nano o'lchamli strukturalar shakllanishiga ta'sirini tadqiq qilish hamda tanlangan har bir metall uchun lazer nurlanishini skanerlash tezligini aniqlash va amaliyotga joriy etish muhim vazifalardan biri hisoblanmoqda.

Respublikamizda sanoat tarmoqlarida yo'qotishlarni kamaytirish va resurslarni ishlatish samaradorligini oshirish, shuningdek, zamonaviy energiya tejankor texnologiyalarni joriy etish bo'yicha tizimli chora-tadbirlar amalga oshirilmoqda. 2022–2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan, «... iqtisodiyotning energiya va resurs sarfini qisqartirish, ... iqtisodiyot, maishiy mahsulotlar ishlab chiqarishning texnologik jarayonlariga innovatsion ishlanma va texnologiyalar joriy etilishini ta'minlash»¹ vazifalari belgilab berilgan. Mazkur vazifalarni amalga oshirish, jumladan, metallar sirtida nano o'lchamli strukturalar shakllanishiga lazer plazmasi parametrlarining ta'sirini tadqiq qilish muhim masalalardan biri hisoblanadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-fevraldagi PF-60-son "2022 – 2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi farmoni, hamda 2021-yil 2-martdagi PQ-5011-sonli "Elektrotexnika sanoatini yanada rivojlantirish va mahalliy mahsulotlarning raqobatbardoshligini oshirishga doir qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risi"dagi qarori, 2021-yil 19-martdagi "Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli "2022–2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi farmoni.

rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PQ-5032-sonli Prezident qarori hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining: III. «Energetika, energoresurs tejamkorligi, transport, mashina va asbobsozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika va elektron asbobsozligi rivojlanishi» ustuvor yo‘nalishiga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi.

Metallar sirtida nano o‘lchamli strukturalar shakllanishiga lazer plazmasi parametrlarining ta‘siri bo‘yicha ilmiy masalalarini yechishga horijlik olimlardan jumladan, F. Ruffino,² A.V. Kabashin,³ R. Stoian,⁴ A. Hayat,⁵ B. Seesahai,⁶ B. Verhoff⁷, M. Anderson⁸ va boshqalar o‘zlarining ulkan hissalarini qo‘shgan.

Mamlakatimiz olimlaridan M.R. Bedilov,⁹ R.R. Xaydarov,¹⁰ I.Y. Davletov,¹¹ T.Usmonov, R.A. Ganeev,¹² G.S. Boltaev¹³ va boshqalar lazer plazmasi ko‘p zaryadli ionlarining parametrlarini hamda lazer plazmasi muhitlarida yuqori generatsiya garmonikalarini tadqiq qilishga munosib hissa qo‘shganlar.

Biroq shu bilan birga, metallar sirtida nano o‘lchamli strukturalar shakllanishiga lazer plazmasi parametrlarining ta‘sirini o‘rganish va bu boradagi tadqiqotlarni rivojlantirishga yetarlicha e‘tibor berilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta‘lim muassasining ilmiy tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Urganch davlat universitetining ilmiy tadqiqot ishlari rejalari 2021-80 raqamli “Nanoshit bilan ko‘p qatlamli maydoniy tranzistorda o‘z-o‘zini isitish effektini o‘rganish” (2021–2023) va 2021-88 raqamli “Quyosh elementlarida foydalaniladigan nanotuzilmali gidrofobik va supergidrofobik materiallarni o‘rganish” (2021–2022) mavzularidagi fundamental va amaliy loyihalari doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi nano va pikosekund impulsli lazer nurlanishi ta‘sirida metallar yuzasida hosil bo‘lgan plazmaning asosiy parametrlarini turli usullar bilan aniqlash, shuningdek, femtosekund impulsli lazer skanerlash tezligi va plazma parametrlarining metallar yuzasida nano o‘lchamli strukturalar shakllanishiga ta‘sirini o‘rganishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

² Ruffino F. Nanostructuring of Thin Metal Films.... Nanomaterials 2019, 9, 1133.

³ Kabashin A. V. Nanofabrication with Pulsed Lasers. Nanoscale Res Lett (2010) 5:454–463.

⁴ Stoian R. Advances in ultrafast laser structuring of materials... Nanophotonics. 2020 9(16): 4665 – 4688.

⁵ Asma Hayat, The role of laser fluence and ambient environments on fs laser... J. Appl. Phys. 125, 083302 (2019).

⁶ Seesahai B. Plasma temperature measurements in the context of Spectral interference.(2016).

⁷ Verhoff B., Dynamics of femto- and ns laser ablation plumes investigated J. Appl. Phys. 112, 093303 (2012);

⁸ M.Anderson. Surface and microstructure investigation of ps versus fs laser...Surf.&Coat.Tech. 409 126872 (2021).

⁹ Бедиллов М. Р., “Спектры ионов четырехэлементной лазерной плазмы,” Квант. элект., 22, 6, 593–593, 1995.

¹⁰ Khaydarov R. R. “Effect of Optical Radiation on the Properties of ...,” J. Mod. Phys., 05, 12, 1055–1061, 2014.

¹¹ Davletov I. Y. “An Installation for Obtaining Intense Flows of Multiply ..” Inst. Exp. Tech.,45, 708–710, 2002.

¹² T. Usmanov, R Ganeev. Nonlinear-optical parameters of various media Quant. Electr 2007,37(7),60.;

¹³ Boltaev G.S.Creation of azimuthally and radially directed LIPSS.J. of Phys D: Appli.Phys 54 (18), 185109(2021).

10 ns impulsli, 1064 nm to'liqin uzunlikdagi Nd:YAG lazer nurlanishi ta'sirida normal atmosfera sharoitida qattiq agregat holatdagi Si va In elementlari sirtida hosil bo'lgan plazmaning spektrlarini tahlil qilish orqali plazmaning asosiy parametrlari, ya'ni elektronlarning zichligi va temperaturasini aniqlash;

28 ps impulsli, to'liqin uzunligi 1064 nm bo'lgan lazer nurlanishi bilan 50–500 mm/min tezlikda skanerlash jarayonida Al va Cu elementlarining sirtida hosil bo'lgan plazmaning asosiy parametrlarini aniqlash;

qattiq agregat holatdagi niobiy qotishmasi sirtida davomiyligi 28 ps bo'lgan impulsli lazer bilan hosil qilingan plazmaning spektral taqsimotidan niobiy elementining (Nb IV) yuqori zayradli ion o'tish spektral chiziqlari uchun Shtark kengayish koeffitsiyentlarini aniqlash;

impuls davomiyligi 40 fs, to'liqin uzunligi 1030 nm bo'lgan Yb:YAG lazer nurlanishi bilan ta'sir qilish orqali titan va nikel yuzasida turli davr va shakldagi nanostrukturalar hosil qilish;

titan va nikel yuzasida hosil qilingan plazmaning parametrlari va femtosekund impulsli lazer skanerlash tezligi hamda hosil bo'lgan nanostrukturaning o'lchamlari o'rtasida o'zaro bog'liqlikni o'rganish.

Tadqiqotning obyekti sifatida metallar sirtida nano o'lchamli strukturalar shakllanishiga lazer plazmasi parametrlarining ta'sirini tadqiq etish olingan.

Tadqiqotning predmeti metallar sirtining morfologik tahlili, lazer nurlanishining skanerlash tezligi, shuningdek, lazer plazmasining parametrlarini hisoblashdan iborat.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot jarayonida qo'yilgan vazifalarni amalga oshirish uchun tizimli tahlil, tanlangan metallar sirtida plazma hosil qilish va plazmaning optik parametrlarini tadqiq qilishda lazer spektroskopiya usuli, nanostrukturalarning o'lchami hamda xossalarini tahlil qilishda elektron mikroskopiya usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

10 ns impulsli, 1064 nm to'liqin uzunlikdagi Nd:YAG lazer nurlanishi ta'sirida normal atmosfera sharoitida qattiq agregat holatdagi Si va In elementlari sirtida hosil bo'lgan plazmaning spektrlarini tahlil qilish orqali plazmaning asosiy parametrlari, ya'ni, elektronlarning zichligi Shtark kengayish usuli yordamida va temperaturasi Boltsman taqsimot usulini qo'llagan holda aniqlangan;

28 ps impulsli, to'liqin uzunligi 1064 nm bo'lgan lazer nurlanishi bilan 50–500 mm/min tezlikda skanerlash jarayonida Al va Cu elementlarining sirtida hosil bo'lgan plazmaning spektrlarini tahlil qilish natijasida, 50-500 mm/min skanerlash tezliklarida Al va Cu plazma spektrlaridagi chiziqlar ustma-ust tushishi hisobga olinib elektronlarning zichligi va temperaturasi aniqlangan;

ilk bor qattiq agregat holatdagi niobiy qotishmasi sirtida davomiyligi 28 ps bo'lgan impulsli lazer bilan hosil qilingan plazmaning spektral taqsimotidan niobiy elementining (Nb IV) yuqori zayradli ion o'tish spektral chiziqlari uchun Shtark kengayish koeffitsiyentlari aniqlangan;

impuls davomiyligi 40 fs, to'liqin uzunligi 1030 nm bo'lgan Yb:YAG lazer nurlanishi ta'sirida titan va nikel yuzasida turli davr va shakldagi nanostrukturalar

hosil qilingan hamda namunalarning optik emissiya spektrlarini tahlil qilish orqali, ular sirtida hosil qilingan plazmaning parametrlari aniqlangan, natijada plazmaning parametrlarini namunalar yuzasida hosil bo'luvchi davriy strukturalarning tabiati bilan bog'liq ekanligi ko'rsatilgan;

titan va nikel yuzasida hosil qilingan plazmaning parametrlari va femtosekund impulsli lazer skanerlash tezligi hamda hosil bo'lgan nanostrukturaning o'lchamlari o'rtasida o'zaro bog'liqlik olingan, shuningdek, lazer plazmasida erkin elektronlar konsentratsiyasining ortishi bilan plazmonik chastotani boshqarish orqali titan va nikel yuzasida nanostruktura shaklining o'zgarishi aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

normol atmosfera sharoitida tahlil qilinayotgan metallar sirtida nano o'lchamli strukturalar shakllanish jarayonida plazmaning emission spektrlari olingan;

impulsli lazer nurlanishining turli skanerlash tezliklarida metallar sirtida davriy nano o'lchamli strukturalar hosil qilingan;

lazer plazmasi parametrlarining ta'sirini e'tiborga olish, lazer nurlanishi bilan metallarga sifatli ishlov berish hamda metallarning sirtida davriy nano o'lchamli strukturalar shakllantirish orqali metallarning xususiyatlarini o'zgartirish mumkinligi ko'rsatilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Tadqiqotda olingan natijalarning ishonchliligi lazer nurlanishi ta'sirida metallarning sirtida nano o'lchamli strukturalar shakllantirishda, plazmaning nurlanish spektrini qayd qilishda optika va lazer fizikasining zamonaviy ilmiy tadqiqot usullari, yuqori aniqlikdagi zamonaviy qurilmalardan foydalanilganligi, amalga oshirilgan nazariy hisoblashlar va olingan ilmiy natijalarning o'zaro izchilligi bilan asoslanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati lazer nurlanishi ta'sirida normal atmosfera sharoitida qattiq agregat holatdagi elementlar sirtida hosil bo'lgan plazmaning spektrlarini tahlil qilish orqali, plazmaning parametrlarini va niobiy qotishmasidagi yuqori zayradli ion o'tish spektral chiziqlari uchun Shtark kengayish koeffitsiyentlari hamda nano o'lchamli strukturalar shakllanishiga ta'sirini aniqlanganligi bilan tavsiflanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati lazer nurlanishi bilan ta'sir qilish orqali titan, nikel yuzasida turli davr va shakldagi nanostrukturalar hosil qilinishi hamda plazmaning parametrlarini namunalar yuzasida shakllanuvchi davriy strukturalarning tabiati bilan bog'liq ekanligi, shuningdek, plazma sohasidagi erkin elektronlar konsentratsiyasining ortishi bilan titan, nikel sirtida nanostruktura shaklining o'zgarishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Metallar sirtida nano o'lchamli strukturalar shakllanishiga lazer plazmasi parametrlarining ta'siri bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

lazer nurlanishi ta'sirida metallarning sirtida hosil bo'lgan plazmaning parametrlari elektronlarning zichligi va temperaturasining ta'siri natijalari, ishlab chiqilgan hisoblash algoritmlari "Urganchkormmash" AJda lazer qurilmasi yordamida metallar va murakkab konstruktiv materiallarga ishlov berish

jarayonida qo'llanilgan. Natijada metallarga ishlov berish jarayonlarini sezilarli darajada yaxshilashga erishilgan hamda yakuniy mahsulot sifati oshgan;

metallarning sirtida hosil qilingan plazmaning emissiya spektrlari, jumladan, niobiy Nb (IV) plazmasining spektral liniya chiziqlari uchun aniqlangan Shtark kengayish koeffitsiyentlari Serbiya Belgrad Astronomiya rasadxonasining 451-03-68/2020-14/200002 tadqiqot loyihasida foydalanilgan. Natijada metallar sirtida nano o'lchamli strukturalarning shakllanish jarayonida hosil bo'lgan plazmaning parametrlari va davr o'lchamlari orasidagi bog'lanishlarni tushuntirishda qo'llanilgan;

metallarning sirtida nanostrukturalarning shakllanishi bilan bog'liq asosiy jarayonlar haqidagi muhim ma'lumotlar Latviya universiteti tadqiqot markazidagi ilmiy loyihada foydalanilgan. Natijada lazer nurlanishi ta'sirida hosil qilingan plazmaning parametrlarini qanday qilib aniqlash va baholash imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari 5 ta xalqaro va 8 ta respublika miqyosidagi ilmiy-amaliy konferensiyalarida muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha ja'mi 17 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, 1 tasi xorijiy ilmiy jurnalda chop qilingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning umumiy hajmi 94 sahifani tashkil etadi.

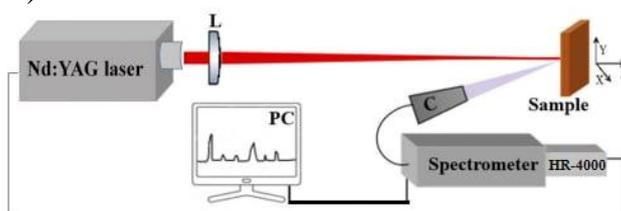
DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

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.

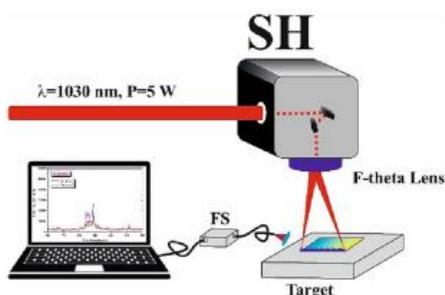
Dissertatsiyaning **“Muammoning zamonaviy talqini: lazer nurining metallarga ta'siri”** deb nomlangan birinchi bobida adabiyotlar tahlili asosida lazer nurlanishining ta'sirida metallarning sirtida nano o'lchamli strukturalarning shakllanish jarayonida hosil bo'lgan plazmaning parametrlarini tadqiq qilish bo'yicha hamda strukturalarning shakllanishida asosan impulsi lazer nurlanishi parametrlarining ta'sirini o'rganishga oid tajribaviy va nazariy tadqiqotlar haqida umumiy ma'lumotlar keltirilgan. Metallar yuzasida nano o'lchamli strukturalarni shakllanish jarayonini tadqiq qilish orqali erishilgan yutuqlar va lazer nurlanishi ta'sirida kuzatiladigan effektlar tahlil qilingan. Lekin bugungi kungacha davriy nano o'lchamli strukturalarni metallarning sirtida shakllanishiga lazer plazmasi parametrlarining ta'sirini tadqiq qilishga bag'ishlangan ishlar soni kam ekanligi e'tiborga olinib dissertatsiya ishining asosiy maqsad va vazifalari shakllantirilgan.

Dissertatsiyaning “**Metallar sirtida nano o‘lchamli strukturalar shakllantirish hamda plazma parametrlarini tadqiq qilishni tajribaviy qurilmalari tavsifi**” deb atalgan ikkinchi bobida impulsli lazer qurilmasi, plazma spektrini qayd qiluvchi qurilma, lazer nurlanishi ta’sirida metallar sirtida hosil qilingan plazma sohasidagi elektronlarning zichligini aniqlashning Shtark kengayish usuli va elektronlarning temperaturasini aniqlash usullari haqida ma’lumotlar keltirilgan.

Metallar sirtida plazma hosil qilish va plazma parametrlarini tadqiq qilish uchun normal atmosfera sharoitida 50 mm/min va 500 mm/min tezlikda skanerlashdan foydalanib, qattiq agregat holatidagi metallarni to‘lqin uzunligi 1064 nm va impuls davomiyligi 28 ps bo‘lgan Nd:YAG (EKSPLA PL-2231-50) lazeri bilan nurlantirilgan. Yarimo‘tkazgich elementlarini esa 1064 nm to‘lqin uzunlikdagi va 10 ns impulsli Nd:YAG lazeri bilan nurlantirildi va hosil bo‘lgan plazmaning emission parametrlarini (Ocean Optics HR-4000) spektrofotometr yordamida tahlil qilingan (1-rasm). Normal atmosferada metallar sirtida davriy nano o‘lchamli strukturani shakllantirish uchun 40 fs impulsli, 1030 nm to‘lqin uzunlikdagi, 5W quvvatli Yb:YAG lazer bilan turli tezliklarda skanerlash jarayonida hosil bo‘lgan plazmani qayd qiluvchi tajriba optik sxemasidan foydalanilgan (2-rasm).



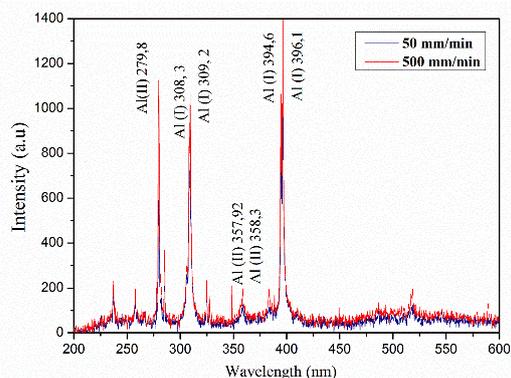
1-rasm. Metallar sirtida plazma hosil qilish va qayd qilishni tajribaviy optik sxema: Nd:YAG lazeri, *L* – linza, Sample-namuna, *XYZ* – uch o‘qli namuna ushlagich, *C* – Spect HR-4000 nur tolali spektrofotometr, *PC* – Personal kompyuter.



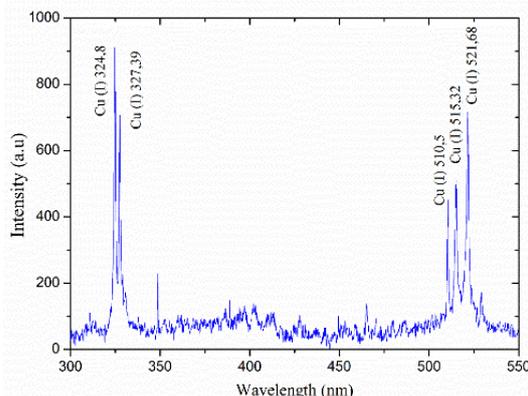
2-rasm. Normal atmosferada metallar sirtida davriy nano o‘lchamli strukturani shakllantirish uchun lazer nurlanishi bilan turli tezliklarda skanerlash jarayonida hosil bo‘lgan plazmani qayd qiluvchi tajribaviy optik sxema.

Yb:YAG lazeri, SH: skanerlash boshi, F-teta fokuslash linzalari, FS: nur tolali spektrofotometr, T-namuna.

Dissertatsiya ishining “**Metallar sirtida hosil bo‘lgan lazer plazmasining parametrlarini tadqiq qilish**” deb nomlangan uchinchi bobida normal atmosfera sharoitida qattiq agregat holatidagi alyuminiy (Al) va mis (Cu) elementlari to‘lqin uzunligi 1064 nm va impuls davomiyligi 28 ps.ni tashkil qilgan Nd:YAG lazeri bilan 50–500 mm/min skanerlash jarayonida hosil bo‘lgan plazmaning parametrlari aniqlangan.



3-rasm. Alyuminiy sirtini 50 mm/min va 500 mm/min tezlikda lazer nurlanishi bilan skanerlash natijasida hosil bo'lgan plazmaning emissiya spektri.



4-rasm. Mis sirtini 28 ps impulsli lazer nurlanishi bilan 50 mm/min tezlikda skanerlash natijasida hosil bo'lgan plazmaning emissiya spektri.

Bunda aluminiy sirtini 50–500 mm/min tezliklarda skanerlash vaqtida hosil bo'lgan Al plazmasi spektr chiziqlari bir xil to'lqin uzunlikda ustma-ust tushdi, intensivliklari esa farq qildi (3-rasm). Olingan plazma spektri tahlili aluminiy elementining (I) bir va (II) ikki zaryadli ion o'tishlari mavjudligini ko'rsatdi. Cu sirtiga lazer nurlanishi bilan 50 mm/min tezlikda skanerlash natijasida hosil bo'lgan plazmaning emissiya spektri mis elementining bir zaryadli ion o'tish chiziqlari mavjudligini ko'rsatdi (4-rasm).

1-jadval

Al(I) va Al(II) ion o'tishli spektr chiziqlari uchun aniqlangan elektron zichliklarining qiymatlari.

<i>Al (I), $\lambda=308,3 \text{ nm}$ FWHM=0,63nm</i>							
1	$T (K)$	2500	5000	10000	20000	40000	80000
	$W \text{ \AA}$	0,132	0,120	0,126	0,143	0,169	0,210
	$n_{e,} (10^{17})cm^{-3}$	2,38	2,62	2,5	2,2	1,86	1,5
<i>Al (I), $\lambda=309,02 \text{ nm}$ FWHM=0,87nm</i>							
2	$W \text{ \AA}$	0,132	0,120	0,126	0,143	0,169	0,210
	$n_{e,} (10^{17})cm^{-3}$	3,29	3,62	3,45	3,04	2,57	2
<i>Al(II), $\lambda=357,92 \text{ nm}$ FWHM=0,26nm</i>							
3	$W \text{ \AA}$	0,475	0,268	0,179	0,130	0,10	0,085
	$n_{e,} (10^{17})cm^{-3}$	0,273	0,485	0,726	1	1,3	1,52
<i>Al(II), $\lambda=358,2 \text{ nm}$ FWHM=0,32nm</i>							
4	$W \text{ \AA}$	0,475	0,268	0,179	0,130	0,10	0,085
	$n_{e,} (10^{17})cm^{-3}$	0,336	0,597	0,893	1,23	1,6	1,88
<i>Al(I), $\lambda=394,6 \text{ nm}$ FWHM=0,42nm</i>							
5	$W \text{ \AA}$	0,01	0,694	0,432	0,255	0,166	0,136
	$n_{e,} (10^{17})cm^{-3}$	0,21	0,3	0,486	0,83	1,26	1,54
<i>Al(I), $\lambda=396,1 \text{ nm}$ FWHM=0,65nm</i>							
6	$W \text{ \AA}$	0,01	0,694	0,432	0,255	0,166	0,136
	$n_{e,} (10^{17})cm^{-3}$	0,325	0,468	0,752	1,27	1,95	2,38

Spektr chiziqlari NIST (National Institute of Standards and Technology) bazasida mavjud chiziqlar bilan solishtirish orqali topildi. Plazma spektrlariga mos Al va Cu ionlari uchun to'lqin uzunliklar va mazkur o'tish chiziqlarining

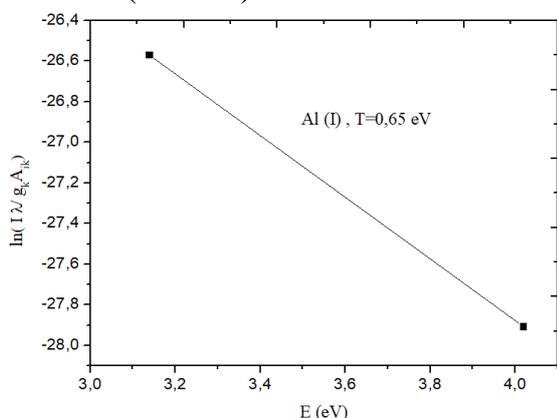
kengliklari aniqlanib bu kattaliklar Shtark kengayish usuli yordamida plazma tarkibidagi erkin elektronlar zichligini aniqlash imkonini berdi (1,2-jadval). Originlab kompyuter dasturidan foydalanib, plazma spektridagi chiziqlari kengligining yarmi (FWHM-full width at half maximum) Gauss impulsi bilan moslashtirilgan holda aniqlandi.

2-jadval

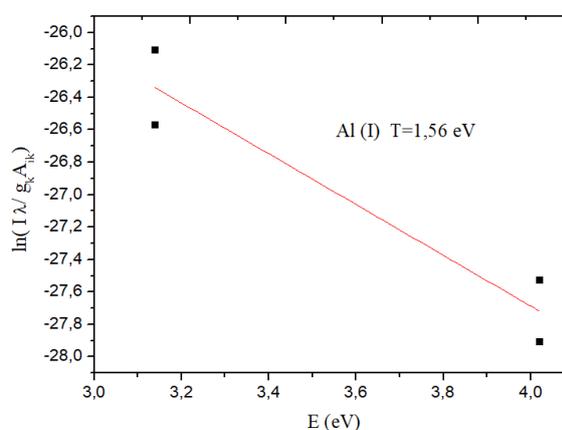
Mis elementini (I) zaryadli ion o'tishli spektr chizig'idagi aniqlangan erkin elektronlarning zichliklari.

<i>Cu (I), $\lambda=324,75 \text{ nm}$ FWHM= 0,87 nm</i>					
<i>T (K)</i>		5000	10000	20000	30000
1	<i>W Å</i>	0,00320	0,00301	0,00346	0,00398
	<i>n_e, (10¹⁹)cm⁻³</i>	1,35	1,44	1,25	1,09
<i>Cu (I), $\lambda=327,39 \text{ nm}$ FWHM= 0,62 nm</i>					
2	<i>W Å</i>	0,00300	0,00321	0,00330	0,00391
	<i>n_e, (10¹⁸)cm⁻³</i>	10,3	9,65	9,39	7,92
<i>Cu (I), $\lambda=510,55 \text{ nm}$ FWHM= 0,69 nm</i>					
3	<i>W Å</i>	0,0093	0,0102	0,0105	0,0111
	<i>n_e, (10¹⁸)cm⁻³</i>	3,7	3,38	3,28	3,1

Aluminiy sirtida hosil qilingan plazma sohasidagi uyg'ongan erkin elektronlarning temperaturasini Boltsman taqsimot usulidan foydalanib, bir xil ion o'tish mavjud bo'lgan ikkita spektral chiziqning intensivligi nisbati bilan aniqlash mumkin. Bunda alyuminiy spektridan 309,02 nm va 396,1 nm.dagi ikkita spektr chizig'i intensivliklari va boshqa doimiylardan foydalanib plazma sohasidagi erkin elektronlarning temperaturasi 0,65 eV ga teng ekanligi aniqlandi. Ikkita Al (I) 309,02 va Al(I) 391,6 chizig'idagi ion o'tishlar uchun Boltsman taqsimot grafigi hosil qilindi (5-rasm). Aluminiy plazmasi uyg'ongan erkin elektronlarning temperaturasini aniqroq o'lchash uchun 4 ta ion o'tish emissiya (Al (I) 308.2, 309.02, 394.6, 396.1) chiziqlaridan foydalangan holda Boltsman taqsimot grafigi chizildi (6-rasm).



5-rasm. Al (I) 309,02 va Al(I) 396,1 ion o'tishlarda Boltsman taqsimot grafigi.

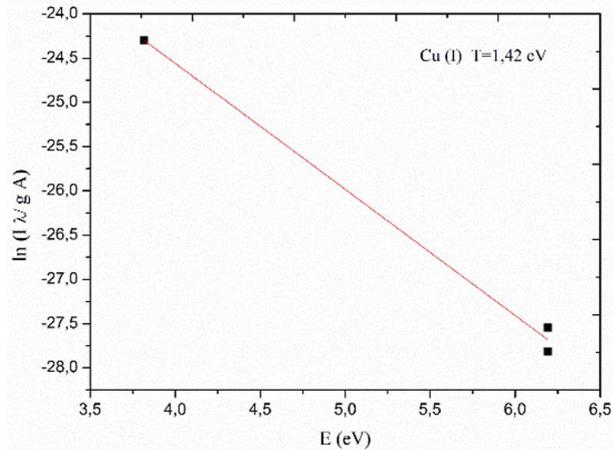


6-rasm. Al (I) 308.2, 309.02, 394.6, 396.1 - ion o'tishli emissiya liniyalarini Boltsman taqsimot grafigi.

Bunda qiyalik plazma sohasidagi uyg'ongan erkin elektronlarning temperaturasini

bildirib, qiymati Al(I) ion o'tishlar uchun $T=1,56$ eV ga teng ekanligi aniqlandi.

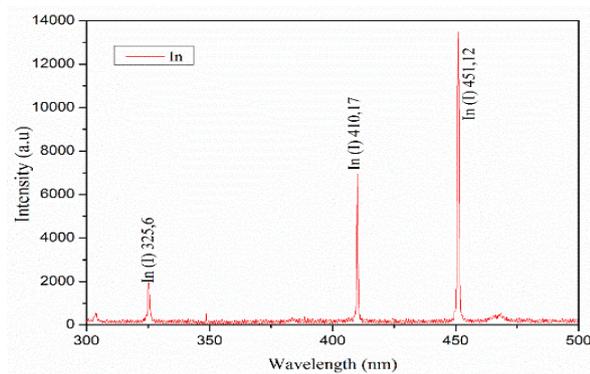
Mis plazmasi sohasidagi uyg'otilgan erkin elektronlarning temperaturasini baholashda lazer nuri quvvat zichligi, atom massa va ko'p zaryadli ionlar soniga bog'liq ravishda aniqlash usulidan foydalanildi. Tajriba uchun tanlangan ps impulsli Nd-YAG lazerining quvvat zichligi $1,8 \cdot 10^{12}$ W/sm² ga, mis elementining atom massasi 63,54 g/mol hamda zaryad karraligi $Z=1$ ga teng.



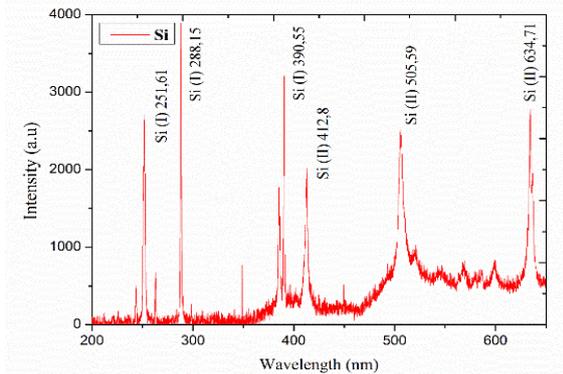
7-rasm. Mis Cu (I) ion o'tishlarda Boltsman taqsimot grafigi.

aniqlash uchun misning 3 ta ion o'tishli emissiya chiziqlari Cu(I) xarakteristikalaridan foydalanib Boltsman taqsimot grafigi hosil qilindi (7-rasm). Bunda qiyalik plazma sohasidagi uyg'otilgan erkin elektronlarning temperaturasini bildirib, qiymati Cu (I) ion o'tishlar uchun $T=1,42$ eV ga teng ekanligini ko'rsatdi.

Qattiq agregat holatidagi indiy (In) va kremniy (Si) elementini to'lqin uzunligi 1064 nm va impuls davomiyligi 10 ns bo'lgan Nd:YAG lazeri bilan nurlantirildi va hosil bo'lgan plazmaning emission parametrlarini nur tolali optik spektrofotometr yordamida tahlil qilindi. Olingan plazma spektri, tarkibida (In) elementining (I) bir zaryadli (8-rasm), (Si) elementining (I) bir va (II) ikki zaryadli (9-rasm) ion o'tishlari mavjudligini ko'rsatdi.



8-rasm. Indiy plazmasining emission spektri.



9-rasm. Kremniy plazmasining emissiya spektri.

Plazma spektrlarida mos (In) va (Si) spektr chiziqlari va mazkur o'tish liniyalarining kengliklari aniqlanib, bu kattaliklar Shtark kengayish usuli yordamida plazma sohasidagi erkin elektronlarning konsentratsiyalarini aniqlash imkonini berdi (3,4-jadval). Bunda spektr kengligini yarmi (FWHM) Gauss

impulsi bilan moslashtirilgan holda aniqlandi.

3-jadval

Indiy elementini (I) zaryadli ion o‘tishli spektr liniyasidagi aniqlangan elektronlarning zichliklari

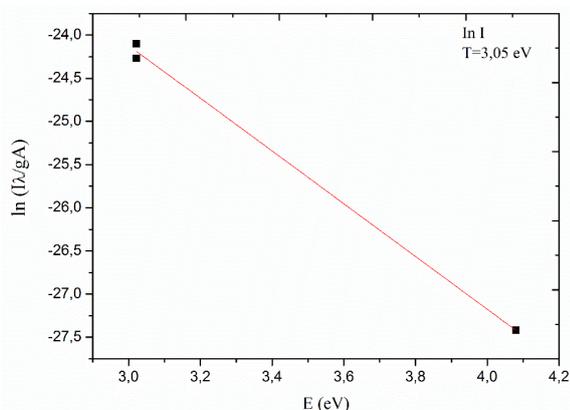
<i>In (I), $\lambda=4101.7 \text{ \AA}$</i>						
	<i>T (K)</i>	2500	5000	10000	20000	40000
1	<i>W \AA</i>	0,0047	0,0062	0,0084	0,00108	0,00124
	<i>n_e, (10¹⁸)cm⁻³</i>	5,42	4,1	3	23,6	20
<i>In (I), $\lambda=4511.2 \text{ \AA}$</i>						
2	<i>W \AA</i>	0,0047	0,0062	0,0084	0,00108	0,00124
	<i>n_e, (10¹⁸) cm⁻³</i>	8,72	6,6	4,8	37,9	33

4-jadval

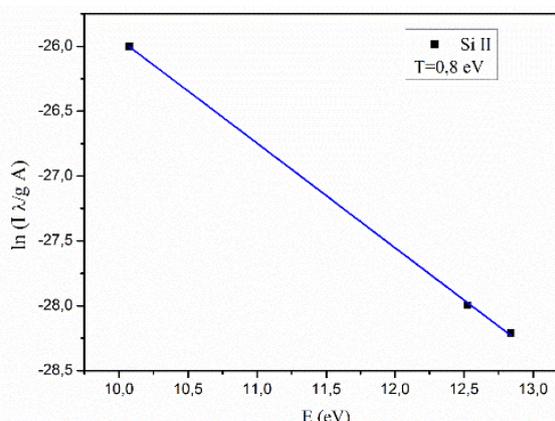
Kremniy elementini (I) va (II) zaryadli ion o‘tishli spektr liniyasidagi aniqlangan erkin elektronlarning zichliklari

<i>Element</i>	<i>Si (I)</i>	<i>Si (I)</i>	<i>Si (II)</i>	<i>Si (II)</i>	<i>Si (II)</i>
λ (nm)	251,61	288,15	412,8	505,59	634,71
FWHM (nm)	2,33	0,85	1,9	3,51	1,28
W (\AA)	0,70	0,54	1,29	1,8	1,2
n (10 ¹⁷ sm ⁻³)	1,66	0,78	0,73	0,97	0,54

Bir xil ion o‘tishli emissiya liniyalari qancha ko‘p bo‘lsa, elektronlarning temperaturasi o‘lchash aniqligi ortadi. Bunda indiy plazmasi sohasidagi uyg‘otilgan erkin elektronlarning temperaturasi aniqroq o‘lchash uchun 3 ta ion o‘tish emissiya liniyalaridan (In (I) 325,6; 410,17; 451,12) va boshqa doimiylardan foydalanib Boltsman taqsimot grafigi hosil qilindi (9-rasm). Grafikda qiyalik plazma sohasidagi uyg‘otilgan erkin elektronlarning temperaturasi bildirib, In (I) ion o‘tishlar uchun $T=3,05 \text{ eV}$ ga teng ekanligi aniqlandi. Boltsman taqsimot usulidan foydalanib Si II zaryadli ion o‘tishni elektron temperaturasi $1,24 \text{ eV}$ ga tengligi aniqlandi va Boltsman taqsimot grafigi hosil qilindi (10-rasm).



9-rasm. Indiy In (I) ion o‘tishlarda Boltsman taqsimot grafigi.

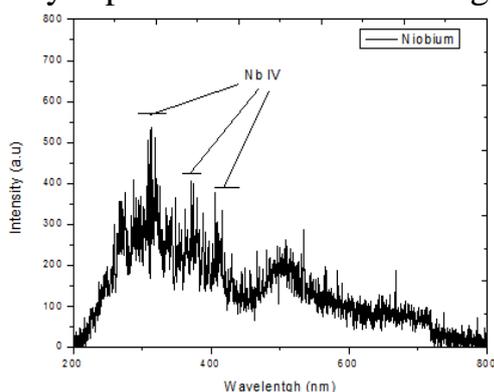


10-rasm. Kremniy Si (II) ion o‘tishlarda Boltsman taqsimot grafigi.

Kremniy plazmasi sohasidagi uyg‘otilgan erkin elektronlarning temperaturasi

lazer nurlanishining quvvat zichligi va elementni atom massasiga bog‘liq ravishda o‘zgarish usulidan foydalanib aniqlandi. Bunda biz foydalangan -ns impulsli Nd-YAG lazerini quvvat zichligi 10^{11} W/sm² ga teng. Kremniy (I) va (II) zaryadli ion o‘tishli plazma sohasidagi uyg‘otilgan erkin elektronlarning temperaturasi Z=1da T=1,89 eV hamda Z=2 da T=2,3 eV ga teng.

Qattiq agregat holatdagi niobiy qotishmasini 1064 nm to‘lqin uzunlikdagi, 28 ps impuls davomiylikdagi Nd:YAG lazeri bilan 20 mm/min tezlikda skanerlash natijasida hosil bo‘lgan plazmaning spektri tahlil qilindi. Olingan plazmaning optik emissiya spektri 11-rasmda keltirilgan.



11-rasm. Niobiy qotishmasini optik emissiya spektri.

Moddalarni ion o‘tishli plazma spektrini tahlil qilish uchun Shtark kengayish ko‘effitsiyentlari (elektron, ion ta’sir parametrlari) nazariy yo‘llar bilan hisoblangan va ma’lumotlar bazasi yaratilgan. Shunga qaramasdan, bugungi kunga kelib, niobiy elementining (Nb IV) yuqori zayradli ion o‘tish spektral chiziqlari uchun Shtark kengayish ko‘effitsiyentlari aniqlanmagan.

Serbiyalik olim M.S. Dimitrijevič bilan hamkorlikda, Modifikatsiyalangan yarim empirik usul yordamida niobiy (Nb IV) plazma spektr chiziqlari uchun Shtark kengayish ko‘effitsiyenti (elektron ta’sir parametri-W) aniqlandi (5-jadval).

5-jadval

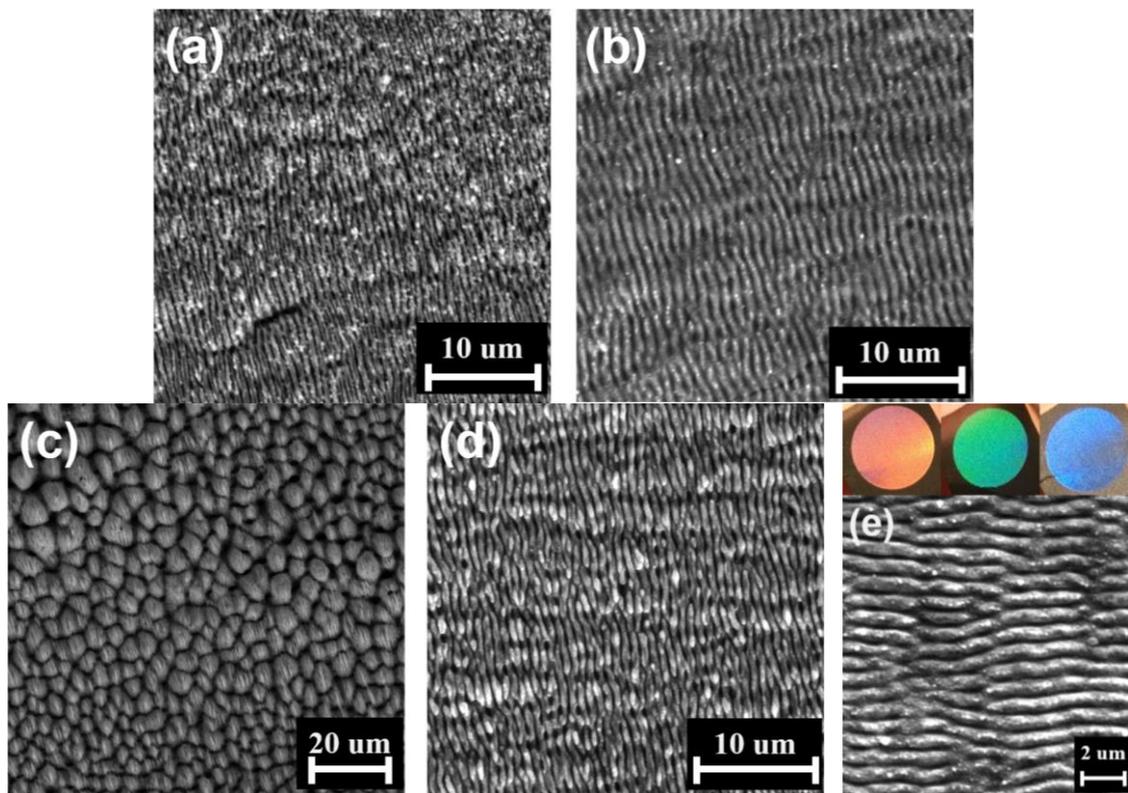
Nb IV spektr liniya chiziqlari uchun hisoblangan elektron ta’sir parametrlari va elektronlarning zichliklari

Spektr liniyalari	Konfiguratsiya	Quyi sath	Yuqori sath	W(Å)	FWHM (nm)	$n_e, 10^{17} (cm^{-3})$
318,30	$4d6p3D_3-4d6dD_2$	p=1	d=2	0.78	0,81	0,51
371,17	$4d5d^3G_3 - 4d6p^3F_2$	d=2	p=1	0.537	1,43	1,32
373,15	$4d6p^3P_1-4d6d^3F_2$	d=2	p=1	1.06	0,44	0,2
405,26	$4d5dP_1-4d6p1D_2$	p=1	d=2	0,604	0,55	0,45

Dissertatsiyaning “**Metallar sirtida nano o‘lchamli struktura shakllantirishda femtosekund impulsli lazer plazmasi parametrlarini ta’siri**” deb nomlangan to‘rtinchi bobida nikel va titan nishonlarining yuzalarida 1030 nm to‘lqin uzunlikli, 50 kHz chastotali va 40 fs impulsli Yb:YAG lazer nurlanishi ta’sirida hosil bo‘lgan davriy tuzilmalarga skanerlash tezligi va plazma parametrlarining ta’sirini tahlili keltirilgan.

Tajribada turli xil skanerlash tezligidan foydalanildi va namuna sirti SEM elektron mikroskop orqali tahlil qilindi. Natijada namuna yuzasida kraterlardan tashkil topgan muntazam LIPSS hosil qilish uchun optimal tezlik topildi. 12-rasmda lazer impulslarini skanerlash tezligi 50 va 500 mm/s da o‘zgartirilgan sirtlarning SEM tasvirlari keltirilgan. Skanerlash tezligi past bo‘lgan holatda,

$1,0 \pm 0,1 \mu\text{m}$ davriylik bilan PFCH hosil qiluvchi Ni yuzasida nano va mikro o'lchamdagi davriy tuzilmalar paydo bo'ldi (12(a) -rasm). Shu bilan birga, biz past skanerlash tezligida YUFCH shakllanishini kuzatdik (12 (b)-rasm). Ti sirtida nano o'lchamli konussimon strukturalar ablyatsiya impulslarining past-50 mm/s skanerlash tezligida kuzatildi (12(c)-rasm). Bunda nano o'lchamli konussimon strukturalarning diametri 500 dan 1000 nm gacha va balandligi 500 nm gacha o'lchamda ekanligi ma'lum bo'ldi. Nano o'lchamli konussimon strukturalar tasodifiy ravishda lazer nurlarining qutblanish yo'nalishida yo'nalar ekan. Oddiy LIPSSlar bilan o'zgartirilgan sirtlarda yorug'lik difraksiyasining tasviri 12(e)-rasmda keltirilgan. Namunalar yuzasi oq nur bilan yoritilgan.



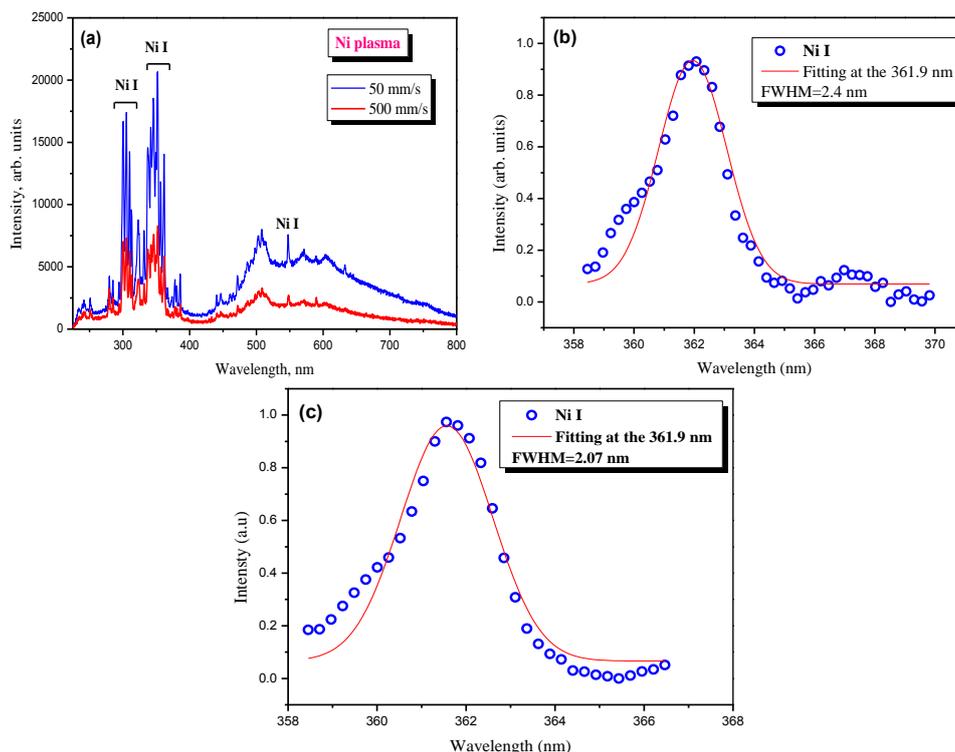
12-rasm. Ablyatsiya impulslarining turli skanerlash tezligida nishonlarning ablyatsiyalangan yuzalarining SEM tasvirlari.

(a) 50 mm/s, (b) 500 mm/s, skanerlash tezligida nikel sirtining SEM tasvirlari, SEM tasvirlari 50 mm/s, (c) va 500 mm/s (d) skanerlash tezligi bilan o'zgartirilgan titan namunasiga mos keladi, (e) LIPSS sirtining oq yorug'lik manbai bilan yoritilishida tarqalgan yorug'likning optik tasvirlari va $2 \mu\text{m}$ o'lchamdagi LIPSSning SEM tasviri.

Odatda, davriyligi $\Lambda_{PFCH} \approx 1,0 \pm 0,1 \mu\text{m}$ bo'lgan LIPSS hosil bo'lganda, difraksiya burchaklari namuna yuzasining normaliga nisbatan 10° dan 40° gacha o'zgarishi mumkin. YUFCH va nano o'lchamli konussimon strukturalar holatida namunalar yuzasida doimiy quyuq ranglar kuzatildi.

Ablyatsiya lazer impulslarining turli skanerlash tezligida Ni nishon sirtida hosil qilingan plazmaning optik emissiya spektrlari 13-rasmda ko'rsatilgan. Elektronlarning zichligi va ablyatsiya impulslarining skanerlash tezligi o'rtasidagi bog'liqlik 13(a)-rasmda keltirilgan. Qiyoslash natijasida plazmaning optik emissiya spektri (OES) liniya chiziqlari va fon yuqori skanerlash tezligida ortganligini ko'rsatdi (13(a)-rasm). Plazma OES spektrlarining fon signali uzluksiz

holatlardan qo‘zg‘aluvchi erkin elektronlarning emissiyasini o‘z ichiga oladi. Plazma parametrlarini hisoblash uchun ionli o‘tishlarning alohida chiziqlari tahlil qilindi.



13-rasm. Abyatsiya lazer impulslarining turli skanerlash tezligida Ni nishon sirtida hosil qilingan plazmaning optik emissiya spektrlari:

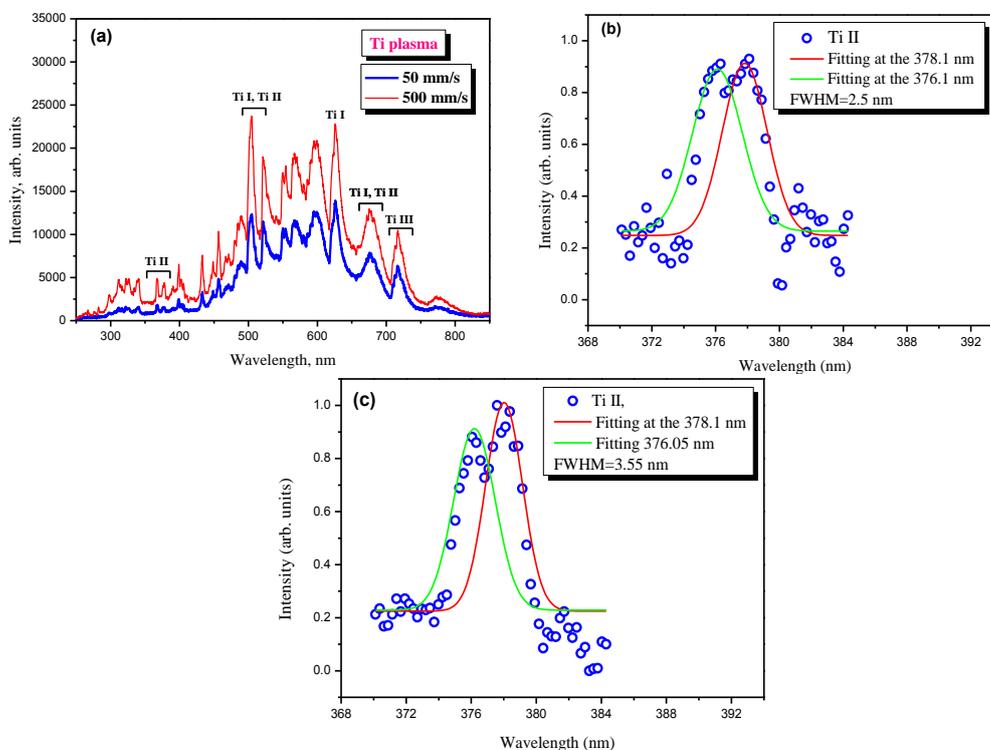
(a) Nikel (Ni) nishoniga 1030 nm, 50 kHz chastotali, 40 fs impulsli lazer nurlanishi ta’sirida hosil bo‘lgan plazmaning optik emissiya spektri; (b) Spektrlar 50 mm/s va 500 mm/s; (c) skanerlash tezligida Ni nishon yuzasida LIPSS va konussimon strukturalar hosil bo‘lish jarayonida qayd qilindi. Shtark usuli yordamida elektronlarning zichligini o‘lchash uchun 361,9 nm da Ni I ion o‘tish chizig‘ining profili kengaytirildi.

Ni sirtida hosil qilingan plazmaning emissiya liniya chiziqlari NIST ma’lumotlar bazasi yordamida aniqlandi. Ushbu ma’lumotlar bazasidan 361,9 nm da Ni chizig‘i bir zaryadli Ni (I) ionlariga mos kelishi aniqlandi (13 b va c-rasmlar). Ni plazmasi bir zaryadli ionlardan iborat bo‘lganligi sababli, spektral chiziqlarning bir-birining ustiga chiqish holati yuz bermadi.

Elektronlarning zichligi Shtark kengayish usuli yordamida aniqlandi. Bu usul zaryadlangan zarralarning to‘qnashuvi natijasida yuzaga keladigan plazmadagi spektral chiziqlarni kengaytirishga asoslangan. Spektral liniya chiziqlarini Lorents funksiyasi bilan moslashtirib, (fitting) yarim maksimalda kenglik topildi va LIPSSning turli shakllarini shakllantirish jarayonida qo‘zg‘atilgan plazma sohasidagi elektronlarning zichligidan keyingi hisoblash uchun foydalanildi.

Elektronlarning temperaturasini hisoblashda lazer nurlanishi quvvat zichligiga va namuna atom massasiga hamda ionlarni zaryad soniga bog‘liqlik usuli yordamida amalga oshirildi. Bu yerda fs impulsli lazer nurlanishining eng yuqori quvvat zichligi $2,0 \times 10^{13}$ Vt sm^{-2} ga teng. Ni namunasi holatida temperatura bir zaryadlangan ionlar uchun $Z=1$ hisoblangan. Ti namunasini esa harorat ikki

marta zaryadlangan ionlar uchun $Z=2$ hisoblangan. Ti sirtida nano o'lchamli strukturalar shakllantirish jarayonida elektronlarning zichligi va temperaturasini miqdoriy hisoblash uchun plazmaning emissiya spektri qayd etildi (14-rasm). Plazma OES spektrlaridan fon signalining pasayishini uyg'ongan erkin elektronlar konsentratsiyasining pasayishi bilan izohlash mumkin. Bu ablyatsiya lazerining pastroq skanerlash tezligida Ti yuzasida nano o'lchamli konussimon strukturalar shakllanishida muhim ro'l o'ynaydi (14 (a)-rasm). 14(b) va 14(c) rasmlardagi 378,1 nm.ga ega spektral chiziqlar Ti ning ikki zaryadli ionlariga mos keladi. Olingan spektral liniya chiziqlari Ti II ion uchun spektral chiziqning FWHM ni taxmin qilish imkonini berdi. Ti yuzasida hosil qilingan plazma spektrining kengayishi ikki va uch marta zaryadlangan Ti ionlarining bir vaqtning o'zida qo'zg'alishi natijasida yuzaga keldi. 376,1 nm va 378,1 nm to'lqin uzunliklarida kuchli spektral chiziqlarning bir-biri ustiga chiqishi tufayli ikkala spektral chiziqlar chizildi.



14-rasm. Ablyatsiya lazer impulslarining turli skanerlash tezligida Ti nishon sirtida hosil qilingan plazmaning optik emissiya spektrlari:

(a) Titan nishoniga 1030 nm to'lqin uzunlikli, 50 kHz chastotali va 40 fs impulsli lazer nurlanishi ta'sirida hosil qilingan plazmaning optik emissiya spektri. Spektrlar 50 mm/s (b) va 500 mm/s (c) skanerlash impulslarining skanerlash tezligida Ti nishonining yuzasida LIPSS tuzilmalari hosil bo'lish jarayonida qayd qilingan. Shtark usuli yordamida elektron zichligini o'lchash uchun 376,1 nm da Ti II ion o'tish chizig'ining profili kengaytirildi.

Jadval ma'lumotlaridan 376,1 nm to'lqin uzunligida Ti II ion uchun elektron ta'sir parametridan foydalanildi. 6-jadvalda mos ravishda Ni I va Ti II ionlari uchun elektronlarning zichligi va temperaturasining hisoblangan qiymatlari keltirilgan. LIPSSning kuzatilgan shakli va Ti yuzasida nano o'lchamli konussimon strukturalarning paydo bo'lishi Ti nishonining ablyatsiyasi paytida hosil bo'lgan induksiyalangan plazma yoyidagi elektronlarning zichligi bilan

bog‘liq. Plazma parametrlari va ablyatsiyalangan yuzaning morfologiyasi o‘rtasidagi bog‘liqlikni ablyatsiya impulslarini skanerlash tezligini o‘zgartirish orqali kuzatish mumkin.

6-jadval

Ni va Ti namunalari yuzasida LIPSS tuzilmalari hosil qilish jarayonida olingan OES parametrlari

Elementlar	Skanerlash		E (eV)	W (Å)	$\Delta\lambda$ (nm)	$n_e(10^{18})$ sm^{-3}	$T_e 10^7$ (K)
	tezligi (mm/s)	λ (nm)					
Ni (I)	50	361.926	3.59	0,170	2.4	0,7	2.4
	500						
Ti (II)	50	376.1	2.60	0,247	2.55	1.88	4.6
	500						

Plazma parametrlari, skanerlash tezligi va LIPSS tuzilmalari davriyligining o‘zaro bog‘liqligi impulslar sonining ko‘payishi natijasida ham paydo bo‘lishi mumkin. Plazmonik to‘lqinning chastotasi elektron zichligiga qarab o‘zgaradi $\omega_p(n_e) = \sqrt{n_e e^2 / \epsilon_0 m^*}$ (bu yerda ω_p – plazmonik to‘lqin chastotasi, n_e – elektron zichligi, e – elektronning zaryadi, ϵ_0 -elektr doimiysi, m^* -elektronning massasi. Namuna sirtida hosil qilingan plazma chastotasi ma’lum o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lgan materiallar uchun zaryad tashuvchisi erkin elektronlarning zichligini o‘zgarishiga bog‘liq. Plazmonik chastotani boshqarish orqali LIPSS davriyligi bilan bog‘liq bo‘lgan sirtiy plazmonik polyariton SPP to‘lqin uzunligini boshqarish mumkin. LIPSS davriyligini SPP to‘lqin uzunligini va lazer nurlanishining tushish burchagini boshqarish orqali o‘zgartiriladi. SPP ning to‘lqin uzunligini materiallar yuzasida hosil bo‘lgan plazma sohasidagi uyg‘otilgan erkin elektronlarning zichligini tahlil qilish orqali baholash mumkin. Ti yuzasida konussimon strukturalarning paydo bo‘lishi, shuningdek, ablyatsiya paytida plazma yoyining elektronlar zichligining kamayishi bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin. Skanerlash tezligini o‘zgartirish orqali biz nishonlar yuzasidagi impulslar sonini osongina boshqarishimiz mumkin. Femtosekundli lazer yordamida lazer ablyatsiyasining analitik xususiyatlarini o‘rganish va optik emissiya spektroskopiyasi yordamida fs va ns ablyatsiyasi rejimlarini taqqoslash kompozit materiallarning xususiyatlarini tahlil qilish usuli hisoblanadi.

XULOSA

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

1. Qattiq agregat holatdagi alyuminiy va mis elementlarini normal atmosfera bosimida to‘lqin uzunligi 1064 nm, impuls davomiyligi 28 ps bo‘lgan Nd: YAG lazer nurlanishi ta’sirida hosil bo‘lgan lazer plazma spektroskopik usulda tadqiq qilindi. Namuna sirtini 50 mm/min va 500 mm/min tezlikda lazer nurlanishi bilan skanerlashdan hosil bo‘lgan plazma spektr intensivliklari farq qilib, bir xil to‘lqin

uzunlikda ustma-ust tushganini ko'rsatdi. Metallar aluminiy va mis sirtini 500 mm/min tezlikda lazer nurlanishi bilan skanerlashdan hosil bo'lgan plazmaning asosiy parametrlari erkin elektronlarning zichligi (Al $n_e \approx 1,8 \cdot 10^{17} \text{sm}^{-3}$, Cu $n_e \approx 3,2 \cdot 10^{18} \text{sm}^{-3}$) va ularning plazma sohasidagi uyg'otilgan erkin elektronlarning temperaturalarini (Al $T_e = 1,56 \text{ eV}$, Cu $T_e = 1,42 \text{ eV}$) aniqlandi.

2. Normal atmosfera sharoitida qattiq agregat holatidagi indiy (In) va kremniy (Si) elementini to'lqin uzunligi 1064 nm va impuls davomiyligi 10 ns bo'lgan Nd:YAG lazeri bilan nurlantirildi va hosil bo'lgan plazmaning emissiya spektrlari tahlil qilindi. Bunda indiy va kremniy sirtida hosil bo'lgan plazma sohasidagi uyg'otilgan erkin elektronlarning zichligi (In $n_e \approx 3,7 \cdot 10^{19} \text{sm}^{-3}$, Si $n_e \approx 10^{17} \text{sm}^{-3}$), elektronlarning temperaturasi (In $T_e = 3,05 \text{ eV}$, Si $T_e = 0,8 \text{ eV}$) aniqlandi.

3. To'lqin uzunligi 1030 nm, impuls davomiyligi 40 fs bo'lgan Yb:YAG lazer nurlanishi bilan ta'sir qilish orqali Ni va Ti nishonlarining yuzalarida PFCH, YUFCH va nano o'lchamli konussimon strukturali tuzilmalari lazerning turli skanerlash tezliklarida shakllantirildi. Namunalarning optik emissiya spektrlarini tahlil qilish orqali namunalar sirtida hosil qilingan plazmaning parametrlari hisoblab chiqildi, bu esa plazmaning parametrlarini namunalar yuzasida hosil bo'luvchi LIPSS tuzilmalarining tabiati bilan bog'liq bo'lishi mumkin ekanligi ko'rsatildi.

4. Titan nishoni yuzasida oddiy LIPSS va nano o'lchamli konussimon strukturalar uchun hosil qilingan plazma parametrlari baholandi. Ti nishonining plazmasida erkin elektronlarning nisbatan past konsentratsiyasida nano o'lchamli konussimon strukturalarning shakllanishi kuzatildi.

5. Ablyatsiyalovchi lazer impulsining past skanerlash tezligida erkin elektronlar zichligi konsentratsiyasining oshishi Ni yuzasida davriyligi $\Lambda_{YUFCH} = 0,5 \pm 0,1 \mu\text{m}$ bo'lgan YUFCH hosil bo'lishiga olib keldi. Olingan natijalar LIPSS strukturalarni nazorat qilishni tushuntiradi va ultratez lazerlar yordamida strukturalangan materiallarning funktsionalligi va yangi tatbiqlariga imkoniyat yaratadi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ РНД.03/29.12.2022.ФМ.55.07 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ УРГЕНЧСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ**

УРГЕНЧСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ВАПАЕВ МУРОДБЕК ЭРГАШОВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА
ФОРМИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР НА
ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ**

01.04.11- Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Ургенч – 2024

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве Высшего Образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за №B2022.3.PhD/FM772

Диссертация выполнена в Ургенчском государственном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице научного совета (www.urdu.uz) и на Информационно-образовательном портале «Ziynet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель: Давлетов Икрам Юсубович,
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Азаматов Закир Тахирович,
доктор физико-математических наук, профессор
Матназаров Анвар Рустамович,
кандидат физико-математических наук, доцент

Ведущая организация: Ташкентский государственный технический университет

Защита диссертации состоится «01» июнь 2024 года в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета PhD.03/29.12.2022.FM.55.07 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 №715) (Адрес: 220100, г. Ургенч, ул. Х.Алимджана, дом 14. Тел.: (99862) 224-66-11, факс: (99862) 224-67-00).

Автореферат диссертации разослан «10» май 2024 года.
(протокол рассылки № 1 от «10» май 2024 года).



Ш.Д. Пайзиев,
член комиссии, обязанности председателя
научного совета по присуждению ученой
степени, доктор физико-математических
наук, профессор

М.К. Курбанов,
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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. На сегодняшний день в мире применение современных лазерных устройств занимает лидирующие позиции в области науки, техники и технологий, в том числе и при модификации поверхностей твердых материалов физическими и химическими методами с целью изменения их морфологических, оптических и химических свойств. В целом образование цветной картины без химических красителей через образование покрытия на поверхности металлов в виде наноразмерных плазмонных наночастиц в результате формирования периодических микро/наноразмерных структур, нагревания поверхности металлов до высоких температур (5000-7000К) под воздействием лазерного излучения высокой плотности (0.1-10 Дж/см²) и перехода их в состояние ионизированной плазмы имеет важное значение. В этом ключе одной из важных задач является определение параметров лазерного излучения и плазмы с целью улучшения физико-химических свойств поверхностей материалов под воздействием лазерного излучения.

В последнее время в мире проводятся научные исследования по изучению влияния основных параметров лазерного излучения и внешней атмосферы, а также природы анализируемого материала на формирование наноразмерных структур. В этих направлениях приоритетными считаются анализ наноразмерных структур с использованием относительно доступных и низкоэнергетических методов, а также исследования по моделированию физических процессов, происходящих при взаимодействии лазерного излучения с веществами. При этом одной из важных задач считается исследование влияния параметров лазерной плазмы на формирование наноразмерных структур на поверхности металлов, а также определение скорости сканирования лазерным излучением для каждого выбранного металла и внедрение её в практику.

В нашей республике реализуется системные меры по снижению потерь и повышению эффективности использования ресурсов, а также по внедрению современных энергосберегающих технологий. В том числе в стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы поставлены задачи «...снижения энерго- и ресурсоемкости экономики, ...обеспечения внедрения инновационных разработок и технологий в технологические процессы производства бытовых товаров, экономики»¹. Реализация указанных задач, в том числе исследование влияния параметров лазерной плазмы на формирование наноразмерных структур на поверхности металлов, имеют важное значение

Представленное диссертационное исследование, в определенной мере, способствует выполнению задач, изложенных в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-60 от 28 января 2022 года «О стратегии

¹ Указ Президента Республики Узбекистан №УП-60 от 28 января 2022 года «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы»

развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы», а также ПП № 5011 от 2-го марта 2021 г. «О дополнительных мерах по дальнейшему развитию электротехнической промышленности и повышению конкурентоспособности местной продукции», и ПП № 5032 от 19 марта 2021 г. «Меры по повышению качества образования в области физики и развитию научных исследований», где указано «об эффективной организации учебного процесса в области физики, обеспечении интеграции науки и производства...»

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Данное исследование проводилось в соответствии с тематикой научно-исследовательских работ по развитию науки и техники республики III. «Развитие энергетики, энергоресурсосбережения, транспорта, машин и оборудования, современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронной техники»

Степень изученности проблемы.

Среди зарубежных ученых в решении научных задач по влиянию параметров лазерной плазмы на формирование наноразмерных структур на поверхности металлов большой вклад внесли Ф. Руффино,² А.В. Кабашинов,³ Р. Стоян,⁴ А. Хаят,⁵ Б. Сисахай,⁶ Б. Верхофф,⁷ М. Андерсон⁸ и другие.

Среди ученых нашей страны М.Р. Бедиллов,⁹ Р.Р. Хайдаров,¹⁰ И.Ю. Давлетов,¹¹ Т. Усманов, Р.А. Ганеев,¹² Г.С. Болтаев¹³ и др. внесли значительный вклад в исследование параметров многозарядных ионов лазерной плазмы и генерации гармоник высокого порядка в лазерно-плазменных средах.

Однако изучению влияния параметров лазерной плазмы на формирование наноразмерных структур на поверхности металлов и развитию исследований в этом направлении уделяется недостаточно внимания.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена по планам научных исследований Ургенчского государственного университета в рамках фундаментальных и прикладных проектов № 2021-80 «Исследование эффекта саморазогрева в многослойных полевых транзисторах с наношито» (2021-2023 гг.) и № 2021-88 «Исследование наноструктурных гидрофобной и супергидрофобной материалов, используемых в солнечных элементах» (2021–

² Ruffino F. Nanostructuring of Thin Metal Films.... Nanomaterials 2019, 9, 1133.

³ Kabashin A.V. Nanofabrication with Pulsed Lasers. Nanoscale Res Lett (2010) 5:454–463.

⁴ Stoian R. Advances in ultrafast laser structuring of materials... Nanophotonics. 2020 9(16): 4665 – 4688.

⁵ Asma Hayat, The role of laser fluence and ambient environments on fs laser... J. Appl. Phys. 125, 083302 (2019).

⁶ Seesahai B. Plasma temperature measurements in the context of Spectral interference.(2016).

⁷ Verhoff B. Dynamics of femto- and ns laser ablation plumes investigated J. Appl. Phys. 112, 093303 (2012).

⁸ M.Anderson. Surface and microstructure investigation of ps versus fs laser..Surf.&Coat.Tech. 409,126872 (2021);

⁹ Бедиллов М. Р., «Спектры ионов четырехэлементной лазерной плазмы», Квант. элект., 22, 6, 593–593, 1995.

¹⁰ Khaydarov R. R. “Effect of Optical Radiation on the Properties of ...” J. Mod. Phys., 05, 12, 1055–1061, 2014.

¹¹ Davletov I. Y. “An Installation for Obtaining Intense Flows of Multiply ..” Inst. Exp. Tech.,45, 708–710, 2002.

¹² T. Usmanov, R Ganeev. Nonlinear-optical parameters of various media Quant. Electr 2007,37(7),605.

¹³ Boltaev G.S. Creation of azimuthally and radially directed LIPSS.J. of Phys D: Appli.Phys 54 (18), 185109(2021).

2022).

Цель исследования – определить основные параметры плазмы, образующейся на поверхности металлов под воздействием нано- и пикосекундного импульсного лазерного излучения различными методами, а также изучить влияние скорости фемтосекундного импульсного лазерного сканирования и параметров плазмы на образование наноразмерных структур на поверхности металлов.

Задачи исследования:

определение основных параметров плазмы, а именно электронной плотности и температуры, путем анализа спектров плазмы, образующейся на поверхности твердотельных элементов Si и In под воздействием импульсного излучения Nd:YAG-лазера длительностью 10 нс и длиной волны 1064 нм в условиях нормальной атмосферы;

определение основных параметров плазмы, образующейся на поверхности элементов Al и Cu при сканировании со скоростью 50-500 мм/мин лазерным излучением с импульсом 28 пс и длиной волны 1064 нм;

определение коэффициентов штарковского уширения спектральных линий высокозарядного ионного перехода элемента ниобия (Nb IV) по спектральному распределению плазмы, образующейся импульсным лазером длительностью 28 пс на поверхности твердотельного ниобиевого сплава;

формирование наноструктур различного периода и формы на поверхности титана и никеля воздействием излучения Yb:YAG-лазера с длительностью импульса 40 фс и длиной волны 1030 нм;

изучить связь между параметрами плазмы, образующейся на поверхности титана и никеля, и скоростью сканирования фемтосекундным импульсным лазером, а также размерами формируемой наноструктуры.

Объектом исследования было изучение влияния параметров лазерной плазмы на формирование наноразмерных структур на поверхности металлов.

Предметом исследования является морфологический анализ поверхности металлов, скорости сканирования лазерного излучения, а также параметров (плотность электронов и температуры) лазерной плазмы.

Методы исследования. Для реализации задач, поставленных в процессе исследования, были использованы метод лазерной спектроскопии при изучении плазмогенерации и оптических параметров плазмы на поверхности выбранных металлов, метод электронной микроскопии-при анализе размеров и свойств наноструктур.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

определены основные параметры плазмы, а именно, электронная плотность – методом уширения Штарка и температура – методом распределения Больцмана путем анализа спектров плазмы, образующейся на поверхности элементов Si и In в твердом агрегатном состоянии в нормальных атмосферных условиях под воздействием импульсного излучения Nd:YAG-лазера длительностью 10 нс и длиной волны 1064 нм;

определены электронная плотность и температура с учётом перекрытия

спектральных линий в плазме Al и Cu при скорости сканирования 50-500 мм/мин на основе анализа спектров плазмы, образующейся на поверхности элементов Al и Cu при сканировании со скоростью 50-500 мм/мин лазерным излучением с импульсом 28 пс и длиной волны 1064 нм;

впервые были определены коэффициенты уширения Штарка для высокозарядных ионных переходов элемента ниобия (Nb IV) из спектрального распределения плазмы, генерируемой импульсным лазером длительностью 28 пс на поверхности ниобиевого сплава в твердом агрегатном состоянии;

показано, что параметры плазмы связаны с природой периодических структур, образующихся на поверхности образцов: под воздействием излучения Yb:YAG-лазера с длительностью импульса 40 фс и длиной волны 1030 нм на поверхности титана и никеля были сформированы наноструктуры различного периода и формы, и путем анализа спектров оптического излучения образцов были определены параметры плазмы, образующейся на их поверхности;

получена корреляция между параметрами плазмы, образующейся на поверхности титана и никеля, со скоростью сканирования фемтосекундным импульсным лазером, а также размерами образующейся наноструктуры, кроме того с увеличением концентрации свободных электронов в лазерной плазме было обнаружено изменение формы наноструктур на поверхности титана и никеля путем регулирования плазмонной частоты.

Практические результаты исследования заключаются в следующем: получены спектры излучения плазмы при формировании наноразмерных структур на поверхности анализируемых металлов в нормальных атмосферных условиях;

образованы периодические наноразмерные структуры на поверхности металлов при различных скоростях сканирования импульсным лазерным излучением;

показана возможность изменения свойств металлов за счет учета воздействия параметров лазерной плазмы, качественной обработки металлов лазерным излучением и формирования периодических наноразмерных структур на поверхности металлов.

Достоверность результатов исследования. Достоверность полученных в исследованиях результатов основана на использовании современных научных методов исследования оптики и лазерной физики при формировании наноразмерных структур на поверхности металлов под воздействием лазерного излучения и регистрации спектра плазменного излучения, использовании современных высокоточных приборов и взаимной согласованности проведенных теоретических расчетов и полученных научных результатов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследований характеризуется определением основных параметров плазмы и коэффициентов уширения Штарка для спектральных линий многозарядных ионных переходов в сплаве

ниобия на основе анализа спектров плазмы, образующейся на поверхности элементов в твердом агрегатном состоянии в нормальных атмосферных условиях под воздействием лазерного излучения, и изучением влияния на формирование наноразмерных структур.

Практическая значимость результатов исследований интерпретируется формированием наноструктур различного периода и формы на поверхности титана и никеля под воздействием лазерного излучения и связью параметров плазмы с природой периодических структур, образующихся на поверхности образцов, а также изменением формы наноструктуры на поверхности титана, никеля с увеличением концентрации свободных электронов в плазме.

Внедрение результатов исследований. Полученные научные результаты по влиянию параметров лазерной плазмы на формирование наноразмерных структур на поверхности металлов:

Результаты воздействия параметров - электронной плотности и температуры плазмы, образующейся на поверхности металлов под воздействием лазерного излучения, разработанные алгоритмы расчета использовались в процессе обработки металлов и сложных конструкционных материалов с помощью лазерного устройства при АО «Урганчкорммаш». В результате было достигнуто значительное улучшение процессов металлообработки и достигнуто повышение качества конечного продукта;

Спектры излучения плазмы, образующейся на поверхности металлов, включая коэффициенты штарковского уширения, определенные для спектральных линий ниобиевой плазмы Nb(IV), были использованы в научно-исследовательском проекте 451-03-68/2020-14/200002 Астрономической обсерватории Белграда, Сербия. В результате с его помощью была объяснена связь между параметрами плазмы, образующейся при формировании наноразмерных структур на поверхности металлов, и размером периода;

важная информация об основных процессах, связанных с образованием наноструктур на поверхности металлов, была использована в научном проекте Исследовательского центра Латвийского университета. В результате удалось определить и оценить параметры плазмы, образующейся под воздействием лазерного излучения.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований обсуждались на 5-и международных, на 8-и республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов. Всего по теме диссертации опубликовано 17 научных работ, в том числе 4 статьи в научных изданиях, рекомендованных к публикации основных научных результатов докторских диссертаций ВАК Республики Узбекистан, в том числе в 1 зарубежном и 3 национальных научных журналах.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объем работы составляет 94 страниц.

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 диссертации под названием **«Современная интерпретация проблемы: воздействие лазерного излучения на металлы»** на основе анализа литературы представлены общие сведения об экспериментальных и теоретических исследованиях по изучению параметров плазмы, образующейся при формировании наноразмерных структур на поверхности металлов, а также по изучению воздействия параметров преимущественно импульсного лазерного излучения на формирование структур. Были проанализированы успехи, достигнутые в исследовании процесса формирования наноразмерных структур на поверхности металлов и наблюдаемые эффекты под воздействием лазерного излучения. С учётом малого количества работ, посвященных исследованиям по влиянию параметров лазерной плазмы на формирование периодических наноразмерных, были сформулированы основные цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе диссертации **«Описание экспериментальных устройств для формирования наноразмерных структур на поверхности металлов и исследования параметров плазмы»** приведены сведения о приборе импульсного лазера, об устройстве регистрации спектра плазмы, о методе Штарковского уширения для определения плотности электронов в плазме, образующейся на поверхности металлов под воздействием лазерного излучения, и о методе определения температуры электронов.

Для формирования плазмы на поверхности металлов и исследования параметров плазмы при скорости сканирования 50 мм/мин и 500 мм/мин при нормальных атмосферных условиях металлы в твердом агрегатном состоянии сканировались лазером Nd:YAG с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 28 пс (EKSPLA PL-2231-50). Полупроводниковые элементы облучались Nd:YAG-лазером с длиной волны 1064 нм и импульсом 10 нс, а параметры излучения полученной плазмы анализировались с помощью спектрометра (Ocean Optics HR-4000) (рис. 1). Для формирования периодической наноразмерной структуры на поверхности металлов в нормальной атмосфере была использована экспериментальная оптическая схема регистрации плазмы (рис. 2), образующейся при сканировании на различных скоростях импульсом 40 фс, длиной волны 1030 нм, мощностью 5 Вт Yb:YAG-лазером для формирования периодической наноразмерной структуры на поверхности металлов в нормальной атмосфере.

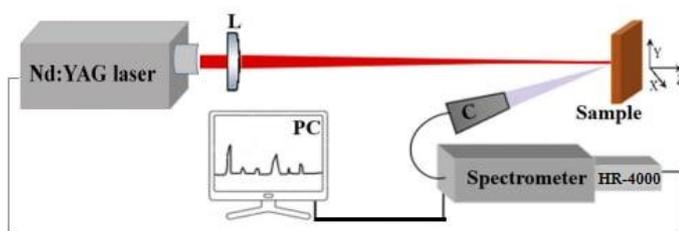


Рис. 1. Экспериментальная оптическая схема генерации и регистрации излучения лазерной плазмы, созданной на металлических мишенях.
 Nd:YAG-лазер, L-линза, Sample – образец, XYZ – трехкоординатный держатель образцов, C-оптоволоконный спектрофотометр, HR-4000 – спектрофотометр, ПК – персональный компьютер.

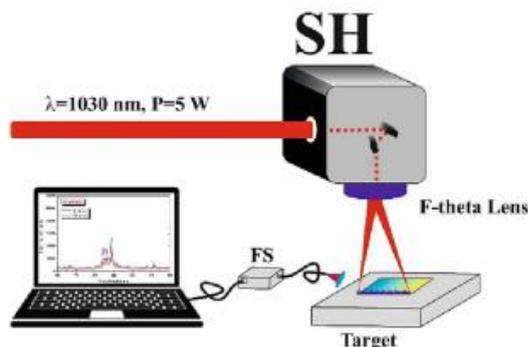


Рис. 2. Экспериментальная оптическая схема регистрации плазмы, образующейся при сканировании лазерным излучением с разными скоростями для формирования периодической наноразмерной структуры на поверхности металлов в нормальной атмосфере.

Yb:YAG - волоконный фемтосекундный лазер, SH - сканирующая головка, F-тета - фокусирующая линза, FS - волоконный спектрофотометр, Т-образец.

В третьей главе диссертации именуемой «Исследование параметров лазерной плазмы, образующейся на поверхности металлов», приведены результаты исследования формирования наноразмерных структур на поверхности твердотельного алюминия (Al) и меди (Cu) при облучении лазером с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 28 пс.

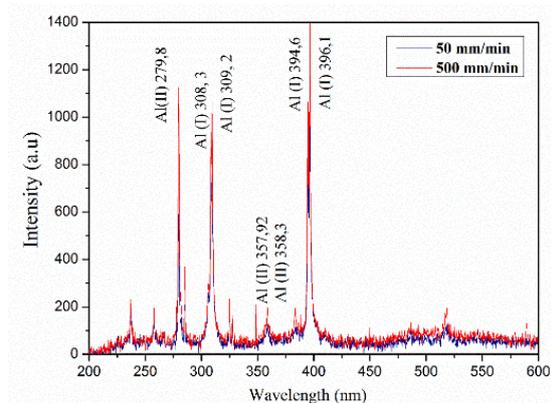


Рис. 3. Спектр излучения плазмы, сформированного лазерным излучением поверхности алюминия при скоростях сканирования 50 мм/мин и 500 мм/мин.

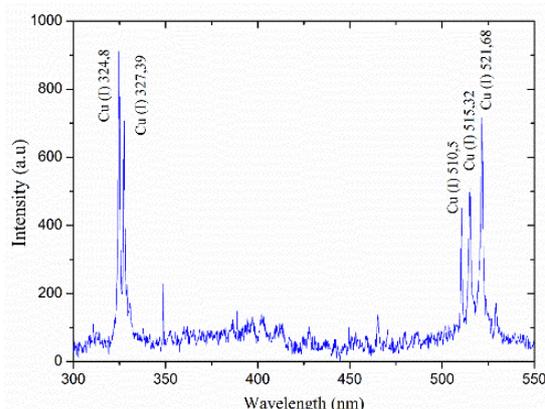


Рис. 4. Спектр плазмы, полученный при сканировании поверхности меди лазерным излучением с длительностью импульса 28 пс и скоростью 50 мм/мин.

Основные параметры лазерной плазмы были изучены при облучении поверхности образцов лазерным излучением со скоростью сканирования 50-500 мм/мин. При этом линии спектра Al-плазмы, генерируемой при сканировании поверхности алюминия со скоростями 50-500 мм/мин, на одной длине волны совпадают, но отличаются интенсивностью (рис. 3). Анализ полученного спектра плазмы показал наличие ионных переходов однозарядного (I) и двухзарядного (II) алюминия. Спектр излучения плазмы, образующейся при сканировании поверхности Cu лазерным излучением со скоростью 50 мм/мин, показал наличие линий перехода однозарядных ионов медного элемента (рис. 4).

Таблица 1

Значения электронной плотности определены для спектральных линий перехода ионов Al(I) и Al(II)

<i>Al (I), $\lambda=308,3$ нм FWHM=0,63нм</i>							
<i>T (K)</i>		2500	5000	10000	20000	40000	80000
1	<i>W Å</i>	0,132	0,120	0,126	0,143	0,169	0,210
	<i>n_e, (10¹⁷)см⁻³</i>	2,38	2,62	2,5	2,2	1,86	1,5
<i>Al (I), $\lambda=309,02$ нм FWHM=0,87нм</i>							
2	<i>W Å</i>	0,132	0,120	0,126	0,143	0,169	0,210
	<i>n_e, (10¹⁷)см⁻³</i>	3,29	3,62	3,45	3,04	2,57	2
<i>Al(II), $\lambda=357,92$ нм FWHM=0,26нм</i>							
3	<i>W Å</i>	0,475	0,268	0,179	0,130	0,10	0,085
	<i>n_e, (10¹⁷)см⁻³</i>	0,273	0,485	0,726	1	1,3	1,52
<i>Al(II), $\lambda=358,2$ нм FWHM=0,32нм</i>							
4	<i>W Å</i>	0,475	0,268	0,179	0,130	0,10	0,085
	<i>n_e, (10¹⁷)см⁻³</i>	0,336	0,597	0,893	1,23	1,6	1,88
<i>Al(I), $\lambda=394,6$ нм FWHM=0,42нм</i>							
5	<i>W Å</i>	0,01	0,694	0,432	0,255	0,166	0,136
	<i>n_e, (10¹⁷)см⁻³</i>	0,21	0,3	0,486	0,83	1,26	1,54
<i>Al(I), $\lambda=396,1$ нм FWHM=0,65нм</i>							
6	<i>W Å</i>	0,01	0,694	0,432	0,255	0,166	0,136
	<i>n_e, (10¹⁷)см⁻³</i>	0,325	0,468	0,752	1,27	1,95	2,38

Спектральные линии были найдены путем сравнения с линиями, доступными в базе данных атомных спектров (NIST). Были определены длины волн и ширины для линий перехода ионов Al и Cu, соответствующие спектрам плазмы, и эти значения позволили определить плотность свободных электронов в плазме методом уширения Штарка (табл. 1, 2). Полуширина линий спектра плазмы (FWHM-full width at half maximum) определялась путем аппроксимации гауссова импульса с использованием компьютерной программы Originlab.

Таблица 2

**Плотность свободных электронов, определенных из спектральных
линий (I) зарядного элемента Cu**

<i>Cu (I), $\lambda=324,75$ нм FWHM= 0,87 нм</i>					
	<i>T (K)</i>	5000	10000	20000	30000
1	<i>W Å</i>	0,00320	0,00301	0,00346	0,00398
	<i>n_e, (10¹⁹)см⁻³</i>	1,35	1,44	1,25	1,09
<i>Cu (I), $\lambda=327,39$ нм FWHM= 0,62 нм</i>					
2	<i>W Å</i>	0,00300	0,00321	0,00330	0,00391
	<i>n_e, (10¹⁸)см⁻³</i>	10,3	9,65	9,39	7,92
<i>Cu (I), $\lambda=510,55$ нм FWHM= 0,69 нм</i>					
3	<i>W Å</i>	0,0093	0,0102	0,0105	0,0111
	<i>n_e, (10¹⁸)см⁻³</i>	3,7	3,38	3,28	3,1

Электронную температуру плазмы, образующейся на поверхности алюминия, можно определить по соотношению интенсивностей двух спектральных линий, образованных одним и тем же ионным переходом, с использованием метода распределения Больцмана. Путем анализа интенсивностей двух спектральных линий при 309,02 нм и 396,1 нм из спектра алюминия и других констант было установлено, что температура возбужденного электрона в области плазмы составляет 0,65 эВ. Для ионных переходов двух линий Al(I) 309.02 и Al(I) 391.6 был построен линейный график распределения Больцмана (рис. 5). Для более точного измерения электронной температуры плазмы алюминия был построен график (рис. 6) распределения Больцмана с использованием четырех эмиссионных линий ионного перехода (Al(I) 308.2, 309.02, 394.6, 396.1). При этом было определено, что величина наклона, указывающая электронную температуру плазмы, для ионных переходов Al(I) равна $T=1,56$ эВ.

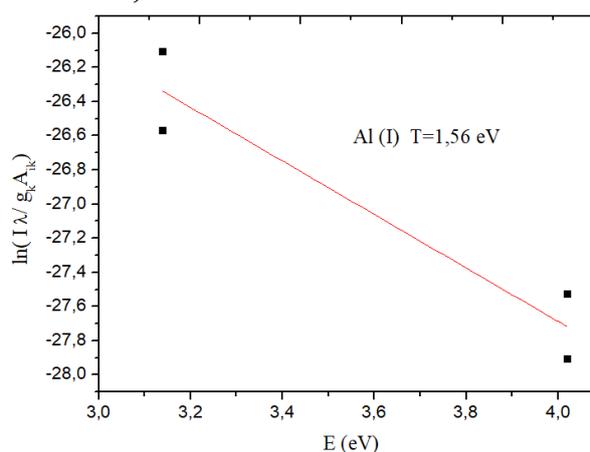
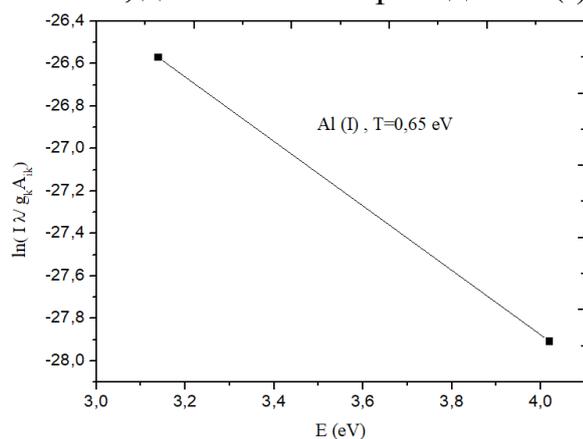


Рис.5. График распределения Больцмана ионных переходов Al(I) 309,02 и Al(I) 396,1.

Рис.6. Al(I) 308,2, 309,02, 394,6, 396,1 - график распределения Больцмана эмиссионных линий ионного перехода.

Для оценки температуры возбужденных свободных электронов в плазме меди был использован метод определения в соответствии с плотностью мощности лазерного излучения, атомной массы и зарядового числа

многозарядных ионов. Для данного эксперимента был выбран импульсный лазер Nd-YAG с плотностью мощности $1,8 \cdot 10^{12}$ Вт/см², атомная масса элемента меди 63,54 г/моль, зарядовое число $Z=1$.

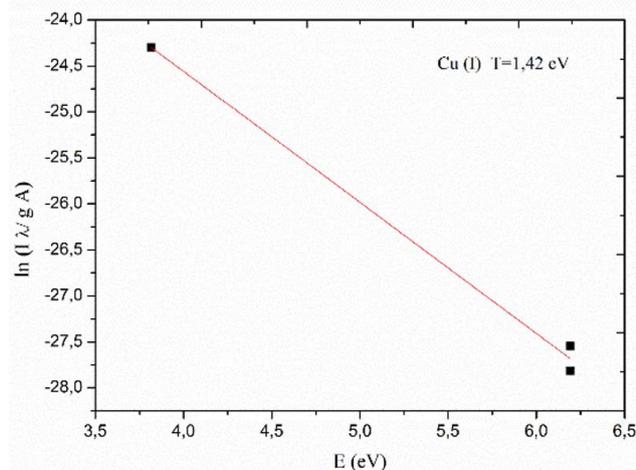


Рис. 7. График распределения Больцмана для переходов ионов Cu(I).

график распределения Больцмана (рис. 7) по характеристикам 3-х эмиссионных линий ионного перехода Cu(I). Наклон в данном случае указывает на температуру возбуждённых свободных электронов в плазме, и было установлено, что для Cu(I) ионных переходов эта величина равна $T=1,42$ эВ.

При расчете с использованием этих данных было установлено, что электронная температура для однозарядных ионных переходов равна 8,22 эВ. Данный метод в основном использовался для определения температуры возбужденных свободных электронов в плазме тяжелых элементов. Для определения температуры возбужденных свободных электронов плазмы на поверхности меди был построен

(In) индий и (Si) кремний находящиеся в твердом агрегатном состоянии облучались Nd:YAG-лазером с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 10 нс, и параметры излучения полученной плазмы были проанализированы с помощью волоконно-оптического спектрометра. Полученный спектр плазмы показал наличие ионных переходов, образованных однозарядными (I) и двузарядовыми (II) элементами (In) (рис.8) и (Si) (рис. 9).

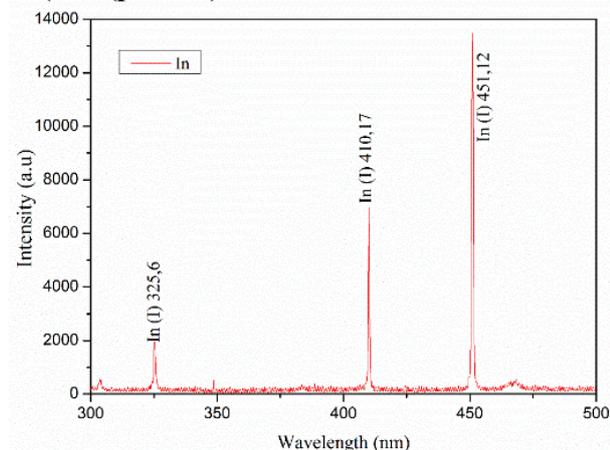


Рис. 8. Спектр излучения плазмы индия.

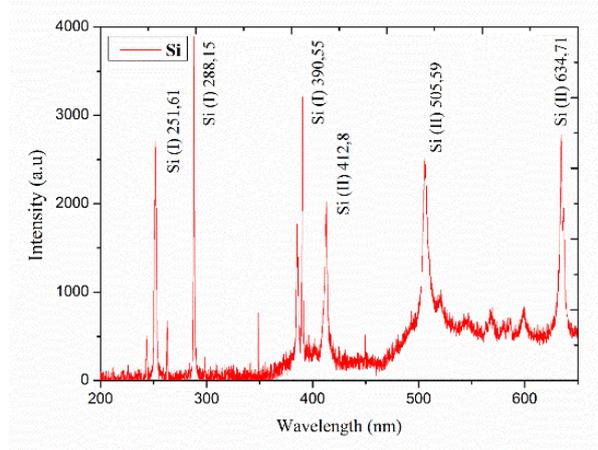


Рис. 9. Спектр излучения плазмы кремния

В спектрах плазмы были определены соответствующие спектральные линии (In) и (Si) и ширины этих переходных линий, которые в свою очередь позволили определить концентрацию свободных электронов в плазме методом уширения Штарка (табл. 3, 4). В этом случае ширина спектра на

половине ширины (FWHM) определялась путем аппроксимации гауссова импульса.

Таблица 3

Определенные концентрации электронов в спектральной линии (I) зарядного перехода ионов индия

<i>In (I), $\lambda=4101.7 \text{ \AA}$</i>						
<i>T (K)</i>		2500	5000	10000	20000	40000
1	<i>W \text{ \AA}</i>	0,0047	0,0062	0,0084	0,00108	0,00124
	<i>n_e, (10¹⁸)см⁻³</i>	5,42	4,1	3	23,6	20
<i>In (I), $\lambda=4511.2 \text{ \AA}$</i>						
2	<i>W \text{ \AA}</i>	0,0047	0,0062	0,0084	0,00108	0,00124
	<i>n_e, (10¹⁸) см⁻³</i>	8,72	6,6	4,8	37,9	33

Таблица 4

Плотности свободных электронов в спектральных линиях I и II зарядовых ионных переходов элементов кремния

<i>Element</i>	<i>Si (I)</i>	<i>Si (I)</i>	<i>Si (II)</i>		<i>Si (II)</i>	<i>Si (II)</i>
λ (нм)	251,61	288,15	412,8		505,59	634,71
FWHM (нм)	2,33	0,85	1,9		3,51	1,28
W (Å)	0,70	0,54	1,29		1,8	1,2
n (10 ¹⁷ см ⁻³)	1,66	0,78	0,73		0,97	0,54

Чем больше число эмиссионных линий с одинаковым ионным переходом, тем точнее измерение температуры электронов. Для более точного измерения температуры возбужденных свободных электронов в индиевой плазме был построен график распределения Больцмана (рис. 9) с использованием 3 эмиссионных линий ионного перехода (In(I) 325,6; 410,17; 451,12) и других констант. Наклон графика указывает на температуру возбужденных свободных электронов в плазме, при этом было установлено, что $T=3,05$ эВ для ионных переходов In(I). Методом распределения Больцмана была определена электронная температура перехода иона Si II, равная 1,24 эВ, и построен график распределения Больцмана (рис. 10).

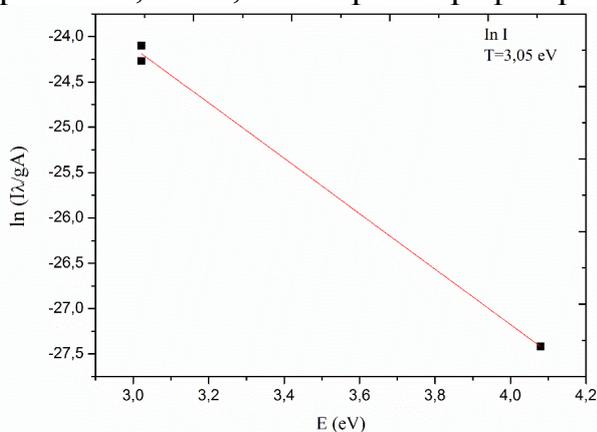


Рис. 9. График распределения Больцмана для переходов ионов индия In(I).

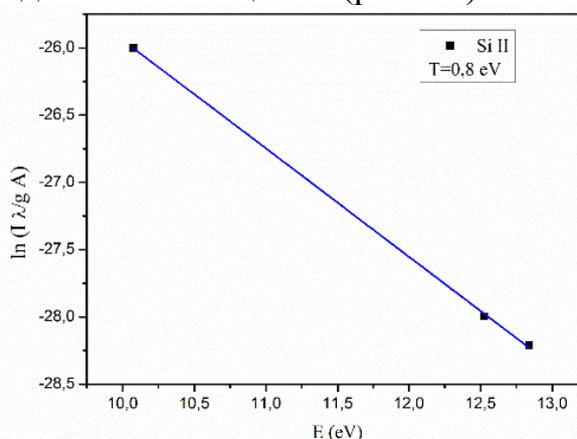


Рис. 10. График распределения Больцмана для ионных переходов кремния Si(II).

Температура возбужденных свободных электронов в кремниевой плазме определялась в зависимости от плотности мощности лазерного излучения и атомной массы элемента. Плотность мощности, использованная в нашем эксперименте с нс импульсным Nd-YAG-лазером, составляла 10^{11} Вт/см². Температура возбужденных свободных электронов в плазме кремния с (I) и (II) зарядовыми ионными переходами составляла $T=1,89$ эВ при $Z=1$ и $T=2,3$ эВ при $Z=2$.

Проанализирован спектр плазмы ниобиевого сплава в твердом агрегатном состоянии, образующейся при сканировании Nd:YAG-лазером длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 28 пс со скоростью 20 мм/мин. Эмиссионный спектр полученной плазмы показан на рис. 11.

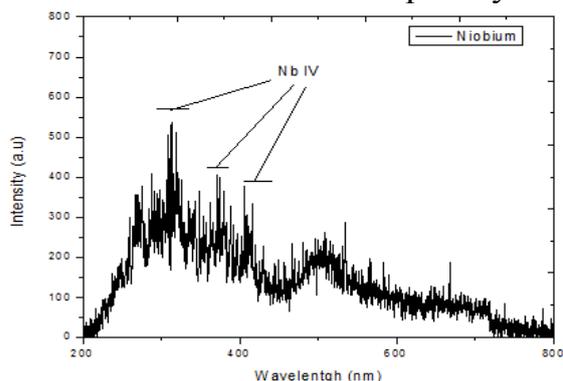


Рис. 11. Спектр оптико-эмиссионной плазмы ниобиевого сплава.

Теоретически рассчитаны штарковские коэффициенты уширения (параметры воздействия электронов, ионов) и создана база данных для анализа плазменного спектра ионно-переходных веществ. Тем не менее до настоящего времени не определены коэффициенты штарковского уширения для спектральных линий высокозарядного ионного перехода элемента ниобия (Nb IV). В сотрудничестве с сербским учёным M.S. Dimitrijevič, на основе модифицированного полуэмпирического метода, был определён коэффициент Штарковского уширения (W - параметр электронного действия) для спектральных линий плазмы ниобия (Nb IV) (табл. 5).

Таблица 5

Рассчитанные электронные параметры воздействия и плотности электронов для линий спектра Nb IV

Спектральные линии	Конфигурация	Нижний уровень	Верхний уровень	$W(\text{Å})$	FWHM (нм)	$n_e \cdot 10^{17} (\text{см}^{-3})$
318,30	$4d6p^3D_3-4d6dD_2$	p=1	d=2	0.78	0,81	0,51
371,17	$4d5d^3G_3 - 4d6p^3F_2$	d=2	p=1	0.537	1,43	1,32
373,15	$4d6p^3P_1-4d6d^3F_2$	d=2	p=1	1.06	0,44	0,2
405,26	$4d5dP_1-4d6p1D_2$	p=1	d=2	0,604	0,55	0,45

В четвертой главе диссертации на тему «Влияние параметров фемтосекундной импульсной лазерной плазмы на формирование наноразмерных структур на поверхности металлов» приведен анализ влияния скорости сканирования и параметров плазмы на периодические структуры, образующиеся на поверхности никелевых и титановых мишеней под воздействием излучения Yb:YAG-лазера с длиной волны 1030 нм, частотой 50 кГц и длительностью 40 фс.

В зависимости от условий эксперимента (свойств материала, параметров импульса, параметров сканирующей головки) лазерный поток абляционных импульсов может быть оптимизирован. В эксперименте использовались различные скорости сканирования, а поверхность образца анализировалась с помощью электронного микроскопа SEM. В результате была найдена оптимальная скорость формирования на поверхности образца регулярного LIPSS, состоящего из кратеров. На рис. 12. показаны SEM-изображения модифицированных поверхностей при скоростях сканирования лазерных импульсов 50 и 500 мм/с. При низкой скорости сканирования на поверхности Ni появлялись нано- и микро размерные периодические структуры, образующие НПЧ с периодичностью $1,0 \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ (рис. 12а). В то же время мы наблюдали образование ВПЧ при низких скоростях сканирования (рис. 12(б)). Конусообразные наноструктуры наблюдались на поверхности Ti при скорости сканирования абляционных импульсов ниже 50 мм/с (рис. 12(с)). Диаметр конусообразных наноструктур составил от 500 до 1000 нм, а высота — до 500 нм. Конусообразные наноструктуры хаотично ориентированы в направлении поляризации лазерного луча. Иллюстрация дифракции света на поверхностях, модифицированных обычными LIPSS, представлена на рис.12(е). Поверхность образцов освещена белым светом.

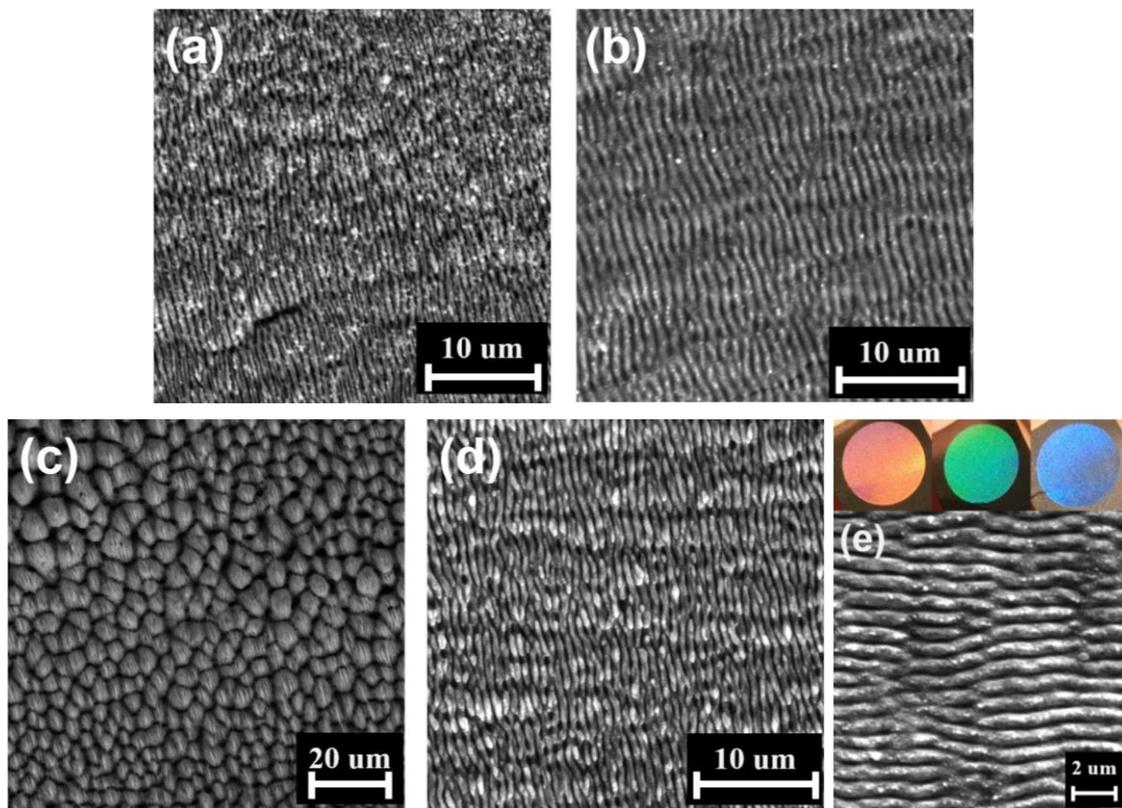


Рис. 12. SEM-изображения абляционных поверхностей мишеней при различной скорости сканирования абляционных импульсов.

SEM-изображения поверхности никеля при скорости сканирования 50 мм/с (а) и 500 мм/с (б). SEM-изображения соответствуют модифицированному образцу титана со скоростью сканирования 50 мм/с (с) и 500 мм/с (д). (е) Оптические изображения рассеянного света при освещении поверхности LIPSS источником белого света и SEM-изображение LIPSS с разрешением 2μм.

Обычно при формировании LIPSS с периодичностью $\Lambda_{\text{НПЧ}} \approx 1,0 \pm 0,1 \mu\text{м}$ углы дифракции могут изменяться от 10° до 40° относительно нормали к поверхности образца. В случае ВПЧ и наноразмерных конических структур на поверхности образцов, наблюдались постоянные темные цвета.

Спектры оптического излучения плазмы, генерируемой на поверхности Ni-мишени при различных скоростях сканирования абляционных лазерных импульсов, показаны на рис. 13. Зависимость между плотностью электронов и скоростью сканирования абляционных импульсов представлена на рис. 13(a). В результате сравнения было выявлено увеличение линий спектра оптического излучения (СОИ) плазмы и фона при высоких скоростях сканирования (см.рис.13(a)). Фоновый сигнал СОИ плазмы включает в себя излучение свободных электронов, возбужденных из непрерывных состояний. Отдельные линии ионных переходов были проанализированы для расчета параметров плазмы. Линии излучения плазмы, формируемой на поверхности Ni, были определены с использованием базы данных NIST. Из этой базы данных мы получили, что линия Ni при 361,9 нм соответствует однозарядным ионам Ni (рис. 13(b) и 13(c)). Поскольку плазма Ni состоит из однозарядных ионов, перекрытия спектральных линий мы не наблюдали.

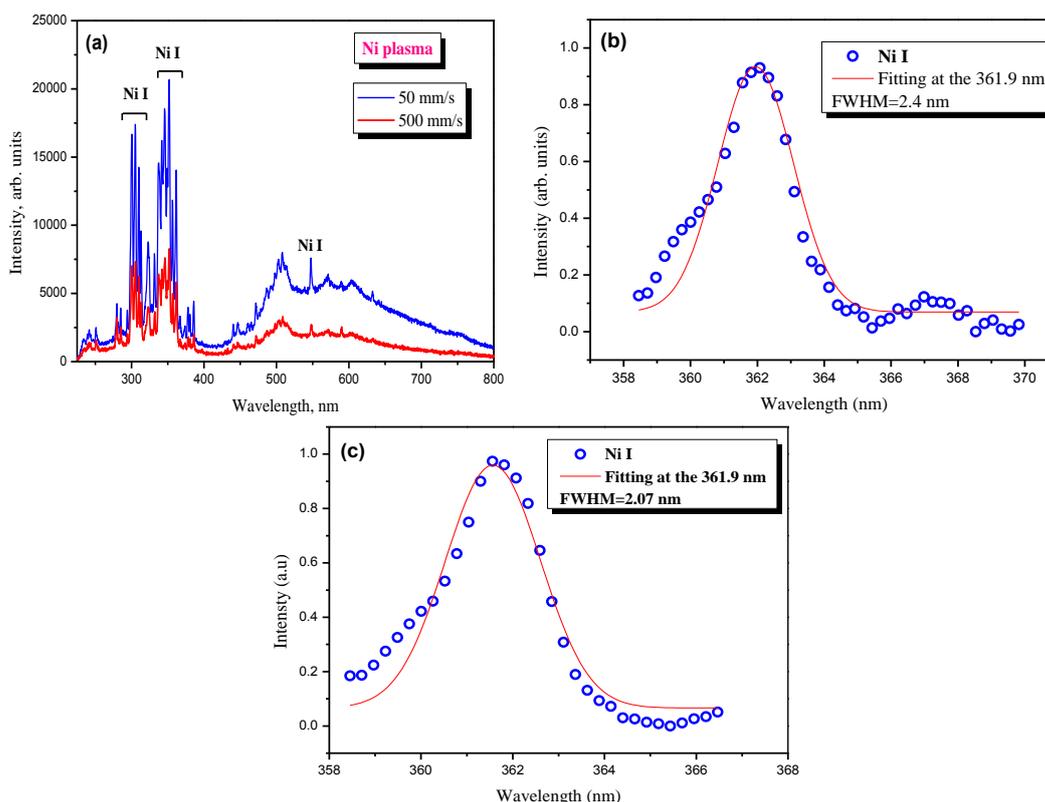


Рис. 13. Спектры излучения плазмы, генерируемой на поверхности Ni-мишени при различных скоростях сканирования абляционных лазерных импульсов:

(а) Спектр оптического излучения плазмы, генерируемой под воздействием импульсного лазерного излучения с длиной волны 1030 нм, частотой 50 кГц и длительностью 40 фс на мишень из никеля (Ni); Спектры записывались при скорости сканирования 50 мм/с (б) и 500 мм/с (с) в процессе формирования LIPSS и конических структур на поверхности Ni-мишени. Профиль линии перехода иона Ni I при 361,9 нм был уширен для измерения электронной плотности методом Штарка.

В то же время наблюдалась взаимосвязь между спектральными линиями Ti-плазмы. Плазма Ti состоит из эмиссии одно-, двух- и трехзарядных ионов. Перекрывание двух линий в плазме Ti основано на ближайшем прохождении двух- и трехзарядных ионов Ti. Электронная плотность была определена методом уширения Штарка. Этот метод основан на уширении спектральных линий в плазме, вызванного столкновениями заряженных частиц. Путем аппроксимации спектральных линий с функцией Лоренца была найдена ширина на полувысоте, которая использовалась для дальнейшего расчета электронной плотности в плазменных дугах, генерируемых при формировании различных форм LIPSS.

Электронная температура была рассчитана с использованием метода, основанного на зависимости плотности мощности лазерного излучения от атомной массы образца и числа зарядов ионов. В данном случае максимальная плотность мощности излучения фс-секундного импульсного лазера была равна $2,0 \times 10^{13}$ Вт см⁻². В случае образца Ni температура рассчитывалась как $Z=1$ для однозарядных ионов. Температура образца Ti была рассчитана как $Z=2$ для двухзарядных ионов. С целью количественного расчета электронной плотности и температуры при формировании наноразмерных структур на поверхности Ti была получена эмиссия плазмы. Уменьшение фонового сигнала из спектров СОИ плазмы можно объяснить уменьшением концентрации возбужденных свободных электронов, что играет важную роль в формировании наноразмерных конических структур на поверхности Ti при меньшей скорости сканирования абляционным лазером (рис. 14 (a)).

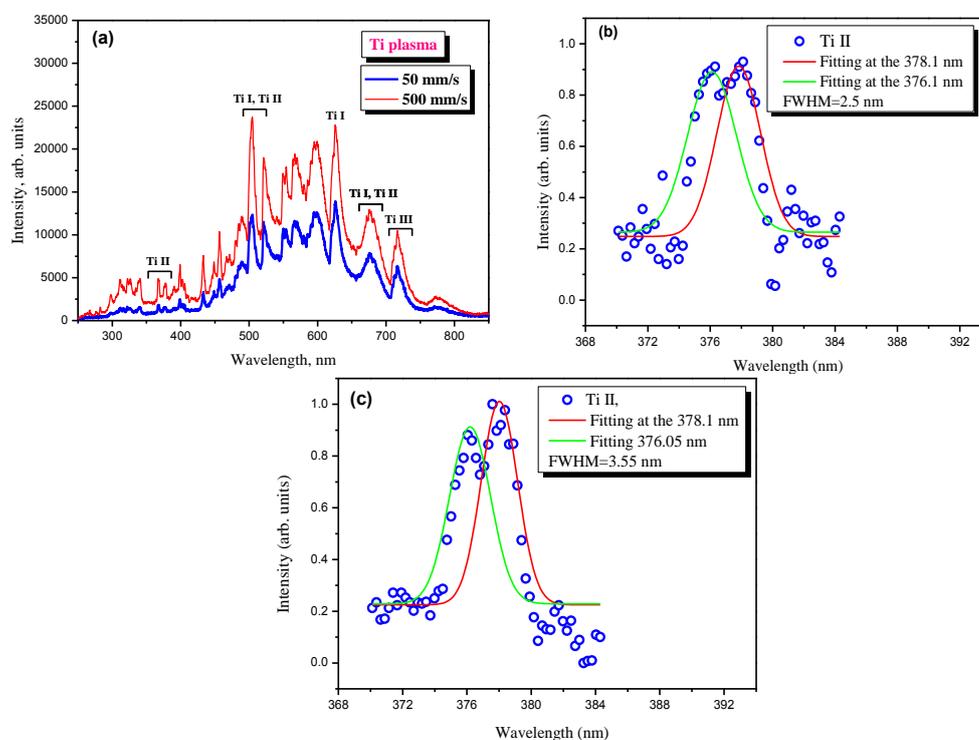


Рис. 14. Спектры излучения плазмы, генерируемой на поверхности Ti-мишени при различных скоростях сканирования абляционных лазерных импульсов:
 (a) Спектр излучения плазмы, генерируемой под воздействием лазерного излучения с

длиной волны 1030 нм, 50 кГц и 40 фс на титановую мишень. Спектры записывались в процессе формирования LIPSS-структур на поверхности Ti-мишени при скорости сканирования 50 мм/с (б) и 500 мм/с (с). Профиль линии перехода иона Ti II при 376,1 нм был уширен для измерения электронной плотности методом Штарка.

На рисунках 14 (б) и 14 (в) спектральные линии при 378,1 нм соответствуют двухзарядным ионам Ti. Полученные спектральные линии позволили оценить ширину спектральной линии на половине максимума (FWHM) иона Ti II. Уширение спектра индуцированной плазмы на поверхности Ti обусловлено одновременным возбуждением двух- и трехзарядных ионов Ti. Из-за сильного перекрытия спектральных линий на длинах волн 376,1 нм и 378,1 нм, были построены обе спектральные линии. Из табличных данных был использован параметр электронного действия для иона Ti II на длине волны 376,1 нм. В таблице 6 представлены расчетные значения электронной плотности и температуры для ионов Ni I и Ti II.

Наблюдаемая форма LIPSS и появление наноразмерных конических структур на поверхности Ti связаны с плотностью электронов в индуцированных плазменных дугах, генерируемых при абляции Ti-мишени. Взаимосвязь между параметрами плазмы и морфологией абляционной поверхности можно наблюдать, изменяя скорость сканирования абляционных импульсов.

Таблица 6

Параметры СОИ, полученные при формировании структур LIPSS на поверхности образцов Ni и Ti

Элементы	Скорость сканирования (мм/с)	λ (нм)	E (эВ)	W (Å)	$\Delta\lambda$ (нм)	$n_e(10^{18})$ см ⁻³	$T_e 10^7$ (К)
Ni(I)	50	361 926	3,59	0,170	2.4	0,7	2.4
	500				2.07	0,6	
Ti(II)	50	376,1	2,60	0,247	2,55	1,88	4.6
	500				3,55	2,55	

Взаимосвязь параметров плазмы, скорости сканирования и периодичности LIPSS-структур может возникнуть и в результате увеличения количества импульсов. Частота плазмонной волны меняется в зависимости от плотности электронов $\omega_p(n_e) = \sqrt{n_e e^2 / \epsilon_0 m^*}$ (где ω_p – частота плазмона, n_e – плотность электрона, e - заряд электрона, ϵ_0 -электрическая постоянная, m^* -масса электрона. Частота плазмы, генерируемой на поверхности, для материалов с определенной проводимостью зависит от изменения плотности несущих заряд свободных электронов. Таким образом, управляя плазмонной частотой, можно контролировать длину волны поверхностного плазмонного поляритона (ППП), связанную с периодичностью LIPSS. Периодичность LIPSS можно изменять, регулируя длину волны ППП и угол падения лазерного излучения. Длину волны ППП можно оценить, анализируя плотность возбужденных свободных электронов в области плазмы, образующейся на поверхности материалов. Появление наноразмерных

конических структур на поверхности Ti также может быть связано с уменьшением электронной плотности плазменных дуг при абляции. Изменяя скорость сканирования, можно легко контролировать количество импульсов на поверхности мишени. Исследование аналитических свойств лазерной абляции с помощью фемтосекундного лазера и сравнение режимов фс и нс абляции с использованием оптико-эмиссионной спектроскопии является методом анализа свойств композиционных материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе проведенных исследований получены следующие наиболее важные результаты:

1. Лазерная плазма, созданная на поверхностях элементов алюминия и меди в твердом агрегатном состоянии и под воздействием излучения Nd:YAG-лазера с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 28 пс при нормальном атмосферном давлении была исследована методом лазерно-плазменной спектроскопии. Спектральные интенсивности плазмы, генерируемые лазерным сканированием поверхности образца со скоростями 50 мм/мин и 500 мм/мин, были различными и имели хорошее перекрытие на одной и той же длине волны. Основными параметрами плазмы, генерируемой при лазерном сканировании поверхностей алюминия и меди со скоростью 500 мм/мин, являются плотность свободных электронов (Al $n_e \approx 1,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, Cu $n_e \approx 3,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) и были определены температуры возбужденных свободных электронов в плазме (Al $T_e=1,56 \text{ эВ}$, Cu $T_e=1,42 \text{ эВ}$).

2. В нормальных атмосферных условиях элементы индия (In) и кремния (Si) в твердом агрегатном состоянии были облучены Nd:YAG-лазером с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 10 нс и проанализированы полученные эмиссионные спектры плазмы. Определена плотность возбужденных свободных электронов в плазме, образующейся на поверхности индия и кремния (In $n_e \approx 3,7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, Si $n_e \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$), а также температура электронов (In $T_e=3,05 \text{ эВ}$, Si $T_e=0,8 \text{ эВ}$).

3. Структуры НПЧ, ВПЧ и конусообразное наноструктуры формировались на поверхности мишеней Ni и Ti путем воздействия излучения Yb:YAG-лазера с длиной волны 1030 нм и длительностью импульса 40 фс при различных скоростях сканирования лазера. Путем анализа спектров оптического излучения образцов были рассчитаны параметры плазмы, генерируемой на поверхности образцов, которые показали, параметры плазмы могут быть связаны с природой LIPSS-структур, образующихся на поверхности образцов.

4. Были оценены параметры плазмы, генерируемой для простых LIPSS и наноразмерных конических структур на поверхности титановой мишени. При

относительно низкой концентрации свободных электронов в плазме Ti-мишени наблюдалось образование наноразмерных конических структур.

5. Увеличение концентрации свободных электронов при низкой скорости сканирования абляционного лазерного импульса приводило к образованию ВПЧ с периодичностью $\Lambda_{\text{ВПЧ}} \approx 0,5 \pm 0,1$ мкм на поверхности Ni. Полученные результаты объясняют управление структурами LIPSS и открывают возможности для функциональности и новых применений структурированных материалов с использованием ультрабыстрых лазеров.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFIC DEGREES
PhD.03/29.12.2022.FM.55.07 OF URGENCH STATE UNIVERSITY**

URGENCH STATE UNIVERSITY

VAPAYEV MURODBEK ERGASHOVICH

**INFLUENCE OF LASER PLASMA PARAMETERS ON THE
FORMATION OF NANOSCALE STRUCTURES ON METAL SURFACES**

01.04.11– Laser physics

ABSTRACT

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

Urgench – 2024

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 B2022.3.PhD/FM772.

The dissertation has been prepared at the Urgench State University.

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: **Davletov Ikram Yusubovich,**
doctor of physical and mathematical sciences, professor

Official opponents: **Azamatov Zakir Tahirovich,**
doctor of physical and mathematical sciences, professor

Matnazarov Anvar Rustamovich,
candidate of physical and mathematical sciences, dotsent

Leading organization: **Tashkent state technical university**

The defense will take place on « 01 » June 2024 at 10⁰⁰ at the meeting of the Scientific Council number Ph.D.03/29.12.2022.FM.55.07 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 № 416) (Address: 14 Kh. Olimjan str., Urgench city, 220100, Uzbekistan, Ph.: (99862) 224-66-11, fax: (99862)224-67-00).

Abstract of dissertation sent out on « 10 » May 2024 year
(Mailing report № 4 on « 10 » May 2024 year)



Sh.D. Payziyev,

Acting chairman of the scientific council for the award of scientific degree, Doctor of physical and mathematical sciences, professor

M.K. Kurbanov,

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

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The purpose of the research work is to determine the main parameters of the plasma formed on the surface of metals under the influence of nano- and picosecond pulsed laser radiation by various methods, as well as to study the influence of the speed of femtosecond pulsed laser scanning and plasma parameters on the formation of nano-sized structures on the surface of metals.

The object of the research work was to study the influence of laser plasma parameters on the formation of nano-sized structures on the surface of metals.

The Scientific novelty of the research is as follows:

through an analysis of plasma spectra on Si and In surfaces under normal atmospheric conditions, induced by pulsed radiation from a Nd:YAG laser with a duration of 10 ns and a wavelength of 1064 nm, essential plasma parameters were identified. Specifically, the electron density was quantified using the Stark broadening method, while temperature was determined employing the Boltzmann distribution method;

as a result of analyzing the spectra of the plasma formed on the surface of Al and Cu elements when scanning at a speed of 50-500 mm/min with laser radiation with a pulse of 28 ps and a wavelength of 1064 nm, the electron density and temperature were determined taking into account the overlap of spectral lines in the Al and Cu plasmas formed via scanning at speed of 50-500 mm/min;

for the first time, the Stark broadening coefficients for high-charge ion transitions of the element niobium (Nb IV) were determined from the spectral distribution of plasma generated by a 28 ps pulsed laser on the surface of a niobium alloy in a solid state of aggregation;

this study revealed a correlation between laser plasma parameters and the characteristics of periodic nanostructures formed on titanium and nickel surfaces. Yb:YAG laser radiation with a pulse duration of 40 fs and a wavelength of 1030 nm was used to create these nanostructures with varying periodicities and shapes. Analysis of the samples' optical emission spectra enabled the determination of the corresponding plasma parameters;

a correlation is identified between the scanning speed of the femtosecond laser, the parameters of the resulting laser-induced plasma on titanium and nickel surfaces, and the dimensions of the formed nanostructures. Furthermore, we observed a change in the shape of these nanostructures with increasing free electron concentration in the plasma, suggesting a possible influence of modulated plasmonic frequencies.

Implementation of research results. Using obtained scientific results on the influence of laser plasma parameters on the formation of nano-sized structures on the surface of metals:

the results of the influence of parameters - electron density and temperature of the plasma formed on the surface of metals under the influence of laser radiation and the developed calculation algorithms were used in processing of metals and complex structural materials with a laser device at JSC Urganchkormmash. As a

result, a significant improvement in processing of metals was achieved and an increase in the quality of the final product was achieved;

emission spectra of plasma produced on metal surfaces, including Stark broadening coefficients determined for the spectral lines of Nb(IV) niobium plasma, were used in research project 451-03-68/2020-14/200002 of the Astronomical Observatory of Belgrade, Serbia. As a result, it was used to explain the relationship between the parameters of the plasma formed during the formation of nanoscale structures on the surface of metals and the size of the period;

important information about the main processes associated with the formation of nanostructures on the surface of metals was used in a scientific project of the Research Center of the University of Latvia. As a result, it was possible to determine and evaluate the parameters of the plasma formed under the influence of laser radiation.

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 94 pages.

E'LON QILINGANISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (Част I, Part I)

1. G. S. Boltaev, M. Iqbal, S. R. Kamalov, M. Vapaev, I. Y. Davletov, A. S. Alnaser. Impact of plasma conditions on the shape of femtosecond laser-induced surface structures of Ti and Ni // Applied Physics A, vol. 128, №6, p. 488, Jun. 2022, doi: 10.1007/s00339-022-05614-w. (01.00.00, №3, IF=2.201).

2. M.E. Vapayev, I. Y. Davletov, G. S. Boltaev. Determination of parameters of the laser-induced silicon plasma by laser-induced breakdown spectroscopy// Uzbek Journal of Physics, vol. 25, №1, pp. 55-61, Apr. 2023, DOI: <https://doi.org/10.52304/v25i1.406> (01.00.00, № 5).

3. M.E. Vapayev, B. R. Sobirov, S. R. Kamalov, I. Y. Davletov, G. S. Boltaev. Lazer nurlanishi ta'sirida mis sirtida hosil qilingan plazmasining optik xususiyati // SamDU ILMIIY AXBOROTNOMA, № 2, pp. 119–124, 2022. DOI: <https://doi.org/10.59251/2181-1296.v3.1331.692> (01.00.00, № 2).

4. M.E. Vapayev, B. R. Sobirov, I. Y. Davletov, G. S. Boltaev. Pikosekund impulsli lazer nurlanishi ta'sirida aluminiy sirtida hosil bo'lgan plazmaning optik ususiyatlari // ILM SARCHASHMALARI ilmiy-nazariy, metodologik jurnal., № 10, pp. 6–11, 2022. (01.00.00, № 12).

II bo'lim (Част II; Part II)

5. M.E. Vapayev, S. B. Reyimboyev, B. R. Sobirov, I. Y. Davletov, S. R. Kamalov, G. S. Boltaev. Study of plasma states of metals under the influence of laser light using LIBS spectroscopy// Eighth International Conference on Physical Electronics IPEC-8, Tashkent, Uzbekistan, 23th-24th september-2021, pp. 207–208.

6. M.E. Vapayev, B. R. Sobirov, F. M. Tojinazarov, I. Y. Davletov, G. S. Boltaev. Effect of plasma on the formation of a laser-induced Periodic surface structures // INTERNATIONAL FORUM “PHYSICS – 2022”, Namangan, Uzbekistan, 4th-5th octamber-2022, pp. 133–134.

7. M.E. Vapayev, B. R. Sobirov, F. M. Tojinazarov, I. Y. Davletov, G. S. Boltaev. Lazer nurlanishi ta'sirida niobiy sirtida nano o'lchamli strukturalar shakillantirish // International scientific conference of young scientists “Science and innovation-2022,” Tashkent, Uzbekistan, octamber-2022, pp. 318–319.

8. M. S. Dimitrijevič, M. E. Vapayev, B. R. Sobirov, I. Y. Davletov, G. S. Boltaev. Modifikatsiyalangan yarim empirik usul yordamida niobiy (Nb IV) plazma spektral o'tish chiziqlari uchun Shtark kengayish koeffitsiyentini hisoblash // “Hozirgi zamon fizikasining dolzarb muammolari”. Xalqaro ilmiy va ilmiy-texnik anjuman, Buxoro, O'zbekiston, 25-noyabr, 2022, pp. 105–107.

9. М. Э. Вапаев, Ш. Б. Рейимбоев, Б. Р. Сабиров, Ш. Р. Камолов, Г. С. Болтаев, И. Ю. Давлетов. Лазер нури таъсирида олинган мис плазмаси спектридан электрон зичлиги ва плазма хароратини аниқлаш // «Физика

фанининг ривожда истеъдодли ёшларнинг ўрни» Республика илмий анжумани. РИАК-ХІV-2021, Ташкент, 26- март, 2021, pp. 164–167.

10. М.Э. Вапаев, Ш. Рейимбоев, Б. Р. Сабилов, Ш. Р. Камолов, Г. С. Болтаев, И. Ю. Давлетов. Лазер нури таъсирида (In) моддаси сиртида ҳосил қилинган плазманинг спектрал таҳлили // Ёш олимлар ва физик талабаларнинг I республика илмий анжумани (ЁОФТРИА-I), Ташкент, 21-апрель, 2021, pp. 155–157.

11. М.Е. Vapayev, I.Y. Davletov, G.S. Boltaev. Lazer nuri ta'sirida Cu, In, Si, Sn sirtida hosil qilingan plazmani libs spektroskopiyasi yordamida tadqiq qilish// «Fizika fanining rivojida iste'dodli yoshlarning o'rni» Resp. ilmiy anjumani. RIAK-XV-2022, Toshkent, 22-23 aprel, 2022, pp. 33–36.

12. М.Е. Vapayev, I.Y. Davletov, G. S. Boltaev. Study of plasma, formed on the surface of silicon under the influence of laser radiation using LIBS spectroscopy// Ёш олимлар ва физик талабаларнинг II республика илмий анжумани (ЁОФТРИА-II), Ташкент, 20- 21 май, 2022, pp. 125–128.

13. М.Е. Vapayev, B.R. Sobirov, I.Y. Davletov, G.S. Boltaev, R.M. Bedilov. Lazer nurlanishi ta'sirida aluminiy sirtida hosil qilingan plazmaning optik hususiyatlari// “Fotonika muammolari va rivojlanish istiqbollari” Respublika ilmiy-amaliy anjumani, Urganch, 27-28 may, 2022, pp. 106–110.

14. М.Е. Vapayev, B.R. Sobirov, I.Y. Davletov, G.S. Boltaev. Metallar sirtida nano o'lchamli strukturalar shakllanishiga lazer plazma parametrlarinining ta'sirini tadqiq qiluvchi tajribaviy qurilmalar tavsifi// “Yarimo'tkazgichlar, nanomateriallar va fotoenergetikaning dolzarb muammolari” Respublika ilmiy-amaliy anjumani, Urganch, 9-dekabr, 2022, pp. 193–195.

15. М.Е. Vapayev, B.R. Sobirov, I.Y. Davletov, G.S. Boltaev. Oil-water separation: the latest developments in femtosecond laser-induced periodic surface nano structuring// 3rd International conference on water management and its surroundings-theoretical and practical aspects, 17th – 18th may, 2023 OLSZTYN, Poland, p. 125.

16. М.Е. Vapayev, B.R. Sobirov, A.I. Japaqov, I.Y. Davletov, G.S. Boltaev. Niobiy sirtida nano o'lchamli struktura shakllantirishga plazma parametrlari ta'sirini tadqiq qilish// «Fizika fanining rivojida iste'dodli yoshlarning o'rni» Respublika ilmiy anjumani. RIAK-XVI-2023, Toshkent, 28-aprel 2023, pp. 105–108.

17. М.Е. Vapayev, B.R. Sobirov, I.Y. Davletov, G.S. Boltaev. Lazer nurlanishi ta'sirida nikel sirtida hosil qilingan plazmaning elektron zichligini tadqiq qilish// International scientific conference of young scientists “Science and innovation-2023,” Toshkent, 2023, pp. 202-204.

Avtoreferat «Ilm sarchashmalari» jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazilib, o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlar o‘zaro muvofiqlashtirildi.

Bosmaxona litsenziyasi:



9338

Bichimi: 84x60^{1/16}. «Times New Roman» garniturasida.
Raqamli bosma usulda bosildi.
Shartli bosma tabag‘i: 3. Adadi 100 dona. Buyurtma № 28/24.

Guvohnoma № 851684.
«Tipograff» MCHJ bosmaxonasida chop etilgan.
Bosmaxona manzili: 100011, Toshkent sh., Beruniy ko‘chasi, 83-uy.