

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

YADRO FIZIKASI INSTITUTI

YULDASHOVA IRODAXON IKROMOVNA

**ELEKTRONLAR BILAN NURLANTIRILGAN UGLEROD
NANONAYCHALAR VA UGLEROD TARKIBLI (ZrTi)CN, (TiHfTa)CN
NANOQOPLAMALAR STRUKTURASI VA NANOKRISTALLITLAR
O'LCHAMLARI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

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

Toshkent – 2023

UDK 538.911: 669.018.95: 54.062: 549.086: 539.1.043

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

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

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

Yuldashova Irodaxon Ikromovna

Elektronlar bilan nurlantirilgan uglerod nanonaychalar va uglerod tarkibli (ZrTi)CN, (TiHfTa)CN nanoqoplamalar strukturasi va nanokristallitlar o'lchamlari.....3

Юлдашова Иродахон Икромовна

Структура и размеры нанокристаллитов углеродных нанотрубок и углеродосодержащих (ZrTi)CN, (TiHfTa)CN нанопокровий, облученных электронами.....23

Yuldashova Irodakhon Ikromovna

Structure and sizes of nanocrystallites of carbon nanotubes and carbon-based (ZrTi)CN, (TiHfTa)CN nanocoatings, irradiated by electrons.....43

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works.....48

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

YADRO FIZIKASI INSTITUTI

YULDASHOVA IRODAHON IKROMOVNA

**ELEKTRONLAR BILAN NURLANTIRILGAN UGLEROD
NANONAYCHALAR VA UGLEROD TARKIBLI (ZrTi)CN, (TiHfTa)CN
NANOQOPLAMALAR STRUKTURASI VA NANOKRISTALLITLAR
O'LCHAMLARI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

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

Toshkent – 2023

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2022.4.PhD/FM546 raqami bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi institutida bajarilgan.
Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, ingliz, rus (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasi (www.inp.uz) va "Ziyonet" axborot-ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar: **Tashmetov Mannab Yusupovich**
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponenlar: **Nuriddinov Izzatillo**
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Tashmuxamedova Dilnoza Artikbayevna
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot: **Farg'ona davlat universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Yadro fizikasi instituti huzuridagi DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 raqamli Ilmiy kengashning 2023-yil _____ soat _____ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100174, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, Yadro fizikasi instituti. Tel. (+99871) 289-31-41; faks: (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

Dissertatsiya bilan Yadro fizikasi institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (_____raqami bilan ro'yxatga olingan) (Manzil: 100214, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, YaFI. Tel. (+99871) 289-31-19).

Dissertatsiya avtoreferati 2023-yil " " _____ kuni tarqatildi.
(2023-yil " " _____ dagi _____ raqamli reyestr bayonnomasi)

I.I.Sadikov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash raisi o'rinbosari t.f.d., professor

O.R.Tojiboyev
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash ilmiy kotibi f.-m.f.b. PhD
katta ilmiy xodim

E.M. Tursunov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash huzuridagi ilmiy seminar raisi
f.-m.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Hozirgi kunda zamonaviy nanotexnologiyalar sohasida nitridli, karbidli va karbonitridli ko‘p komponentli nanokompozit qoplamalar, shuningdek, bir va ko‘p devorli uglerodli nanonaychalar yuqori haroratga chidamliligi, qattiqligi, yeyilishga qarshiligi, o‘tkazuvchanligi va oksidlanishga chidamliligi tufayli aviatsiya va kosmik sanoatda, integral va funktsional mikro va nanoelektronikada, kompyuter texnologiyalarida va tibbiyotda himoya qoplamasi sifatida ishlatiladi.

Bugungi kunda jahonda issiqlikka chidamli, o‘tga chidamli metallardan (Zr, Ti, Hf, Ta, W, V, Nb) tayyorlangan ko‘p komponentli uglerodli nanoqoplamalar, bir va ko‘p devorli uglerodli nanonaychalarning turli xossalari va qonuniyatlarini o‘rganish bo‘yicha jadal izlanishlar olib borilmoqda. Radiatsiya ta‘siri natijasida yuzaga keladigan fizikaviy jarayonlar, qonuniyatlar va strukturaviy o‘zgarishlarni o‘rganish ularning xossalari va xususiyatlarini nazorat qilish imkonini beradi. Avvalgi tadqiqotlarda uglerod tarkibli nanoqoplamalar va nanonaychalarning strukturaviy parametrlari faqat past energiyali nurlanish (~1 MeV) sharoitida o‘rganilgan. Yuqori energiyalar (2 MeV) bilan nurlantirishda yuzaga keladigan fizik jarayonlarning mumkin bo‘lgan farqlari tufayli, uglerod tarkibli nanoqoplamalar va nanonaychalardagi sirt tuzilishi, nanokristallitlarning o‘lchamlari, dislokatsiyalar va atomlar orasidagi bog‘lanishlarni o‘rganish kondensirlangan holatlar fizikasining (nanotexnologiya sohasida) dolzarb muammolaridandir.

Mamlakatimizda kondensirlangan holatlar fizikasi va materialshunoslik yo‘nalishidagi nazariy va amaliy ishlarga, xususan, radiatsiya, eroziya va korroziyaga chidamli uglerod tarkibli nanoqoplamalar hamda uglerod nanonaychalardagi radiatsiya jarayonlarini, turli flyuenslardagi elektronlarning ta‘sir qilish qonuniyatlarini o‘rganishga katta e‘tibor qaratilmoqda. Mamlakatimizda ilm-fan rivoji va uni amaliyotda keng qo‘llashda muhim ahamiyatga ega bo‘lgan mazkur fundamental tadqiqotlarning yo‘nalishlari 2022–2026-yillarda yangi O‘zbekistonni rivojlantirish strategiyasida¹ aks ettirilgan.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi “2022–2026-yillarda Yangi O‘zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to‘g‘risida”gi PF–60-son Farmoni, O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2018-yil 27-apreldagi “Innovatsion g‘oyalar, texnologiyalar va loyihalarni amaliyotga tatbiq etish tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PQ–3682-son, 2018-yil 7-maydagi “Iqtisodiyot tarmoqlari va sohalariga innovatsiyalarni joriy etish mexanizmlarini takomillashtirish bo‘yicha qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi PQ–3698-son qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa normativ-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya muayyan darajada xizmat qiladi.

¹O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi “2022–2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida”gi PF–60-son Farmoni.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining asosiy ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot respublikada fan va texnologiyalar rivojlanishining IV “Kimyo texnologiyalari va nanotexnologiyalar” ustuvor yo‘nalishi doirasida bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Ko‘p komponentli uglerodli nanoqoplamalar, bir va ko‘p devorli uglerodli nanonaychalarning turli xossalari va qonuniyatlarini o‘rganish bo‘yicha tadqiqotlar jahon ilmiy markazlarining yetakchi olimlari, jumladan, rossiyalik (D.Moskovskikh, R.A.Andriyevskiy), ukrainalik (A.D.Pogrebnyak, A.P.Shpak, N.A.Azarenkov, V.M.Beresnev), xitoylik (B.Li, Y.Feng, K.W.Ding, G.Qian, X.B.Zhang, Y.J.Qun, L.X.Ji, L.Ch.Ming), germaniyalik (H.Holleck, C.Thomsen, J.Maultzsh, H.Telg.), amerikalik (G.Dresselhaus, D.Kaoumi, S.S.Tiffany, S.Reich, N.Hiremath, G.Bhat,J.Mays), braziliyalik (M.C.Evora, A.Jorio), avstraliyalik (K.McDonell, G.Proust, L.Shen), yaponiyalik (S.Suzuki), koreyalik (J.Park, S.J.Shin, M.J.Seong), hindistonlik (R.Purohit, K.Purohit, S.Rana, V.Patel), finlandiyalik (A.V.Krashennikov, K.Nordlund), o‘zbekistonlik (E.Karimov, V.T.Em, I.Xidirov, M.Yu.Tashmetov) va boshqa mutaxassislar tomonidan o‘tkazilgan.

Ular tomonidan Ti, Zr, Hf, V, Ta qattiq birikmalardan iborat nanoqoplamalar va uglerodli nanonaychalarning fizik-mexanik xossalarini nazariy hamda tajribaviy tadqiq qilishda katta hajmdagi ishlar amalga oshirildi; TiN_x , TiC_x va ko‘p komponentli qotishmalarning tuzilishi va strukturaviy o‘zgarishlari aniqlandi; gamma nurlari, protonlar, ionlar, neytronlar va kam energiyali elektronlarning Ti, Hf, Zr, Ta karbonitridli nanoqoplamalarga va uglerod nanonaychalarga ta‘siri o‘rganildi.

Shu bilan birga, hozirgi vaqtgacha ko‘p komponentli uglerodli nanoqoplamalar, bir va ko‘p devorli uglerodli nanonaychalar tuzilishiga, ularning sirt morfologiyasiga, mikrozo‘riqishga, atom tebranishlariga, nanonaycha diametri va kristall o‘lchamlariga turli fluensdagi yuqori energiyali elektronlarning ta‘siri o‘rganilmagan. Bunday tadqiqotlar nanoqoplamalar va uglerodli nanonaychalar xossalarining elektron flyuensiga funksional bog‘liqligi haqida batafsil ma‘lumot beradi.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan ilmiy tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya ishi Yadro fizikasi instituti ilmiy tadqiqot ishlari rejasining OT-F2-20 “Legirlangan kremniyda radiatsiya ta‘sirida yuz beradigan kichik o‘lchamli struktura o‘zgarishlari va ularning monokristall xossalariga ta‘siri” (2017-2020) mavzusidagi loyiha, O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019-yil 21-noyabrdagi PQ-4526-sonli qarori asosida 2020-2024-yillarga mo‘ljallangan ilmiy tadqiqot ishlari dasturi yuzasidan “Legirlangan monokristalik kremniy yadro transmutatsiyasida radiatsion-stimullangan jarayonlar” (2020-2023) mavzulari doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi turli flyuensli elektronlarning nanonaychalar va uglerod tarkibli ko‘p komponentli nanoqoplamalar strukturalariga hamda nanokristallitlar o‘lchamlariga ta‘sirining qonuniyatlarini aniqlashdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

bir va ko'p devorli uglerodli nanonaychalar strukturasi va hamda spektroskopiyasiga 2 MeV energiyali turli flyuensdagi elektronlar ta'sirini o'rganish;

bir va ko'p devorli uglerodli nanonaychalarga turli flyuensdagi elektronlar ta'sir etganda nuqsonlar hamda nanokristallitlar holatlarini aniqlash;

(ZrTi)CN nanoqoplama morfologiyasi va strukturasi 2 MeV energiyali turli flyuensdagi elektronlar ta'sirini o'rganish;

turli flyuensdagi elektronlarning ta'siri natijasida (ZrTi)CN nanoqoplama dislokatsiya zichligi va nanokristallitlaridagi o'zgarishlarni tahlil qilish;

2 MeV energiyali turli flyuensdagi elektronlarning (TiHfTa)CN nanoqoplama morfologiyasi va strukturasi ta'sirini tadqiq etish;

(TiHfTa)CN nanoqoplama dislokatsiya zichligi va nanokristallitlarga turli flyuensdagi elektronlar ta'sirini o'rganish.

Tadqiqotning ob'yekti sifatida bir devorli, ko'p devorli uglerodli nanonaychalar, uglerod tarkibli (ZrTi)CN va (TiHfTa)CN nanoqoplamalar olingan.

Tadqiqotning predmeti bir va ko'p devorli uglerodli nanonaychalar, uglerod tarkibli (ZrTi)CN va (TiHfTa)CN nanoqoplamalar strukturasi va nanokristallitlar o'lchamiga turli flyuensli tez elektronlar ta'siridan iborat.

Tadqiqotning usullari: rentgen nurlari difraksiyasi usuli, Ritveld usuli, Raman spektroskopiyasi, atom kuch mikroskopi hamda skaynerlovchi elektron mikroskopi usullari.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

bir devorli uglerodli nanonaychalar ikki fazali (faz.gr. $P6/mmm$ va $P6_3/mc$), ko'p devorli uglerodli nanonaychalar esa bir fazali geksagonal strukturali (faz.gr. $P6_3/mc$) bo'lib, bu fazalarning strukturasi mos ravishda $1,54 \times 10^{17}$ el/sm² va $5,1 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensga qadar saqlanishi aniqlangan;

birinchi marta bir devorli uglerodli nanonaychalar Raman spektrida $1,54 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensda nurlantirish ta'sirida nuqtaviy nuqsonlarning yuzaga kelishi bilan bog'liq bo'lgan yangi cho'qqi (805 sm^{-1}) paydo bo'lishi, ko'p devorli uglerodli nanonaychalarda esa amorf gidrogenlangan uglerodga tegishli D' (1612 sm^{-1}) cho'qqi $5,1 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensda nurlantirilganda intensivlikning kamayishi bilan past chastotalar (1601 sm^{-1}) tomon siljishi aniqlangan;

birinchi marta $2,3 \times 10^{17}$ el/sm² flyuens bilan nurlantirilgan (ZrTi)CN nanoqoplamaning yuz notekisligi 2,2 marta kamayishi, (TiHfTa)CN $4,5 \times 10^{17}$ el/sm² flyuens bilan nurlantirilganda 13,2 marta oshishi dislokatsiyalarning sirt tomon vintsimon harakatlanishi natijasida yuzalarda sodir bo'lgan ikki o'lchamli o'zaksimon o'sish bilan bog'liq ekanligi aniqlangan;

birinchi marta ko'p devorli uglerodli nanonaychalar, (ZrTi)CN va (TiHfTa)CN nanoqoplamalar namunalarining $5,1 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensga qadar nurlantirilgan panjara parametrlari hamda nanokristallitlar o'lchamlari qiymatlarining flyuensga bog'liqligi eksponensial xarakterda ortib borishi, dislokatsiyalarning zichliklari esa kamayishi aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

bir devorli uglerodli nanonaychanning ikki strukturali ekanligi hamda 2 MeV elektronlar bilan $1,54 \times 10^{17}$ el/sm² fluensgacha nurlantirish a va b panjara parametrlarining 4% ga va nanokristallitlar hajmining 19% ga o'sishiga, mikrozo'riqishning esa kamayishiga olib kelishligi aniqlangan;

$1,54 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensda nurlantirishdan keyin bir devorli uglerodli nanonaycha diametrining qiymati 1,2% ga o'zgarishi va metal-yarimo'tkazgich o'tish yuz berishi aniqlangan;

ko'p devorli uglerodli nanonaychalarni elektronlar bilan $5,1 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensgacha nurlantirilganda namunaning panjara parametrlari nuqtaviy nuqsonlarning paydo bo'lishi bilan bog'liq holda (a va b - 4,5% ga, c - 4,8% ga) oshishi aniqlangan, panjara parametrlari va kristallit o'lchamlarining elektronlar flyuensiga bog'liqligi topilgan;

(ZrTi)CN namunasini 2 MeV energiyali elektronlar bilan $4,1 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensgacha nurlantirish uning panjara parametrlarini o'zgarishiga, $4,1 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensda nurlantirish esa trigonal strukturadan (faz.gr. $R\bar{3}m$) kubik strukturaga (faz.gr. $Fm\bar{3}m$) fazaviy o'tishga olib kelishi aniqlangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi bir-birini to'ldiruvchi fizikaviy experiment usullar majmuasidan foydalanish, zamonaviy yuqori aniqlikdagi uskunalar, rentgenogrammalarni hisoblash uchun zamonaviy "FullProf" to'liq profilli tahlil dasturi, natijalarning yaxshi takrorlanishi, ularning umumiy fizikaviy tushunchalar bilan muvofiqligi va adabiyot ma'lumotlari bilan mos kelishi asosida tasdiqlangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Natijalarining ilmiy ahamiyati yuqori energiyali elektronlarning nanonaychalar va nanoqoplamalar strukturasi va morfologiyasiga ta'siri qonuniyatlarini aniqlash, strukturaviy parametrlar bo'yicha olingan natijalar xalqaro kristallografiya ma'lumotlar bazasini to'ldiradi va kengaytiradi.

Natijalarning amaliy ahamiyati shundan iboratki, ular aerokosmik sanoatda, xususan, asbob-uskunalar radiatsiyaning zararli ta'siridan himoya qilish uchun himoya materiallari sifatida ishlatilishi mumkin, shuningdek, ularni ishlab chiqish uchun qattiq jismlar fizikasi va materialshunoslik sohasidagi qoplama texnologiyasida eksperimental ma'lumotlar bazasi bo'lib xizmat qiladi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Elektronlar bilan nurlantirilgan uglerod nanonaychalar va uglerod tarkibli nanoqoplamalarning strukturasi hamda nanokristallitlar o'lchamlarini aniqlashda olingan asosiy natijalar Qoraqalpoq davlat universitetida "Qattiq jismlar fizikasi" kursi bo'yicha bakalavriat hamda "Kondensirlangan holat fizikasi" maxsus kursi bo'yicha magistratura dasturi doirasida o'quv jarayonida foydalanilgan (Qoraqalpoq davlat universitetining 21.12.2022-yildagi 01-21-04/2878-sonli ma'lumotnomasi), xususan:

bir devorli uglerodli nanonaychalar ikki fazali, ko'p devorli uglerodli nanonaychalar esa bir fazali geksagonal strukturali bo'lib, ular nurlanish ostida saqlanib qoladi, shuningdek nurlantirilgan bir devorli uglerodli nanonaychalar Raman spektrida nuqsonlarning paydo bo'lishi bilan bog'liq yangi cho'qqi (805 cm^{-1}) va ko'p devorli uglerodli nanonaychalar nurlantirilganda amorf

gidrogenlangan uglerodga tegishli bo'lgan D' cho'qqisining intensivligi pasayishi va past chastotalari tomon siljishi aniqlandi. Ilmiy natijalardan foydalanish talabalarining kondensirlangan holatlar fizikasining zamonaviy muammolari to'g'risidagi tasavvurlarini chuqurlashtirishga imkon berdi;

panjara parametrlari va nanokristallit o'lchamlarining ko'p devorli uglerod nanonaychalari, (ZrTi)CN va (TiHfTa)CN nanoqoplamlari namunalarning elektron nurlanishiga bog'liqligi tabiati, nanoqoplamalar notekisigi va dislokatsiya zichligi o'zgarishi haqida xulosalar qilingan. Ilmiy natijalardan foydalanish talabalarining qattiq jismlar sohasida fazaviy o'zgarishlar haqidagi tushunchalarini kengaytirish imkonini berdi.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari 4 ta xalqaro va respublika ilmiy-amaliy anjumanlarda muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 9 ta ilmiy ish e'lon qilindi, Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 3 ta maqola, shulardan, 2 tasi xorijiy jurnallarda.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, uchta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiya hajmi 131 betni tashkil qiladi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi asoslangan, O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga muvofiqiqligi belgilangan, muammoning o'rganilganlik darajasi tasvirlangan, tadqiqot maqsadi va vazifalari belgilangan, tadqiqot ob'ektlari, predmetlari va usullari to'g'risida ma'lumotlar berilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi hamda amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyatidagi berilgan, tadqiqot natijalarini amalga oshirish, ishning aprobatsiyasi, shuningdek dissertatsiya hajmi va tuzilishi to'g'risidagi ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning birinchi "**Uglerodli nanonaychalar, nanoo'lchamli qoplamalar va ularning morfologiyasi va strukturasi**" bobida nanoqoplamalar va nanonaychalar strukturasi, morfologiyasi, nuqsonlari va nanozarralar o'lchamlari bo'yicha adabiyotlar ko'rib chiqilgan hamda ularga radiatsiyaning ta'siri haqidagi mavjud ma'lumotlar bayon qilingan. Ilmiy adabiyotlarda e'lon qilingan ishlar tahlili asosida tadqiqotning maqsad va vazifalari aniqlangan.

Dissertatsiyaning "**Tajriba usullari va namunalar kristall strukturalarini hisoblash**" deb nomlangan ikkinchi bobida tadqiqot obyektlarining tanlovi asoslangan, ularni ishlash uslublari haqida ma'lumotlar keltirilgan, ushbu tadqiqotni o'tkazish uchun qo'llanilgan tajriba metodlarining o'ziga xos jihatlari bayon qilingan. Tadqiqotning asosiy usullari sifatida rentgen difraksiyasi, Raman spektroskopiyasi, skanerlovchi elektron mikroskop, atom kuch mikroskopi va nurlantirish uchun yuqori energiyali elektronlardan foydalanildi.

Kristal strukturasi XRD-6100 (Shimadzu, Yaponiya) va Empyrean 3 (Malvern Panalytical) rentgen difraktometrlari yordamida xarakteristik rentgen nurlanishi bilan o'rganildi.

Namunalarning Raman spektroskopiyasi Renishaw qurilmasi yordamida amalga oshirildi. Raman spektrlari xona haroratida argon ionli lazer qo'zg'alishi 532 nm bilan $100\text{-}30000\text{ sm}^{-1}$ oralig'ida qayd etilgan.

(ZrTi)CN va (TiHfTa)CN namunalarning murakkab tarkibini hamda yuzada tarqalishini aniqlash uchun skanerlash elektron mikroskopi (SEM EVO MA 10) (CARL ZEISS) ishlatilgan. Nanokompozitlar namuna yuzasida bir tekis taqsimlanganligini aniqlash maqsadida 35 dan ortiq nuqtalar skanerlandi. SEM natijalariga ko'ra, (ZrTi)CN nanoqoplamasi quyidagi komponentlardan iborat: Zr - 44,7 (0,4)%, Ti - 6,9 (0,1)%, C - 18,7 (0,3)%, N - 26,1 (0,5)% va Fe - 3,6 (0,1), nanokompozitlar esa bir tekis taqsimlangan. (TiHfTa)CN nanokompoziti yuzasida quyidagi tarkibdagi elementlarning bir xil taqsimlanishi aniqlandi: Ti - 44,7 (0,2)%, Hf - 29,9 (0,2)%, N - 13,9 (0,3)%, Ta - 8,0 (0,2)%, C - 3,0 (0,1)% va Fe - 0,4 (0,1)%. Ikki namunalarda ham Fe asos (taglik) materialidir.

(ZrTi)CN va (TiHfTa)CN namunalarini yuza topografiyasini o'rganishda esa (NT-MDT) atom kuch mikroskopi ishlatilgan.

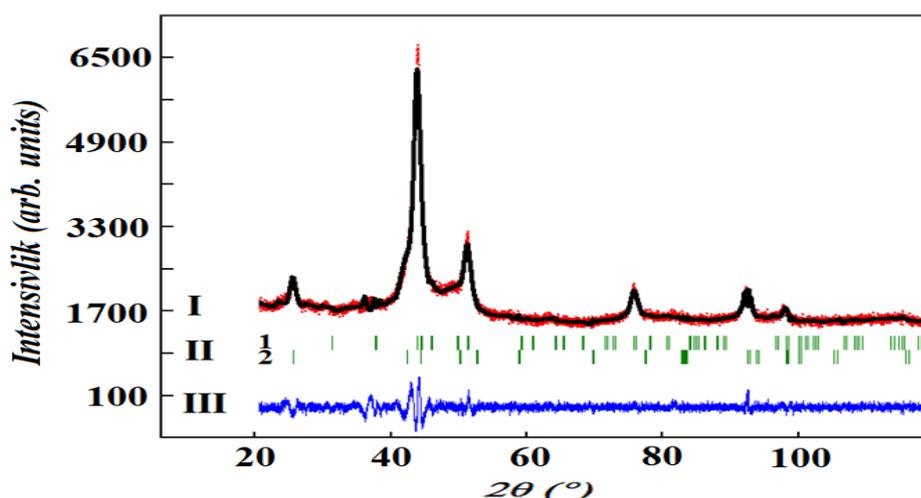
Namunalarni nurlantirish "Elektronika U003" elektron tezlatgichida $\sim 2\text{ MeV}$ energiyali tezlashtirilgan elektronlar bilan $0,17\text{ mA/cm}^2$ dasta tokining zichligida nurlantirildi.

Namunalarning rentgenogrammalari (difraktogrammalari) "FullProf" dasturiyordamida tahlil etilib, namunalarning strukturasi, Miller indeksleri, qatlamlar (tekisliklar) orasidagi masofa, nanokristallit o'lchamlari, dislokatsiya zichliklari, mikrozo'riqish, atom bog'lari orasidagi masofa aniqlandi.

"Elektronlar dastasining bir va ko'p devorli uglerod nanonaychalari, nanoqoplamalar strukturasi, morfologiyasida Raman spektroskopiyasiga ta'sirini o'rganish" deb nomlangan uchinchi bobda uglerodli nanonaychalar, nanoqoplamalar namunalarning strukturasi, morfologiyasiga, nuqsonlariga, yuza notekisliklariga, xirallikka, elektr xususiyatlariga yuqori energiyali elektronlar dastasining ta'siri natijalari keltirilgan.

"Elektronlar dastasining bir va ko'p devorli uglerod nanonaychalari strukturasi hamda Raman spektroskopiyasiga ta'siri tadqiqoti" nomli 3.1-paragrafda bir devorli uglerod nanonaychasi (BDUNN) va ko'p devorli uglerod nanonaychasi (KDUNN)ning rentgenostrukturaviy hamda Raman spektroskopiyasi tahlillari natijalari keltirilgan.

BDUNN ning difraktogrammalari "FullProf" dasturi yordamida Ritveld usuli bilan ishlov berish orqali quyidagi fazalar mavjud bo'lish ehtimoli asosida o'rganildi: kub (fazoviy guruh (keying o'rinlarda faz.gr) $Fd\bar{3}m$), geksagonal (faz.gr. $P6_3mmc$, $P6_3/mc$, $P6/mmm$), trigonal (faz.gr. $R\bar{3}m$). Hisoblashlar BDUNN namunasi ikki geksagonal fazadan (faz.gr. $P6/mmm$ va $P6_3/mc$) iborat ekanligini ko'rsatdi, bunda Bregg faktor $\chi^2=2.09$ ga teng.



1-rasm. Nurlantirilmagan BDUNN rentgen difraktogrammasi. I – eksperimentda kuzatilgan (-) va hisoblangan (-) ma’lumotlar, II – Bregg reflekslari, III – kuzatilgan va hisoblangan ma’lumotlar o’rtasidagi farq

$1,18 \times 10^{17}$ va $1,54 \times 10^{17}$ el/sm² elektronlar flyuensi bilan nurlantirilgan namuna rentgenogrammalari asosida ikki fazaning elementar panjara parametrlari aniqlandi (1-jadval).

1-jadval

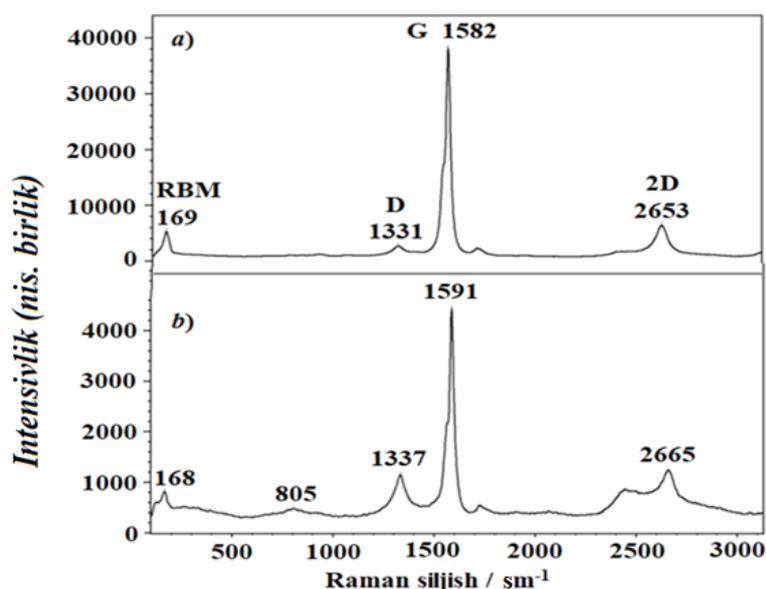
BDUNN namunasidagi geksagonal elementar panjaralar parametrlari. 1-faza – (faz.gr. P6/mmm) va 2-faza – (faz.gr. P6₃/mc)

Flyuens, el/sm ²	<i>a, b</i> (Å)		<i>c</i> (Å)	
	Faza1	Faza2	Faza1	Faza2
0	4,7623±0,0002	2,4630±0,0001	3,9491±0,0003	6,9538±0,0004
$1,18 \times 10^{17}$	4,8286±0,0003	2,4647±0,0003	3,9394±0,0003	6,8383±0,0004
$1,54 \times 10^{17}$	4,9378±0,0003	2,5022±0,0002	3,9469±0,0002	6,9878±0,0003

BDUNN namunasining dastlabki va elektronlarning turli flyuenslari bilan nurlantirishdan keyingi rentgenogrammalarini taqqoslash shuni ko‘rsatdiki, faqat (200) refleks nurlanish flyuensi ortishi bilan kattaroq sochilish burchagiga siljiydi. Nurlanishdan keyin namunadagi C=C bog‘lari orasidagi masofaning ortishi aniqlandi.

Raman spektroskopiyasida BDUNN ning RBM (Radial breathing mode) rejimi mos ravishda nurlantirilmagan va nurlantirilgan namunalar uchun 169 sm⁻¹ hamda 168 sm⁻¹ chastotada kuzatilgan. d_t (nanonaycha diametri) qiymati nurlantirilmagan namuna uchun 1,42 nm, $1,54 \times 10^{17}$ el/sm² da nurlantirilgan namuna uchun 1,43 nm ekanligi aniqlandi (2-rasm). RBM chastotasi orqali topilgan nanonaychanning diametrlariga ko‘ra, nanonaychanning xiral indeksleri (*n, m*) nurlantirilmagan namuna uchun 18,0 va nurlantirishdan keyin 15,5 ekanligi aniqlandi. Nanonaychalar tuzilishining kreslo turi metall (*n = m*), qolgan ikki-zigzag (*n = 0* yoki *m = 0*) va xiral ($0 < \theta < 30^\circ$) turlari ularning xiral holatiga qarab metall yoki yarimo‘tkazgich xususiyatiga ega bo‘lishi mumkin. Agarda (*n-m*) 3 ga karrali bo‘lsa, u holda naycha metall, agar 3 ga karrali bo‘lmasa, naycha yarimo‘tkazgich bo‘ladi. BDUNN lar uchun yuqoridagi xirallik indekslariga

asoslanib, dastlabki namuna metall xususiyatlarga ega, nurlantirilgan namuna esa yarimo‘tkazgich xususiyatlariga ega degan xulosaga kelish mumkin.



2-rasm. BDUNN ning Raman spektri: a) nurlantirilmagan, b) 1.54×10^{17} e l/cm^2 elektronlar flyuensi bilan nurlantirilgan

Nurlantirilmagan namunaning Raman spektrida 1582 cm^{-1} cho‘qqi G rejimiga mos keladi (2a-rasm), $1,54 \times 10^{17} \text{ e}l/cm^2$ flyuensdan so‘ng intensivligi pasayib, 1591 cm^{-1} ga “siljigan” (2b-rasm). G rejim intensivligining assimetriyasi ushbu spektr G^+ va G^- bog‘lanishlardan iborat ekanligini ko‘rsatadi, bu erda G^+ zaryadlarning uzatilishi bilan bog‘liq, G^- bir devorli uglerodli nanonaychanning metall yoki yarimo‘tkazgich o‘tkazuvchanligi bilan bog‘liq. Muhim natijalardan biri, elektronlar bilan nurlantirishdan so‘ng G rejimining siljishi bo‘lib, 1582 cm^{-1} chastota o‘tkazuvchanlikning metal o‘tkazuvchanligini va 1591 cm^{-1} chastota yarimo‘tkazgich xususiyatini ko‘rsatishi mumkin. Shuningdek namuna nurlantirilganda D rejim intensivliklari 1331 cm^{-1} (2a-rasm)dan 1337 cm^{-1} (2b-rasm)ga siljishi ham kuzatildi. Elektronlar bilan nurlantirilgandan so‘ng D rejimining intensivligi o‘zgarishi namunada nuqsonlar paydo bo‘lganligidan dalolat beradi (2a, b-rasm). G' rejimi nanonaycha va grafitning o‘ziga xos xususiyati bo‘lib, nurlantirilgan va nurlantirilmagan namunalar uchun mos ravishda 2653 cm^{-1} hamda 2665 cm^{-1} da paydo bo‘ldi. Raman spektrlarida D va G rejimlarining integral intensivliklari nisbati (I_D/I_G) tizimning amorfizatsiya darajasini baholash uchun keng qo‘llaniladi, bu UNN strukturasi sifatining bevosita o‘lchovidir. Ushbu nisbatga ko‘ra, BDUNNlar strukturasi sifatining shakllangan nuqsonlar tufayli yomonlashdi, deb hisoblash mumkin.

Nurlantirishdan so‘ng BDUNN Raman spektrida paydo bo‘lgan 805 cm^{-1} chastota bu $1,54 \times 10^{17} \text{ e}l/cm^2$ flyuens bilan nurlantirilishda hosil bo‘lgan nuqtaviy nuqsonlar bilan bog‘liq.

Hisob-kitoblar shuni ko‘rsatdiki, dastlabki KDUNN, BDUNNdan farqli o‘laroq, bir fazali bo‘lib geksagonal strukturaga ega (faz.gr $P6_3/mc$), elementar panjara parametrlari: $a=b=2,4398 \text{ \AA}$ va $c=6,6637 \text{ \AA}$ (2-jadval).

Turli elektronlar flyuensi bilan nurlantirilgan KDUNNlarning rentgenogrammalarini taqqoslash nurlantirilgan namunalarning (002) reflekslari intensivligining pasayishi va elektron flyuensining oshishi bilan kichik burchaklarga siljish mavjudligini ko'rsatdi, bu esa panjara parametrlarining oshishi bilan bog'liq. Grafatlanish darajasining ko'rsatkichi bo'lgan d_{002} qatlamlararo masofa 0,3424 nm (nurlantirilmagan namuna uchun) dan $5,1 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensda nurlantirilgan namuna uchun 0,3474 nm gacha ko'tarildi.

2-jadval

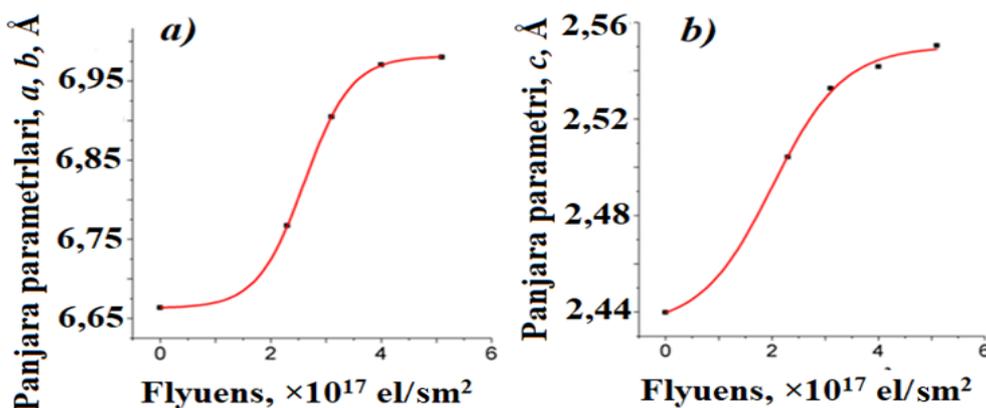
Nurlantirilmagan va elektronlar bilan nurlantirilgan KDUNN namunasining elementar panjara parametrlari

Flyuens, el/sm ²	$a, b, \text{Å}$	$c, \text{Å}$	R_B Bregg faktori	R_f struktura faktori
0	$2,4398 \pm 0,0001$	$6,6637 \pm 0,0002$	1,03	1,11
$2,3 \times 10^{17}$	$2,5042 \pm 0,0001$	$6,7672 \pm 0,0002$	1,54	1,31
$3,1 \times 10^{17}$	$2,5327 \pm 0,0002$	$6,9048 \pm 0,0003$	1,79	1,86
$4,0 \times 10^{17}$	$2,5417 \pm 0,0001$	$6,9705 \pm 0,0002$	1,12	1,97
$5,1 \times 10^{17}$	$2,5504 \pm 0,0003$	$6,9800 \pm 0,0001$	2,54	2,56

KDUNNning elementar panjara parametrlari $a=b$ va c ning x flyuensga bog'liqligi 4-rasmda ko'rsatilgan. Ushbu bog'liqlik quyidagi (1) funksiya $f(x)$ bilan ifodalanadi:

$$f(x) = \frac{A1-A2}{1+e^{-(x-x_0)/d_x}} + A2 \quad (1)$$

bu yerda $f(x)$ –panjara parametrlari, $A1$ – boshlang'ich kristall panjarasi parametri, $A2$ – oxirgi kristal panjarasi parametri, x_0 va d_x – eksperimental nuqtalarga o'rnatilgan model parametrlari, x_0 – parametrining optimal qiymati $A1$ va $A2$ ning o'rtacha arifmetik qiymatiga yaqin.



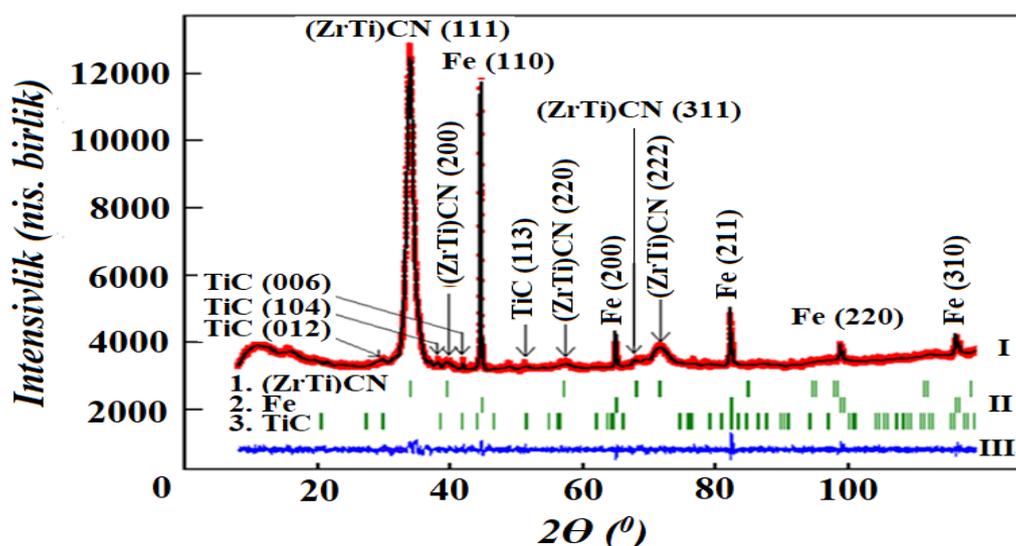
4-rasm. a) KDUNNning a va b elementar panjara parametrlarining elektronlar flyuensiga bog'liqligi: qora nuqtalar eksperimentdan olingan natijalar (1-formula, $x_0 = 2,005 \times 10^{17}$ el/sm² va $d_x = 0,663 \times 10^{17}$ el/sm²); b) – KDUNNning c panjara parametrining elektronlar flyuensiga bog'liqligi: qora nuqtalar eksperimentdan olingan natijalar (1-formula, $x_0 = 2,608 \times 10^{17}$ el/sm² va $d_x = 0,426 \times 10^{17}$ el/sm²)

Nurlantirilmagan va elektronlar bilan nurlantirilgan namunaning Raman spektrlari olingan. Nurlantirilmagan namuna uchun RBM cho‘qqisi 124 sm^{-1} chastotada kuzatildi va KDUNNning ichki diametri qiymati $2,05 \text{ nm}$ ekanligi topildi. $5,1 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$ flyuensda nurlatishdan so‘ng RBM cho‘qqisi 120 sm^{-1} ga siljidi, ichki diametri $2,13 \text{ nm}$ bo‘ldi. Raman spektroskopiyasida, nurlantirilmagan KDUNNning D rejimi 1347 sm^{-1} da, $5,1 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$ flyuens bilan nurlantirilganda 1340 sm^{-1} da aniqlandi. Nurlantirilgan namunaning D rejim intensivligi dastlabki KDUNNning D rejim intensivligidan yuqori bo‘lib, bu $5,1 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$ flyuensda nurlatishdan so‘ng namunadagi buzilishlarning kuchayishini ko‘rsatadi. G nurlantirilmagan holatda 1590 sm^{-1} da, $5,1 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$ elektronlar flyuensi bilan nurlantirilganda 1579 sm^{-1} da paydo bo‘ldi. G rejim yelkasidagi D’ rejim nurlantirilmagan namunada 1612 sm^{-1} da namoyon bo‘lib, amorf gidrogenlangan ugleroddan (a: H-C) chiqadi va nuqsonli grafit strukturasi bir turi sifatida qaraladi. G rejim intensivligi nafaqat nurlantirilmagan namunada, balki 1601 sm^{-1} chastotada aniqlangan nurlantirilgan namuna D’ rejimiga nisbatan ham yuqori. G’ rejim nurlantirilmagan KDUNN namunasi 2686 sm^{-1} chastotada paydo bo‘ldi. Shuni ta’kidlash kerakki, D rejimi tizimdagi buzilishlarni aniqlash uchun, G’ rejimi esa namuna qo‘shimchasi tufayli yuzaga kelgan panjara buzilish darajasini o‘rganish va miqdorini aniqlash uchun juda yaxshi qo‘llaniladi. $5,1 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$ flyuensda nurlantirilgandan so‘ng G’ rejim 2681 sm^{-1} da aniqlandi va uning intensivligi dastlabkiga nisbatan ortdi. Nurlantirilmagan va nurlantirilgan namunalarining integral intensivliklar nisbati I_D/I_G egri chiziqlar maydoni bo‘yicha hisoblab chiqilgan va yon devoridagi nuqsonlar sonining ko‘payishi bilan I_D/I_G ortib bormoqda. I_D/I_G nisbati $1,45$ dan $1,50$ gacha o‘sishi KDUNN elektronlar bilan nurlantirilganda nuqsonlarning ko‘payishini ko‘rsatadi.

Turli flyuensli elektronlar ta’sirida uglerod tarkibli nanokompozitlarni morfologik va strukturaviy tahlil natijalari “Yuqori energiyali elektronlar dastasining (ZrTi)CN, (TiHfTa)CN nanoqoplamalar morfologiyasi va strukturasi ta’siri” deb nomlangan 3.2 paragrafida keltirilgan.

(ZrTi)CN qoplamali nanokompozitning nurlantirilishdan oldingi va keyingi yuza topografiyasi atom kuch mikroskopi (AKM) yordamida 2D hamda 3D rejimda $2 \times 2 \text{ }\mu\text{m}$ skanerlash o‘lchamida kuzatildi va elektronlar flyuensi bilan nurlantirilgandan so‘ng namunaning yuza notekisligi yaxshilanganligi aniqlandi. Namuna yuza notekisligining o‘rtacha qiymat kattaligi (R_a) ushbu 2D formatdan foydalanib topildi va dastlabki namuna uchun $R_a=26,80 \text{ nm}$, $0,2 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$ va $2,3 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$ flyuens bilan nurlantirilgandan so‘ng mos holda $R_a=13,83 \text{ nm}$ hamda $12,22 \text{ nm}$.

Kompleks karbid va nitrid tizimlarining fazaviy diagrammalarini o‘rganish shuni ko‘rsatdiki, (ZrTi)CN tizimi asosan sirkoniy va titanning ikkilik birikmalarida mavjud bo‘lgan fazalarni hosil qiladi. 4-rasmda (ZrTi)CN nanokompozitli qoplama namunasi rentgenogrammasi keltirilgan.



4-rasm. Nurlantirilmagan (ZrTi)CN rentgen difraktogrammasi. I – experimentda kuzatilgan (-) va hisoblangan (-) ma’lumotlar, II – Bregg reflekslari, III – kuzatilgan va hisoblangan ma’lumotlar o‘rtasidagi farq

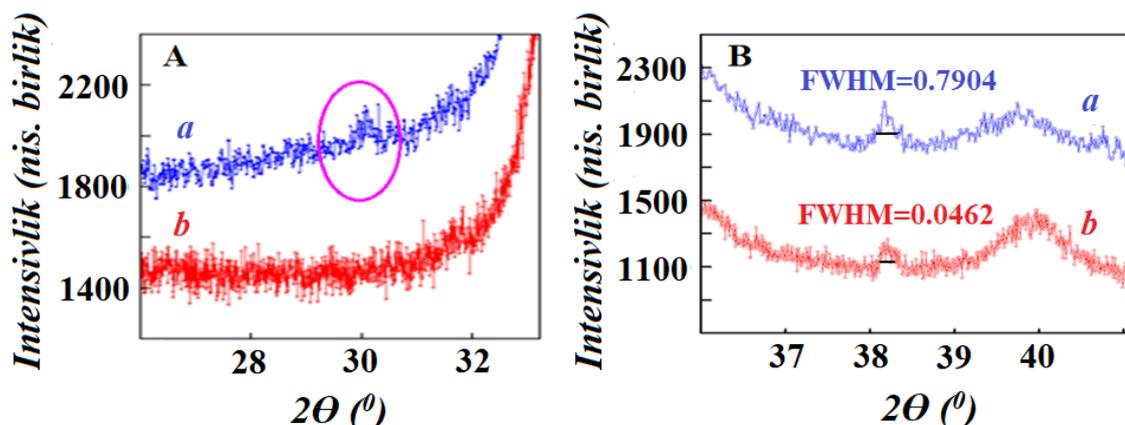
Uglerod tarkibli nanokompozit nanoqoplamada, $2\Theta_B = 20,4939^\circ; 29,8360^\circ; 38,3982^\circ; 41,6828^\circ$ va $51,2885^\circ$ eksperimental reflekslar bilan trigonal strukturaga (faz.gr. $R\bar{3}m$) mos keladigan titan karbid TiC_x va kub elementar panjarali (faz.gr. $Fm\bar{3}m$) ko‘p komponentli nanokompozit (ZrTi)CN mavjudligi qayd etildi. Rentgenogrammada temirga (faz.gr. $Im\bar{3}m$) mos kelgan reflekslar ham topildi (namuna tagligi). Difraktogramma tahlilining natijalari 3-jadvalda keltirilgan. $4,1 \times 10^{17}$ el/sm² elektronlar flyuensi bilan nurlantirilganda, (ZrTi)CN rentgenogrammasida titan karbidining trigonal tuzilishiga mos keladigan $2\Theta_B = 20,4939^\circ$ va $29,8360^\circ$ reflekslardan tashqari barcha reflekslar mavjud edi (5-rasm).

3-jadval
(ZrTi)CN nanoqoplamasining dastlabki va turli elektronlar flyuenslari bilan nurlantirilgandan keyingi elementar panjara parametrlari

Flyuens, el/sm ²	Elementar panjara parametrlari, a,b,c, Å		R_B Bregg faktori	R_f struktura faktori
	(ZrTi)(CN), faz.gr.($Fm\bar{3}m$)	TiC_x , faz.gr.($R\bar{3}m$)		
0	$4,5687 \pm 0,0002$	$a=b=3,9047 \pm 0,0002;$ $c=12,9899 \pm 0,0004$	2,75	1,85
$0,2 \times 10^{17}$	$4,5697 \pm 0,0003$	$a=b=3,8957 \pm 0,0003;$ $c=12,9899 \pm 0,0005$	1,09	2,86
$2,3 \times 10^{17}$	$4,5741 \pm 0,0003$	$a=b=3,8716 \pm 0,0001;$ $c=12,9798 \pm 0,0004$	2,06	1,47
$3,1 \times 10^{17}$	$4,5762 \pm 0,0002$	$a=b=3,9752 \pm 0,0002;$ $c=12,9247 \pm 0,0003$	1,15	2,45

Namunaning rentgenogrammasining tahlillari shuni ko‘rsatdiki, reflekslar elementar panjara parametrik $a = 4,3019$ Å bo‘lgan kub fazaga (faz.gr. $Fm\bar{3}m$) mos keladi. Trigonal strukturali (faz.gr. $R\bar{3}m$) reflekslar intensivliklarining yarim maksimumi to‘liq kengligi qiymatlari kub strukturali (faz.gr. $Fm\bar{3}m$) intensivliklar

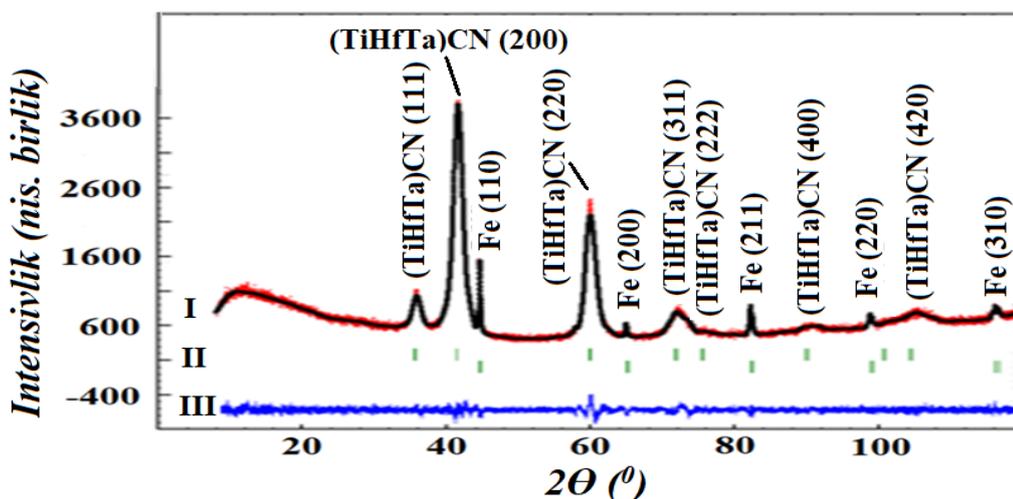
yarim maksimumi to‘liq kengligi qiymatlaridan kattaroqdir, buni 5-rasmda ko‘rish mumkin va bu trigonal strukturadan kub strukturaga tizimli o‘tishning yana bir dalilidir.



5-rasm. (ZrTi)CN ning 26° dan 33° gacha bo‘lgan oraliqdagi (A) va 36° dan 41° gacha bo‘lgan oraliqdagi (B) dastlabki (a) va 4.1×10^{17} el/sm² elektronlar flyuensi bilan nurlantirilgan (b) difraktogrammalari

Dastlabki va nurlantirilgan (TiHfTa)CN nanokompozitining sirt topografiyasi skanerlovchi elektron mikroskop (SEM) yordamida o‘rganildi. Sirt notekisligining o‘rtacha qiymati (R_a) 2D formati yordamida aniqlanadi va nurlatishdan oldin $R_a = 2,67$ nm hamda $0,2 \times 10^{17}$ el/sm², $1,5 \times 10^{17}$ el/sm² va $4,5 \times 10^{17}$ el/sm² elektronlar flyuensi bilan nurlantirilgan namunalarda $R_a = 2,91$ nm, 25,2 nm va 35,2 nm, mos ravishda. Nurlanishdan so‘ng (TiHfTa)CN nanokompozitining sirt notekisligi 13,2 marta oshdi, bu, ehtimol, dislokatsiyaning sirtga qarab harakatlanishi bilan bog‘liq.

(TiHfTa)CNning rentgenogrammasida yoqlari markazlashgan kub (faz.gr. $Fm\bar{3}m$) va hajmi markazlashgan kub (faz.gr. $Im\bar{3}m$) fazalar aniqlangan (6-rasm).



6-rasm. Nurlantirilmagan (TiHfTa)CN rentgen difraktogrammasi. I – experimentda kuzatilgan (–) va hisoblangan (–) ma‘lumotlar, II – Bregg reflekslari, III – kuzatilgan va hisoblangan ma‘lumotlar o‘rtasidagi farq

4-jadvalda dastlabki va nurlantirilgan namunalarning elementar panjara parametrlari natijalari ko‘rsatilgan. Ko‘rish mumkinki, (TiHfTa)CN nanokompozitining elementar panjara parametrlari elektron flyuensining oshishi

bilan ortadi va $4,5 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensda, aksincha, panjara parametrlari kamayadi. Panjara tugunlaridagi atom bog‘lari orasidagi masofa ham $3,5 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensgacha nurlantirilganda ortib bordi va $4,5 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensda esa kamaydi.

4-jadval

(TiHfTa)CN nanoqoplamasining nurlantirilishdan oldingi va keyingi elementar panjara parametrlari

Flyuens, el/sm ²	<i>a, b, c</i>	R _B Bregg faktori	R _r struktura faktori
0	4,3649±0,0002	2,14	1,56
0,2×10¹⁷	4,3649±0,0003	2,01	2,16
1,5×10¹⁷	4,3666±0,0002	1,41	1,65
2,5×10¹⁷	4,3896±0,0003	2,24	1,55
3,5×10¹⁷	4,4199±0,0003	2,17	1,22
4,5×10¹⁷	4,3628±0,0004	2,75	1,08

Elektronlar flyuensining oshishi bilan amorf fazaning tarkibi kamayadi va $4,5 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensda kristallanish tufayli yangi refleks paydo bo‘ladi.

“Uglerodli nanonaychalar va nanoqoplamalar nanokristallitlari hamda dislokatsiya zichliklari” deb nomlangan 3.3 paragrafida elektronlar flyuensining nanonaychalar va uglerod tarkibli nanoqoplamalar nanokristallitlari hamda dislokatsiya zichliklariga ta’siri o‘rganiladi.

Nanokristallitlar o‘lchamini (D) aniqlash uchun hisob-kitoblar Stoks tenglamasi yordamida Uilyamson-Xall diagrammasini qurish usuli yordamida amalga oshirildi. Mikrozo‘riqishlar (ϵ) va dislokatsiya zichligini (σ) aniqlash uchun rentgen diffraksiyasi tahlili qo‘llanildi. BDUNN nanokristallarining o‘lchami elektronlar flyuensining $1,54 \times 10^{17}$ el/sm² gacha ortishi bilan o‘ssishi, mikrozo‘riqish va dislokatsiya zichligining qiymatlari kamayishi aniqlandi (5-jadval).

KDUNN nanokristallitlarining o‘lchamini aniqlash uchun hisob-kitoblar Debay-Scherrer formulasi yordamida amalga oshirildi. Ma’lum bo‘ldiki, elektronlar flyuensi bilan $5,1 \times 10^{17}$ el/sm² gacha nurlantirish nanokristallitlar o‘lchamini oshishiga va dislokatsiya zichligi qiymatining kamayishiga olib keldi (5-jadval).

6-jadvalda (ZrTi)CN va (TiHfTa)CN nanoqoplamalarining nanokristallit o‘lchamlari, mikrozo‘riqish va dislokatsiya zichliklari qiymatlari keltirilgan.

Elektronlar oqimining oshishi bilan (ZrTi)CN va (TiHfTa)CN nanokristallitlarining o‘lchamlari ortadi, mikrozo‘riqish va dislokatsiya zichligi qiymatlari pasayishi aniqlandi.

5-jadval

BDUNN va KDUNN ning nanokristallitlar o'lchami, dislokatsiya zichliklari va mikrozo'riqish qiymatlari

Flyuens, el/sm ² , ×10 ¹⁷	BDUNN			KDUNN				
	0	1,18	1,54	0	2,3	3,1	4,1	5,1
D, nm	4,06± 0,02	4,09± 0,02	5,04± 0,03	9,35± 0,01	9,37± 0,01	9,39± 0,01	9,41± 0,01	9,46± 0,01
σ×10 ¹² , sm ⁻²	6,07± 0,01	5,98± 0,01	3,95± 0,01	1,144± 0,002	1,139± 0,002	1,134± 0,002	1,129± 0,002	1,117± 0,002
ε, ×10 ⁻³	8,42±0,02	8,11±0,02	7,62±0,01	-	-	-	-	-

6-jadval

(ZrTi)CN va (TiHfTa)CN nanoqoplamalarining nanokristallitlar o'lchami, mikrozo'riqish va dislokatsiya zichliklari qiymatlari

Namuna	Flyuens, el/sm ²	D, nm	ε, ×10 ⁻³	δ×10 ¹² , sm ⁻²
(ZrTi)CN	0	17,06±0,03	10,21±0,04	0,34±0,04
	0,2×10 ¹⁷	19,99±0,02	10,01±0,02	0,25±0,02
	2,3×10 ¹⁷	20,12±0,02	9,84±0,03	0,24±0,02
	3,1×10 ¹⁷	20,28±0,03	9,15±0,05	0,23±0,01
	4,1×10 ¹⁷	21,51±0,02	8,30±0,03	0,21±0,01
(TiHfTa)CN	0	7,30±0,03	5,38±0,06	1,88±0,08
	0,2×10 ¹⁷	12,24±0,04	3,87±0,08	1,02±0,05
	1,5×10 ¹⁷	20,69±0,03	1,31±0,09	0,23±0,06
	2,5×10 ¹⁷	23,73±0,03	1,30±0,07	0,18±0,07
	3,5×10 ¹⁷	24,23±0,03	1,29±0,05	0,17±0,06
	4,5×10 ¹⁷	27,34±0,02	1,20±0,05	0,13±0,04

KDUNN nanokristallit o'lchamining elektronlar flyuensiga eksponensial funksiya asosida bog'liqligi aniqlandi (7-rasm), bu quyidagi funksiya bilan tavsiflanadi:

$$\Phi = \Phi_0 - \rho e^{-D/t} \quad (2)$$

bu yerda Φ – elektronlar flyuensi, Φ_0 qiymati $6,7(0,18) \times 10^{17}$ el/sm² ga teng, ρ va t eksperimental nuqtalarga o'rnatilgan model parametrlari: $\rho=909,1(11,30) \times 10^{17}$ el/sm², $t=1,91(0,44)$ nm.

(ZrTi)CN nanokristallit o'lchamlarining nanokristallit o'lchamlarining elektronlar flyuensiga bog'liqligi (7-rasm) quyidagi formula bilan tavsiflanadi:

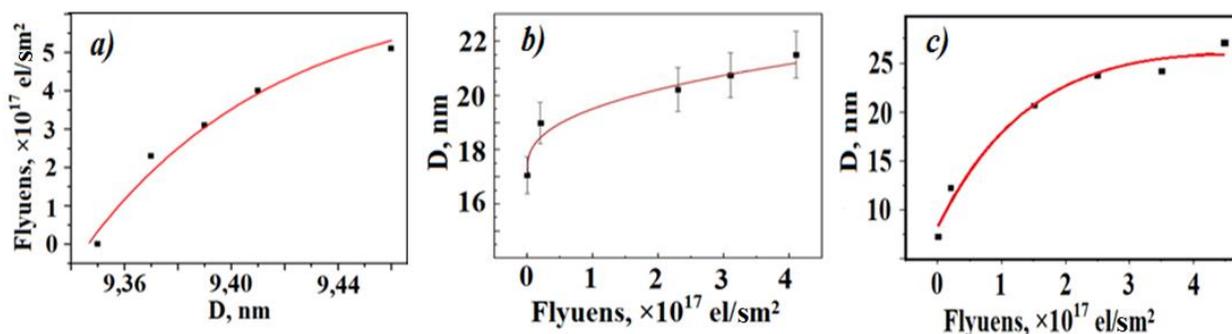
$$D = D_0 e^{a - \frac{b}{\Phi+c}} \quad (3)$$

bu yerda, D – nanokristallit o‘lchami; $D_0=1$ nm; Φ – elektronlar flyuensi; eksperimental nuqtalarga o‘rnatilgan model parametrlari $a=3.06(0.03)$, $b=0.07(0.01)\times 10^{17}$ el/sm², $c=0.35(0.03)\times 10^{17}$ el/sm² o‘zgarimas kattaliklardir.

(TiHfTa)CN nanokristalliti o‘lchamining elektronlar flyuensiga bog‘liqligi (7-rasm) quyidagi formula bilan aniqlandi:

$$D = D_0 - \rho e^{-\Phi/t} \quad (4)$$

bu yerda $D_0=26.82(1.68)$ nm, Φ – elektronlar flyuensi, ρ va t eksperimental nuqtalarga o‘rnatilgan model parametrlari: $\rho=18.4(1.8)$ nm, $t= 1.35(0.42)\times 10^{17}$ el/sm².



7-rasm. KDUNN (a), (ZrTi)CN (b) va (TiHfTa)CN (c) namunalar nanokristallitlari o‘lchamlarining elektronlar flyuensiga bog‘liqligi: qora nuqtalar eksperimentdan olingan natijalar

Elektron nurlanishining BDUNNlar strukturasi ta’siri bo‘yicha olingan natijalar tahlili panjara parametrlarining oshishini ko‘rsatdi, bu atomlarning siljishi va nuqsonlarning paydo bo‘lishi bilan izohlanadi. KDUNNlarning yuqori energiyali elektronlar bilan nurlantirilishi natijasida uning devorlarida “yaratilgan” bo‘sh joylar sirtini qayta tuzish va o‘lchamining o‘zgarishiga yordam beradi.

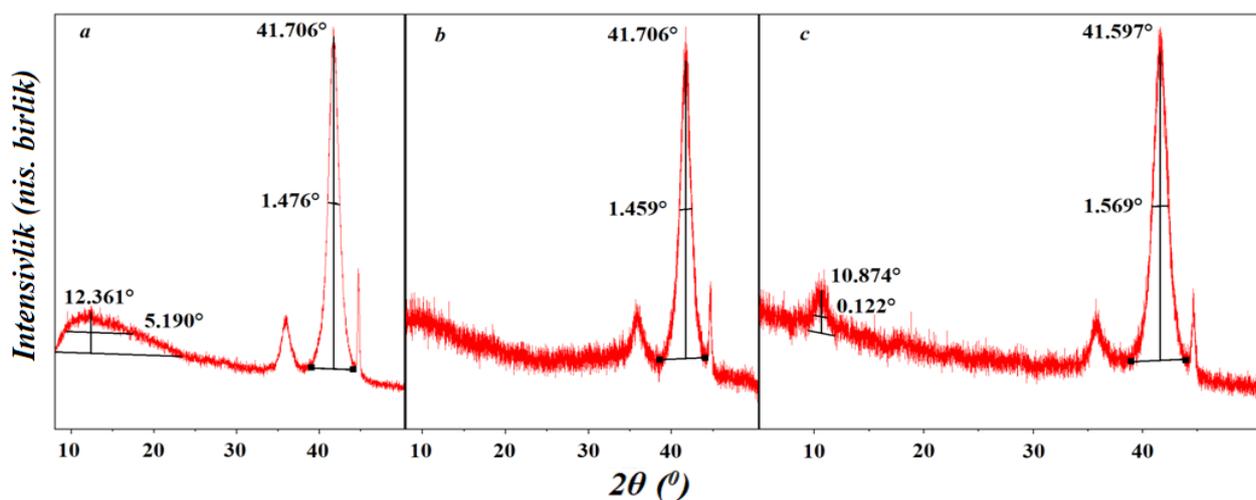
BDUNNni $1,54\times 10^{17}$ el/sm² elektronlar flyuensi bilan nurlantirish metal-yarimo‘tkazgich o‘tishni rag‘batlantiradi. Raman spektroskopiyasining ma’lumotlari asosida elektron nurlantirishdan so‘ng D rejimi intensivligining oshishi amorf uglerod tarkibining ko‘payishi bilan bog‘liq deb taxmin qilish mumkin. Ammo shu bilan birga, Raman spektroskopiyasida intensivlikning kengligi ~ 100 sm⁻¹ dan kam, shuningdek, kichik sochilish burchaklaridagi rentgen diffraksiyasida amorf uglerodga xos keng tarqalgan refleks mavjud emas. Bularning barchasi nurlanish BDUNNda amorf uglerod hosil bo‘lishiga yordam bermasligini, balki boshqa turdagi nuqsonlarning paydo bo‘lishini (C=C bog‘larining uzilishini) ko‘rsatadi.

Shuni ta’kidlash kerakki, elektronlar bilan nurlantirish natijasida BDUNN va KDUNNlarda dislokatsiya zichligi pasayadi. Tartibsiz tekisliklarning kristallanishi radiatsiyaviy tavlaniş natijasida sodir bo‘ladi.

Yuqoridagi ma’lumotlarni inobatga olgan holda nanonaychalar devorlarida mikrozo‘riqishlarning kamayishi natijasida hosil bo‘lgan bo‘sh o‘rinlar “zipper mexanizmi” bo‘yicha qayta birlashadi va undagi dislokatsiyalar nanonaycha uchi

tomon spiralsimon harakatlanadi. Buni metall – yarimo‘tkazgich o‘tish bilan ham izohlash mumkin.

Namunalarning kristalliligi elektronlar flyuensi oshishi bilan ortadi, buni kristall refleks integral intensivligining kichik tarqalish burchaklarida yuzaga keladigan amorf holatning integral intensivligiga nisbatidan aniqlash mumkin. $4,1 \times 10^{17}$ el/sm² elektronlar flyuensi bilan nurlantirishdan so‘ng, bu nisbatning qiymati (ZrTi)CNda 4,05 dan 4,66 gacha, (TiHfTa)CNda ($4,5 \times 10^{17}$ el/sm²da) 2,04 dan 9,83 gacha (8-rasm) o‘zgaradi.



8-rasm. (TiHfTa)CNning nurlantirilmagan (a) va $2,5 \times 10^{17}$ el/sm² (b) hamda $4,5 \times 10^{17}$ el/sm² (c) flyuenslarda nurlantirilgandagi rentgenogrammalari kesimi

(ZrTi)CN va (TiHfTa)CNdagi nanokristallitlar o‘lchamlarining oshishi nurlanish ta’sirida chegaralarning qisqarishi tufayli ularning o‘shishi va birlashishi bilan bog‘liq. Ikki o‘lchovli o‘zaklanish mexanizmi bo‘yicha kristallitlarning o‘shishi yoriqlar, pog‘onachalar, dislokatsiyalar bilan qoplangan sirtida sodir bo‘ladi va butun sirtini to‘ldirish uchun kengayadi, so‘ngra shakllangan qatlam yangi ikki o‘lchovli o‘zakni vujudga keltiradi, qatlamli o‘shish sodir bo‘ladi. Ushbu o‘shish mexanizmi, ehtimol, (ZrTi)CN va (TiHfTa)CNga to‘g‘ri keladi. Dastlabki (ZrTi)CN sirt nuqsonlari va aralashmalarni o‘z ichiga oladi, ular yuqori mikrozo‘riqishni va nisbatan past dislokatsiya zichligini “hosil qiladi”. Dastlabki (TiHfTa)CNda uch o‘lchamli yoki hajmiy nuqsonlar mavjud bo‘lgan (ya’ni namunada boshqa faza mavjud bo‘lishi mumkin, ammo kristall yuzasida emas), ammo bu nuqsonlar dislokatsiyalar bilan birga keladi, bu dislokatsiyaning yuqori zichligi va past mikrozo‘riqish qiymati bilan tasdiqlanadi. Shunday qilib, (ZrTi)CN va (TiHfTa)CN nurlantirilishi natijasida nuqsonli qatlam yuzasida ikki o‘lchovli o‘zaklanish mexanizmi orqali kristallitlarning o‘lchamlari ortdi, dislokatsiyalar spiralsimon harakat qilishi natijasida sirt notekisligining o‘zgarishiga olib keldi.

XULOSA

“Elektronlar bilan nurlantirilgan uglerod nanonaychalar va uglerod tarkibli (ZrTi)CN, (TiHfTa)CN nanoqoplamalar strukturasi va nanokristallitlar o‘lchamlari” mavzusidagi falasafa doktori darajasini (PhD) olish uchun yozilgan dissertatsiya ishi bo‘yicha o‘tkizilgan tadqiqotlar asosida quyidagi xulosalar keltiriladi:

1. BDUNN namunasida $P6/mmm$ va $P6_3/mc$ fazoviy guruhlariga tegishli bo‘lgan ikkita geksagonal strukturaning mavjudligi aniqlandi. BDUNNni $1,54 \times 10^{17}$ el/sm² gacha elektronlar flyuensi bilan nurlantirish a va b panjara parametrlarining 4,7623 Å dan 4,9378 Å gacha oshishiga hamda c parametrlarining 3,9491 Å dan 3,9469 Å gacha pasayishiga olib keladi, nanokristallitlar o‘lchamining 4,06 nm dan 5,03 nm gacha o‘shishiga, shuningdek elektron flyuensi oshishi bilan mikrozo‘riqishning kamayishiga olib keladi.

2. BDUNNlarni $1,54 \times 10^{17}$ el/sm² elektronlar flyuensi bilan nurlantirish metaldan yarimo‘tkazgich o‘tkazuvchanligiga o‘tishni rag‘batlantiradi, bu nurlantirilgan namunalar uchun xiral indeksning 18,0 dan 15,5 ga o‘zgarishidan dalolat beradi.

3. KDUNNlar $5,1 \times 10^{17}$ el/sm² gacha bo‘lgan elektronlar flyuenslari bilan nurlantirilganda elementar panjara parametrlarining $a=b$ - 4,5% ga, c - 4,8% ga ortishi aniqlandi, bu nuqtaviy nuqsonlar (vakansiyalar va atomlar siljishi) paydo bo‘lishi bilan bog‘liq, nanokristallitlarining o‘lchami $\sim 1,1$ Å ga oshdi, KDUNN panjara parametrlari va nanokristallit o‘lchamlarining elektronlar flyuensiga bog‘liqligi aniqlandi.

4. Dastlabki nanokompozit qoplamalarni rentgenostrukturaviy tadqiqotlari shuni ko‘rsatdiki, (ZrTi)CN ikki fazadan iborat: kub (faz.gr. $Fm\bar{3}m$) – (ZrTi)CN va trigonal (sp. gr. $R\bar{3}m$) – TiC_x , (TiHfTa)CN esa bir fazali kub (faz.gr. $Fm\bar{3}m$) strukturaga ega.

5. (ZrTi)CN namunasini 2 MeV energiyali elektronlar bilan $4,1 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensgacha nurlantirish panjara parametrlarining o‘zgarishiga olib keladi va $4,1 \times 10^{17}$ el/sm² elektronlar flyuensi bilan nurlantirish trigonal (faz.gr. $R\bar{3}m$) kub strukturaga (faz.gr. $Fm\bar{3}m$) fazali o‘tish yuz berdi.

6. (ZrTi)CN nanoqoplamani $2,3 \times 10^{17}$ el/sm² elektronlar flyuensi bilan nurlantirish sirt notekisligining 2,2 marta yaxshilanishiga olib keldi, $4,1 \times 10^{17}$ el/sm² flyuens bilan nurlantirilganda nanokristallit o‘lchamlarini 21% ga oshishi, mikrozo‘riqish 19% ga va dislokatsiya zichligi 38% ga kamayishi yuz berdi.

7. (TiHfTa)CN namunasini 2 MeV energiyali elektronlar bilan $3,5 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensgacha nurlantirish panjara parametrlarini oshishi, $4,5 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensda esa radiatsion toblash (otjig) natijasida, panjara parametrlari o‘zining dastlabki qiymatiga yaqinlashishi yuz berdi.

8. (TiHfTa)CN namunasini $3,5 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensgacha nurlantirish yuz notekisligini 13,2 marta oshishiga, nanokristallitlar o‘lchamlari 73% ga o‘shishiga,

mikrozo‘riqish va dislokatsiya zichligi mos holda 93% va 78% ga kamayishiga olib keldi.

9. (TiHfTa)CN uchun elektron nurlanishda parametrlarning o‘zgarishidagi sezilarli farq ularning dastlabki strukturasi bilan izohlanadi: dastlabki (ZrTi)CN ikki o‘lchovli yoki sirt nuqsonlarini o‘z ichiga olsa, (TiHfTa)CNda uch o‘lchovli yoki hajmiy nuqsonlar mavjud.

10. Tajriba natijalari (struktura, sirt notekisligi, nanokristallit o‘lchami, nanonaycha diametri, mikrozo‘riqish, dislokatsiya zichligi, elektronlar flyuensita’siri) uglerod nanonaychalarini (ZrTi)CN, (TiHfTa)CN ustiga, elektron nurlanishdan foydalanib, ularning ishlash ko‘rsatkichlarini (eskirish, ishqalanish, notekislik, mustahkamlik) yaxshilash va nanoqoplamalarning ba’zi parametrlari hamda xususiyatlarini boshqarish orqali qoplash mumkinligini ko‘rsatadi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЁНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

ЮДАШОВА ПРОДАХОН ИКРОМОВНА

**СТРУКТУРА И РАЗМЕРЫ НАНОКРИСТАЛЛИТОВ УГЛЕРОДНЫХ
НАНОТРУБОК И УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ (ZrTi)CN, (TiHfTa)CN
НАНОПОКРЫТИЙ, ОБЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНАМИ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Ташкент – 2023

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инновации Республики Узбекистан за номером B2022.4.PhD/FM546.

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.inp.uz) и Информационно-образовательном портале «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель: **Ташметов Маннаб Юсупович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Нуритдинов Иззатилло**
доктор физико-математических наук, профессор

Ташмухамедова Дилноза Артикбаевна
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: **Ферганский государственный университет**

Защита диссертации состоится «___» _____ 2023 года в ___ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (Адрес: 100174, г. Ташкент, пос. Улугбек, Институт ядерной физики. Тел.: (+99871) 289-31-41; факс: (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный номер _____) (Адрес: 100214, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ. Тел. (+99871) 289-31-19).

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2023 г.
(протокол рассылки № _____ от _____ 2023 г.).

И.И. Садиков
заместитель председателя научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.т.н., профессор

О.Р. Тожибоев
ученый секретарь научного совета
по присуждению ученых степеней,
PhD по ф.-м.н., старший научный сотрудник

Э.М. Турсунов
председатель научного семинара
при научном совете по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

Введение (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в сфере современных нанотехнологий большое значение имеют нитридные, карбидные и карбонитридные многокомпонентные нанокompозитные покрытия, а также одно- и многостенные углеродные нанотрубки, используемые в качестве защитного покрытия в авиационной и космической промышленности, интегральной и функциональной микро- и нанoeлектронике, компьютерных технологиях и медицине благодаря их высокой термостойкости, твердости, износостойкости, проводимости и стойкости к окислению.

В настоящее время в мире проводятся интенсивные исследования по изучению различных свойств и закономерностей многокомпонентных углеродосодержащих нанопокpытий из жаропрочных, тугоплавких металлов (Zr, Ti, Hf, Ta, W, V, Nb) и одно- и многостенных углеродных нанотрубок. Изучение физических процессов, закономерностей и структурных изменений, происходящих в результате радиационного воздействия, позволяет управлять их свойствами и характеристиками. Ранее структурные параметры углеродосодержащих нанопокpытий и нанотрубок изучались только при воздействии низких энергий облучения (~1 МэВ). Из-за возможных различий физических процессов, происходящих при облучении излучением высокой энергии (2 МэВ), изучение поверхностной структуры, размеров нанокристаллитов, дислокаций и связи между атомами в углеродосодержащих нанопокpытиях и нанотрубках является одной из актуальных задач физики конденсированного состояния (в области нанотехнологий).

В нашей стране уделяется большое внимание теоретическим и практическим работам в области физики конденсированного состояния и материаловедения, а именно, изучению радиационных процессов, закономерностей влияния различных флюенса электронов в углеродосодержащих нанопокpытиях и углеродных нанотрубках, устойчивых к радиации, эрозии и коррозии. Направления этих фундаментальных исследований, имеющих огромное значение для развития науки нашей страны и её широкого практического применения, отражены в Стратегии² развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.

Исследования, проведенные в данной диссертационной работе, в определенной мере соответствуют задачам, обозначенным в Указе Президента Республики Узбекистан № УП–60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.» от 28 января 2022 года, Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП–3682 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов» от 27 апреля 2018 года, № ПП–3698

² Указ Президента Республики Узбекистан № УП–60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.» от 28 января 2022 г.

«О дополнительных мерах по совершенствованию механизмов внедрения инноваций в отрасли и сферы экономики» от 7 мая 2018 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данном направлении.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в республике IV “Химические технологии и нанотехнологии”.

Степень изученности проблемы. Исследования по изучению различных свойств и закономерностей многокомпонентных углеродосодержащих нанопокровов и одно- и многостенных углеродных нанотрубок проводятся ведущими учеными мировых исследовательских центров, в том числе российскими (Д. Московских, Р.А. Андриевский), украинскими (А.Д. Погребняк, А.П. Шпак, Н. Азаренков, В.М. Береснев), китайскими (Б. Ли, Ю. Фэн, К.В. Дин, Г. Цянь, Х.Б. Чжан, Ю.Дж. Цюнь, Л.К. Цзи, Л.Ч. Мин), немецкими (Х.Холлек, К. Томсен, Дж. Маулцш, Х. Телг.), американскими (Г. Дрессельхаус, Д. Кауми, С.С.Тиффани, С. Райх, Н. Хиремат, Г. Бхат, Дж. Мэйс), бразильскими (М.С. Эвора, А. Джорио), австралийскими (К. Макдонелл, Г. Пруст, Л. Шен), японскими (С. Судзуки), корейскими (Дж. Пак, С. Дж. Шин, М. Дж. Сон), индийскими (Р. Пурохит, К. Пурохит, С. Рана, В. Патель), финскими (А.В. Крашенинников, К. Нордлунд), узбекистанскими (Э. Каримов, В.Т. Эм, И. Хидиров, М.Ю. Ташметов) и другими специалистами.

Ими выполнен большой объем работ по теоретическому и экспериментальному изучению физико-механических свойств нанопокровов и углеродных нанотрубок, состоящих из твердых соединений Ti, Zr, Hf, V, Ta; определены структура и структурные изменения TiN_x , TiC_x и многокомпонентных сплавов; изучено воздействие гамма-лучей, протонов, ионов, нейтронов и низкоэнергетических электронов на нанопокровов карбонитридов Ti, Hf, Zr, Ta и углеродные нанотрубки.

Однако, до настоящего времени не изучено влияние высокоэнергетических электронов различных флюенсов на структуру многокомпонентных углеродосодержащих нанопокровов и одно- и многостенных углеродных нанотрубок, морфологию их поверхности, микронапряжение, колебания атомов, диаметр нанотрубок и размеры кристаллов. Такие исследования дают подробную информацию о функциональных зависимостях свойств нанопокровов и углеродных нанотрубок от флюенса электронов.

Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательского проекта Института ядерной физики по теме: ОТ-Ф2-20 «Низкоразмерные структурные превращения в легированном кремнии при радиационном воздействии и влияние их на свойства монокристалла» (2017-2020); утвержденной Постановлением Президента № ПП–4526 от 21

ноября 2019 года программы научно-исследовательских работ по теме: «Радиационно-стимулированные процессы трансмутации легированных ядер монокристаллического кремния» (2020–2024).

Целью исследования является выявление закономерностей влияния электронов различных флюенсов на структуру и размеры нанокристаллитов углеродных нанотрубок и углеродосодержащих многокомпонентных нанопокровов.

Задачи исследования:

изучение влияния электронов различных флюенсов с энергией 2 МэВ на структуру и спектроскопию одностенных и многослойных углеродных нанотрубок;

определение состояния дефектов и нанокристаллитов при воздействии на однослойные и многослойные углеродные нанотрубки быстрыми электронами различных флюенсов;

изучение влияния электронов различных флюенсов с энергией 2 МэВ на морфологию и структуру нанопокровов (ZrTi)CN;

исследование изменения плотности дислокаций и нанокристаллитов в результате воздействия высокоэнергетических электронов с разным флюенсом на нанопокровы (ZrTi)CN;

изучение влияния электронов различных флюенсов с энергией 2 МэВ на морфологию и структуру нанопокровов (TiHfTa)CN;

изучение влияния быстрых электронов различных флюенсов на нанокристаллиты и плотность дислокаций нанопокровов (TiHfTa)CN.

Объектом исследования являются одностенные, многостенные углеродные нанотрубки и углеродосодержащие нанопокровы (ZrTi)CN, (TiHfTa)CN.

Предметом исследования влияние быстрых электронов различных флюенсов на структуру и размеры нанокристаллитов углеродных нанотрубок углеродосодержащих нанопокровов (ZrTi)CN, (TiHfTa)CN.

Методы исследования. Метод рентгеновской дифракции, метод Ритвельда, Рамановская спектроскопия, методы атомно-силовой микроскопии и сканирующего электронного микроскопа.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

установлено, что одностенные углеродные нанотрубки являются двухфазными (пр.гр. $P6/mmm$ и $P6_3/mc$), а многостенные – однофазными с гексагональной структурой (пр.гр. $P6_3/mc$), которые сохраняются при облучении флюенсами до $1,54 \times 10^{17}$ эл/см² и $5,1 \times 10^{17}$ эл/см², соответственно;

впервые в спектре комбинационного рассеяния одностенных углеродных нанотрубок при флюенсе $1,54 \times 10^{17}$ эл/см² обнаружен новый пик 805 см^{-1} , связанный с появлением точечных дефектов при облучении, а в многостенных углеродных нанотрубках при облучении флюенсом $5,1 \times 10^{17}$ эл/см² пик $D'(1612 \text{ см}^{-1})$, относящийся к аморфному гидрогенизированному углероду, сдвигается в сторону низких частот (1601 см^{-1}) с уменьшением интенсивности;

впервые установлено, что шероховатость поверхности при облучении нанопокровов (ZrTi)CN флюенсом $2,3 \times 10^{17}$ эл/см² уменьшается в 2,2 раза, (TiHfTa)CN флюенсом $4,5 \times 10^{17}$ эл/см² увеличивается в 13,2 раза в следствие возникающего на поверхности двумерного зародышевого роста, связанного со спиральным движением дислокации в сторону верхнего слоя нанопокровов;

впервые установлено, что зависимость параметров решетки и размеров нанокристаллитов от облучения электронами образцов многостенных углеродных нанотрубок, нанопокровов (ZrTi)CN и (TiHfTa)CN имеет экспоненциальный характер, а плотность дислокаций уменьшается с ростом облучения до флюенса $5,1 \times 10^{17}$ эл/см².

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

определены пространственные группы одностенных углеродных нанотрубок и установлено, что облучение электронами энергией 2 МэВ до $1,54 \times 10^{17}$ эл/см² приводит к увеличению параметров решетки *a* и *b* на 4%, размеров нанокристаллитов на 19% и росту микронапряжений;

определено, что после облучения флюенсом электронов $1,54 \times 10^{17}$ эл/см² диаметр одностенных углеродных нанотрубок изменяется на 1,2 % и происходит переход металл-полупроводник;

установлено, что при облучении многостенных углеродных нанотрубок флюенсами электронов до $5,1 \times 10^{17}$ эл/см² увеличиваются параметры решетки *a* и *b* на 4,53 %, *c* – на 4,75 %, что связано с появлением точечных дефектов, определена зависимость параметров решетки и размера кристаллитов от флюенса электронов;

выявлено, что облучение образца (ZrTi)CN электронами энергией 2 МэВ флюенсом до $4,1 \times 10^{17}$ эл/см² приводит к изменению параметров решетки, при флюенсе электронов $4,1 \times 10^{17}$ эл/см² происходит фазовый переход из тригональной (пр. гр. R $\bar{3}m$) в кубическую структуру (пр. гр. Fm $\bar{3}m$).

Достоверность результатов исследования подтверждается использованием комплекса взаимодополняющих методов физического эксперимента, современных высокоточных оборудований, современного программного обеспечения полнопрофильного анализа «FullProf» для расчета рентгенограммы, хорошей воспроизводимостью результатов, непротиворечивостью их с общезначимыми представлениями и совпадением с литературными данными.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов заключается в установлении закономерностей влияния высокоэнергетических электронов на структуру и морфологию нанотрубок и нанопокровов, а полученные результаты по структурным параметрам пополняют и расширяют мировую базу данных по кристаллографии.

Практическое значение результатов определяется тем, что они могут найти применение в аэрокосмической отрасли, например, в качестве радиационно-защитных материалов, для защиты оборудования от вредного

воздействия радиации, а также служат экспериментальной базой данных для разработки технологии нанесения покрытий в области физики твердого тела и материаловедения.

Внедрение результатов исследования. Основные полученные результаты по определению структуры и размеров нанокристаллитов углеродных нанотрубок и углеродсодержащих нанопокровов, облученных электронами, были внедрены в образовательный процесс Каракалпакского государственного университета в рамках программы бакалавриата по курсу «Физика твердого тела» и магистратуры по специальному курсу «Физика конденсированного состояния» (справка Каракалпакского государственного университета № 01-21-04/2878 от 21.12.2022), а именно:

выводы о том, что одностенные углеродные нанотрубки имеют двухфазную, а многостенные углеродные нанотрубки однофазную гексагональную структуру, которые сохраняются при облучении, а также обнаружение в Рамановском спектре облученных одностенных углеродных нанотрубок нового пика (805 см^{-1}), связанного с появлением дефектов, а облученных многостенных углеродных нанотрубок – уменьшения интенсивности и сдвига в сторону низких частот пика D' , относящегося к аморфному гидрогенизированному углероду. Использование научных результатов позволило углубить представления студентов о современных проблемах физики конденсированного состояния;

выводы о характере зависимости параметров решетки и размеров нанокристаллитов от облучения электронами образцов многостенных углеродных нанотрубок, нанопокровов $(\text{ZrTi})\text{CN}$ и $(\text{TiHfTa})\text{CN}$, об изменении шероховатости поверхности нанопокровов и плотности дислокаций. Использование научных результатов позволило расширить представления студентов о фазовых превращениях в твердых телах.

Апробация результатов исследования. Результаты исследования обсуждались на 4 международных и республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 3 научные статьи в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации основных научных результатов диссертаций, из них 2 – в зарубежных научных журналах.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 131 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность темы диссертации, определено соответствие проведенных исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, изложена степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи исследования,

приведены сведения об объектах, предметах и методах исследования, изложены научная новизна и практические результаты исследования, раскрыты научная и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения о внедрении результатов исследования, апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе **«Углеродные нанотрубки, наноразмерные покрытия, их морфология и структура»** приводится обзор литературного материала о структуре, морфологии, дефектах и размерах наночастиц, нанотрубок, и нанопокровов, а также имеющиеся данные о воздействии на них радиации. На основе анализа литературного материала, в конце главы сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе диссертации **«Объекты для исследования и методика экспериментов»** обоснован выбор объектов исследования, приведены сведения о способе их получения, изложены специфические особенности использованных методов исследования. В качестве основных методов исследования использовались рентгеновская дифракция, Рамановская спектроскопия, сканирующий электронный микроскоп, атомно-силовой микроскоп и для облучения использовались высокоэнергетические электроны.

Для исследования структуры кристаллов использовались рентгеновские дифрактометры XRD-6100 (Shimadzu, Япония) и Empyrean 3 (Malvern Panalytical) с характеристическим рентгеновским излучением.

Рамановская спектроскопия образцов проводилась с использованием установки компании Renishaw. Спектры комбинационного рассеяния регистрировали при комнатной температуре с возбужденным аргоновым ионным лазером 532 нм в диапазоне $100\text{--}30000\text{ см}^{-1}$.

Сканирующую электронную микроскопию (SEM EVO MA 10) (Carl Zeiss) использовали для определения состава и характера распределения элементов на поверхности образцов (ZrTi)CN и (TiHfTa)CN. Для определения равномерности распределения нанокompозитов по поверхности образца было просканировано более 35 точек. По результатам SEM нанопокровов (ZrTi)CN состоит из следующих компонентов: Zr – 44,7 (0,4) %, Ti – 6,9 (0,1) %, C – 18,7 (0,3) %, N – 26,1 (0,5) % и Fe – 3,6 (0,1), а нанокompозиты распределены равномерно. На поверхности нанокompозита (TiHfTa)CN установлено равномерное распределение элементов следующего состава: Ti – 44,7 (0,2) %, Hf – 29,9 (0,2) %, N – 13,9 (0,3) %, Ta – 8,0 (0,2) %, C – 3,0 (0,1) % и Fe – 0,4 (0,1) %. В обоих образцах Fe является материалом подложки.

С помощью атомно-силовой микроскопии (НТ-МДТ) исследована топография поверхности образцов (ZrTi)CN и (TiHfTa)CN.

Облучения образцов осуществлялись на базе ускорителя электронов «Электроника У003» ускоренными электронами с энергией $\sim 2\text{ МэВ}$ при плотности тока пучка на образце $0,17\text{ мкА/см}^2$.

Рентгенограммы (дифрактограммы) образцов анализировали с помощью программы «FullProf», определяли структуру образцов, индексы Миллера,

расстояние между плоскостями, размеры нанокристаллитов и плотность дислокаций.

В третьей главе «Исследование влияния электронных пучков на структуру, морфологию и Рамановскую спектроскопию одностенных и многостенных углеродных нанотрубок, нанопокровов» представлены результаты влияния высокоэнергетических электронных пучков на структуру, размеры, дефекты, шероховатость, хиральность, электронные свойства углеродных нанотрубок и углеродосодержащих нанопокровов.

В параграфе 3.1 «Исследование влияния электронных пучков на структуру и Рамановскую спектроскопию одностенных и многостенных углеродных нанотрубок» представлены результаты рентгеноструктурного, Рамановского спектроскопического анализов одностенных (ОСУНТ) и многостенных углеродных нанотрубок (МСУНТ).

Для определения структуры и пространственных групп ОСУНТ проведены расчеты дифрактограмм ОСУНТ, которые обрабатывались по методу Ритвельда с помощью программы «FullProf», исходя из предположения существования следующих фаз: кубической (пространственная группа (далее пр.гр.) $Fd\bar{3}m$), гексагональной (пр.гр. $P6_3/mmc$, $P6_3/mc$, $P6/mmm$) и тригональной (пр.гр. $R\bar{3}m$) (рис.1). Расчеты показали, что образец ОСУНТ состоит из двух гексагональных фаз (пр.гр. $P6/mmm$ и $P6_3/mc$), при этом Брэгговский фактор $\chi^2=2,09$.

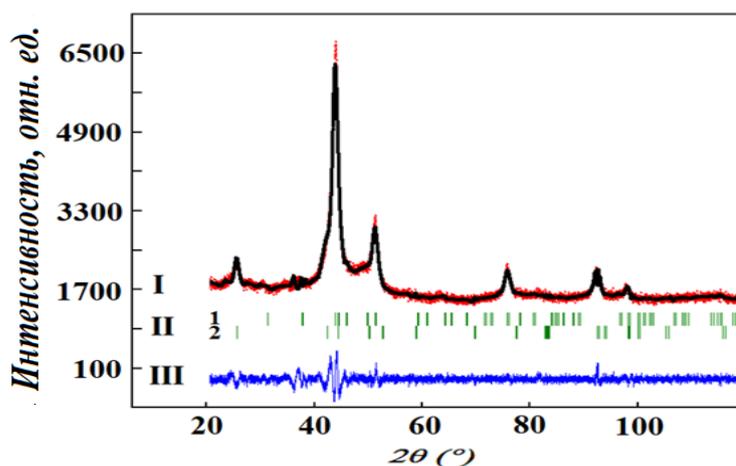


Рис.1. Рентгеновская дифрактограмма исходного ОСУНТ: I – экспериментальные (-), расчетные данные (-), II – Брэгговские рефлексы, III – разность экспериментальных и расчетных данных

Сравнение рентгенограмм образцов ОСУНТ до и после облучения разными флюенсами электронов показало, что только рефлекс (200) сдвигается в сторону большего угла рассеяния с увеличением флюенса облучения. Обнаружено увеличение расстояния между связями C=C в образце после облучения.

По рентгенограммам образцов, облученных флюенсом электронов $1,18 \times 10^{17}$ и $1,54 \times 10^{17}$ эл/см², определяли параметры элементарных ячеек двух фаз (табл.1).

Таблица 1

Параметры гексагональных элементарных ячеек в образцах ОСУНТ до и после облучения: 1 фаза – (пр.гр. $R\bar{6}/mmm$) и 2 фаза – (пр.гр. $R\bar{3}/m\bar{c}$)

Флюенс, эл/см ²	$a, b(\text{Å})$		$c(\text{Å})$	
	Фаза1	Фаза2	Фаза1	Фаза2
0	4,7623±0,0002	2,4630±0,0001	3,9491±0,0003	6,9538±0,0004
$1,18 \times 10^{17}$	4,8286±0,0003	2,4647±0,0003	3,9394±0,0003	6,8383±0,0004
$1,54 \times 10^{17}$	4,9378±0,0003	2,5022±0,0002	3,9469±0,0002	6,9878±0,0003

На Рамановской спектроскопии режим РРД (режим радиального дыхания) в ОСУНТ наблюдался при частотах 169 см^{-1} и 168 см^{-1} для исходного и облученного образцов, соответственно (рис. 2). Значение диаметра нанотрубки (d_t) оказалось равным $1,42 \text{ нм}$ для исходного и $1,43 \text{ нм}$ для образца, облученного флюенсом $1,54 \cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$.

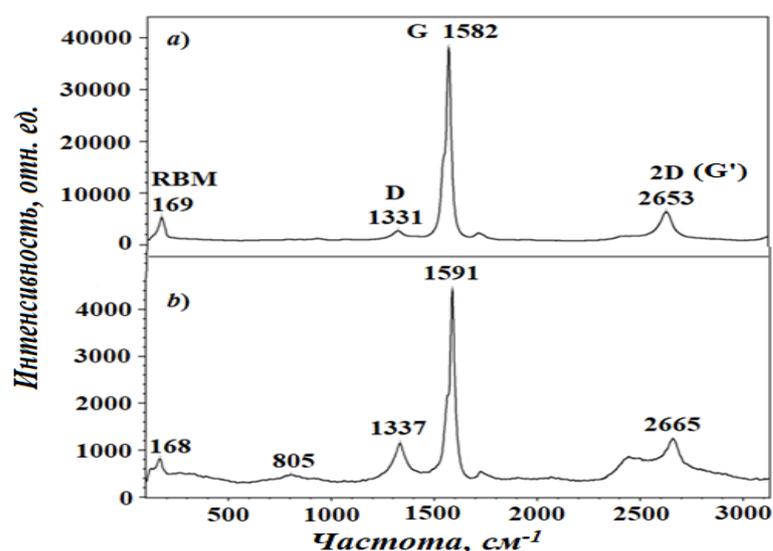


Рис.2. Рамановские спектры ОСУНТ: а) исходной, б) облученной флюенсом электронов $1,54 \times 10^{17} \text{ эл/см}^2$

По величинам диаметров нанотрубок, определенным по частоте РРД, индексы хиральности (n, m) нанотрубки оказались равными для необлученного образца $18,0$ и для облученного – $15,5$. По структуре нанотрубки типа «кресла» являются металлическими ($n = m$), два других типа — «зигзаг» ($n = 0$ или $m = 0$) и хиральный ($0 < \theta < 30^\circ$) могут быть металлическими или полупроводниковыми в зависимости от их хиральности. Если $(n-m)$ кратно 3, то углеродная трубка проявляет металлические свойства, если не кратно 3, то полупроводниковые. Исходя из определенных индексов хиральности для ОСУНТ можно сделать вывод о том, что исходный образец имеет металлические, а облученный – полупроводниковые свойства.

На Рамановском спектре исходного образца пик при 1582 см^{-1} соответствует полосе G (рис. 2а), которая при облучении электронами

флюенсом $1,54 \times 10^{17}$ эл/см² «сместилась» до 1591 см⁻¹ со снижением её интенсивности (рис. 2b). Асимметрия пика G указывает на то, что данный спектр состоит из G⁺ и G⁻ связи, где G⁺ связан с переносом заряда, а G⁻ – с металлической или полупроводниковой проводимостью одностенной углеродной нанотрубки. Одним из важных результатов является установление смещения полосы G после облучения электронами, так как значение 1582 см⁻¹ соответствует металлической проводимости, а 1591 см⁻¹ может указать на полупроводниковый характер проводимости. Также наблюдалось смещение пика D-полосы с 1331 см⁻¹ в исходном (рис. 2a) до 1337 см⁻¹ в облученном образце (рис. 2b). Изменение интенсивности D – полосы после электронного облучения образцов свидетельствует о присутствии дефектов. В исходном и облученном образцах обнаружены полосы G' при 2653 см⁻¹ и 2665 см⁻¹, соответственно, которые характерны для нанотрубок и графита. В Рамановских спектрах отношение интегральных интенсивностей полос D и G (I_D/I_G) используется для оценки степени аморфизации системы. После электронного облучения ОСУНТ увеличилось отношение I_D/I_G с 0,04 до 0,26, которое непосредственно является мерой качества структуры УНТ. По данному отношению можно утверждать, что качество структуры ОСУНТ из-за образовавшихся дефектов ухудшилось.

После облучения ОСУНТ электронами флюенсом $1,54 \times 10^{17}$ эл/см² на Рамановской спектре обнаружен пик при 805 см⁻¹, который обусловлен образованием точечных дефектов в облученном образце.

Расчеты рентгенограмм МСУНТ показали, что исходный образец в отличие от ОСУНТ является однофазным с гексагональной структурой (пр. гр. R6₃/mс) и параметрами элементарной ячейки: $a=b=2,4398$ Å и $c=6,6637$ Å (табл. 2).

Сравнение рентгенодифракционных данных МСУНТ, облученных различными флюенсами электронов, свидетельствует об уменьшении интенсивности рефлекса (002) облученных образцов и наличии смещения в сторону малых углов с увеличением флюенса электронов, что связано с увеличением параметров решетки. Межслойное расстояние d_{002} , являющееся показателем степени графитизации, увеличилось с 0,3424 нм (в исходном образце) до 0,3474 нм в облученном флюенсом $5,1 \times 10^{17}$ эл/см² образце.

Таблица 2

Параметры элементарной ячейки необлученного и облученного электронами образцов МСУНТ

Флюенс, эл/см ²	a,b, Å	c, Å	χ^2	R _б Брэгг фактор	R _ф структурный фактор
0	2,4398±0,0001	6,6637±0,0002	1,15	1,03	1,11
$2,3 \times 10^{17}$	2,5042±0,0001	6,7672±0,0002	1,13	1,54	1,31
$3,1 \times 10^{17}$	2,5327±0,0002	6,9048±0,0003	2,15	1,79	1,86
$4,0 \times 10^{17}$	2,5417±0,0001	6,9705±0,0002	1,36	1,12	1,97
$5,1 \times 10^{17}$	2,5504±0,0003	6,9800±0,0001	1,57	2,54	2,56

Зависимость параметров элементарной ячейки МСУНТ $a=b$ и c от флюенса x показана на рис.3. Это соотношение выражается следующей (1) функцией:

$$f(x) = \frac{A1-A2}{1+e^{-\frac{(x-x_0)}{d_x}}} + A2 \quad (1)$$

Здесь $f(x)$ — параметры элементарной ячейки, $A1$ — начальный параметр кристаллической решетки, $A2$ — последний параметр кристаллической решетки, x_0 и d_x — свободные параметры модели, которые подгоняются к экспериментальным точкам. Оптимальное значение параметра x_0 близко среднему арифметическому значению $A1$ и $A2$.

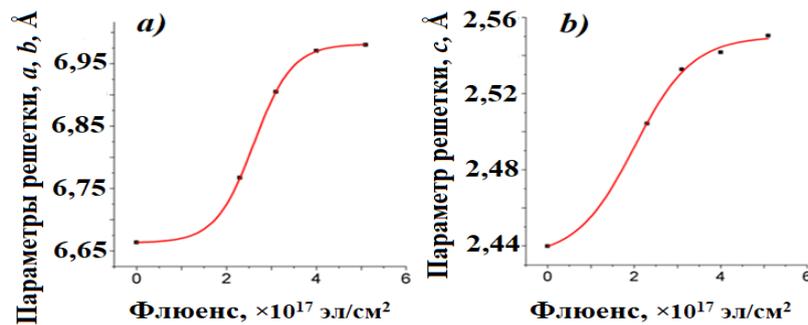


Рис. 3. а) Зависимости параметров элементарной ячейки МСУНТ a и b от флюенса электронов: черные точки — экспериментальные результаты (формула (1) с параметрами $x_0 = 2.01 \times 10^{17}$ эл/см² и $d_x = 0.66 \times 10^{17}$ эл/см²); б) — кривая зависимости параметра решетки c МСУНТ от флюенса электронов: черные точки — экспериментальные результаты (формула (1) с параметрами $x_0 = 2,61 \times 10^{17}$ эл/см² и $d_x = 0,43 \times 10^{17}$ эл/см²)

Получены Рамановские спектры исходного и облученного электронами образцов МСУНТ. В исходном образце пик РРД присутствует при 124 см⁻¹ и внутренний диаметр равен 2,05 нм. После облучения электронами флюенсом $5,1 \times 10^{17}$ эл/см² пик РРД сместился до 120 см⁻¹, а внутренний диаметр облученного образца равен 2,13 нм. На Рамановском спектре полоса D исходного МСУНТ идентифицируется при 1347 см⁻¹, а облученного электронами флюенсом $5,1 \times 10^{17}$ эл/см² — при 1340 см⁻¹. Интенсивность полосы D облученного образца выше, чем исходного, что свидетельствует об увеличении дефектов в образце после облучения флюенсом $5,1 \times 10^{17}$ эл/см². Полоса G присутствует при 1590 см⁻¹ в исходном и при 1579 см⁻¹ в облученном флюенсом электронов $5,1 \times 10^{17}$ эл/см² образце. Полоса D' на плече полосы G с максимумом при 1612 см⁻¹ в исходном образце «происходит» от аморфного гидрогенизированного углерода (a:H-C), который рассматривается как вид дефектной графитовой структуры. Интенсивность пика G (1612 см⁻¹) относительно высока по сравнению с интенсивностью пика D' (1601 см⁻¹) не только в исходном, но и в облученном образце. В исходном образце МСУНТ при 2686 см⁻¹ присутствует полоса G'. Следует отметить, что полоса D лучше всего подходит для выявления возникновения беспорядка в системе, тогда как полосу G' лучше всего использовать для изучения и количественной оценки степени беспорядка

решетки, вызванного именно легированием. После облучения флюенсом $5,1 \times 10^{17}$ эл/см² G'-полоса обнаружена при 2681 см^{-1} , и ее интенсивность увеличилась по сравнению с исходной. Соотношение интегральных интенсивностей I_D/I_G исходного и облученного образцов рассчитывали по площади кривых, причем I_D/I_G растет с увеличением количества дефектов на боковой стенке. Увеличение отношения I_D/I_G с 1,45 до 1,50 свидетельствует об увеличении дефектов при облучении МСУНТ электронами.

Результаты морфологического и структурного анализа углеродосодержащих нанокомпозитов под действием электронов различных флюенсов представлены в параграфе 3.2, озаглавленном «Влияние пучка быстрых электронов на морфологию и структуру нанопокровов (ZrTi)CN, (TiHfTa)CN».

Топография поверхности нанокомпозита с (ZrTi)CN-покрытием до и после облучения исследовалась в 2D и 3D режимах с размеров скана $2 \times 2 \text{ мкм}$ с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). Обнаружено уменьшение (сглаживание) шероховатости поверхности образца после облучения электронами. Среднее значение шероховатости поверхности, определенное с использованием формата 2D, для исходного образца $R_a=26,80 \text{ нм}$, а после облучения флюенсами $0,2 \times 10^{17}$ эл/см² и $2,3 \times 10^{17}$ эл/см² соответственно $R_a=13,83$ и $R_a=12,22 \text{ нм}$.

Изучение фазовой диаграммы сложного карбида и нитридных систем показало, что в системах (ZrTi)CN в основном образуются фазы, которые существуют в двоичных соединениях циркония и титана. На рис. 4 представлена рентгенограмма образца нанокомпозитного покрытия (ZrTi)CN.

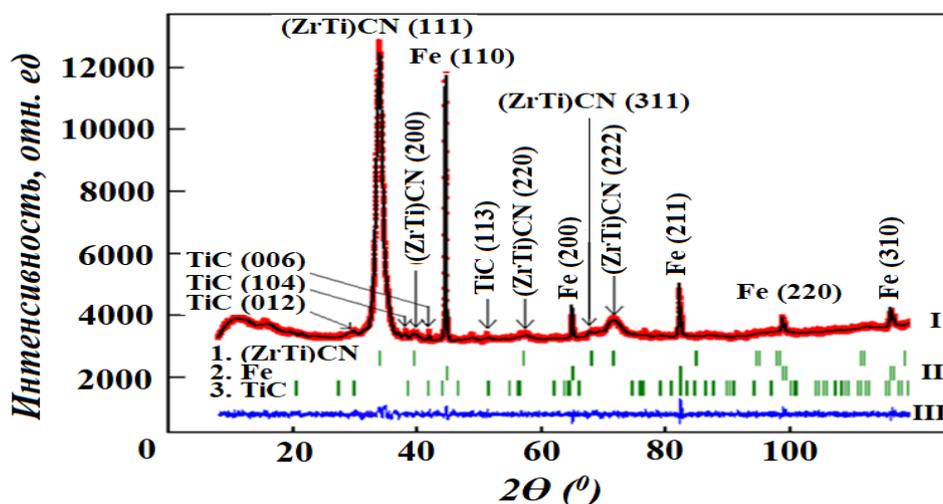


Рис.4. Рентгеновская дифрактограмма исходного (ZrTi)CN: I – экспериментальные (-) и расчетные данные (-), II – Брэгговские рефлексы, III – разность экспериментальных и расчетных данных

В углеродосодержащем нанокомпозитном нанопокрове установлено существование карбида титана TiC_x с экспериментальными рефлексами $2\theta_B = 20,4939^\circ; 29,8360^\circ; 38,3982^\circ; 41,6828^\circ$ и $51,2885^\circ$, соответствующими тригональной структуре (пр.гр. $R\bar{3}m$) и многокомпонентного нанокомпозита

(ZrTi)CN с кубической элементарной ячейкой (пр.гр. $Fm\bar{3}m$). На рентгенограмме также присутствовали рефлексы, соответствующие железу (пр. гр. $Im\bar{3}m$) (из подложки образца). Результаты анализа дифрактограммы представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры элементарных ячеек нанопокртия (ZrTi)CN до и после облучения различными флюенсами электронов

Флюенс, эл/см ²	Параметры элементарной ячейки, $a, b, c, \text{Å}$		R_B Брэгг фактор	R_f структурный фактор
	(ZrTi)(CN), пр.гр. ($Fm\bar{3}m$)	TiC _x , пр. гр. ($R\bar{3}m$)		
0	4,5687±0,0002	$a=b=3,9047\pm0,0002$; $c=12,9899\pm0,0004$	2,75	1,85
$0,2\times 10^{17}$	4,5697±0,0003	$a=b=3,8957\pm0,0003$; $c=12,9899\pm0,0005$	1,09	2,86
$2,3\times 10^{17}$	4,5741±0,0003	$a=b=3,8716\pm0,0001$; $c=12,9798\pm0,0004$	2,06	1,47
$3,1\times 10^{17}$	4,5762±0,0002	$a=b=3,9752\pm0,0002$; $c=12,9247\pm0,0003$	1,15	2,45

При облучении электронами флюенсом $4,1\times 10^{17}$ эл/см² на рентгенограмме (ZrTi)CN присутствовали все отражения, за исключением рефлексов с $2\theta_B = 20,4939^\circ$ и $29,8360^\circ$, соответствующих тригональной структуре карбида титана (рис.5.). Расчеты показали, что рефлексы соответствуют кубической фазе (пр.гр. $Fm\bar{3}m$) с параметром элементарной ячейки $a=4,3019\text{Å}$. Полная ширина рефлексов на половине максимума их интенсивностей в тригональной структуре (пр.гр. $R\bar{3}m$) больше, чем соответствующее значение в кубической элементарной ячейке (пр.гр. $Fm\bar{3}m$), что видно из рис. 5. Это является еще одним доказательством структурного перехода из тригональной структуры в кубическую.

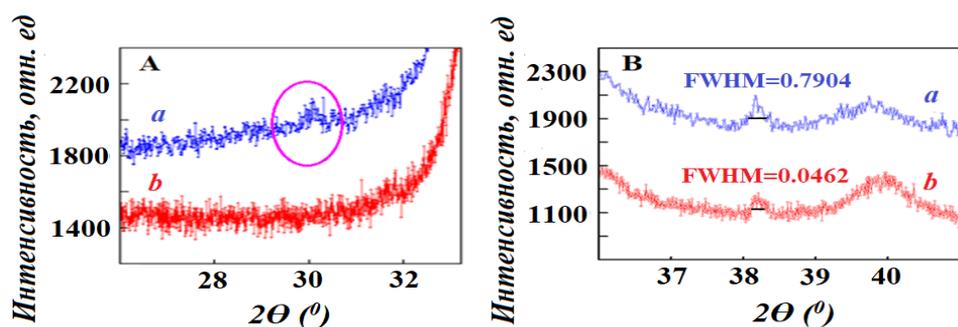


Рис. 5. Участок дифрактограммы (ZrTi)CN, исходного (a) и облученного электронами $4,1\times 10^{17}$ эл/см² (b) в диапазоне $2\theta_B = 26^\circ - 33^\circ$ (A) и диапазоне $2\theta_B = 36^\circ - 41^\circ$ (B)

С помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) исследована топография поверхности исходного и облученного нанокompозита (TiHfTa)CN. Средние значения (R_a) шероховатости поверхности определены с использованием 2D формата и $R_a = 2,67$ нм до

облучения, а в облученных флюенсом электронов $0,2 \times 10^{17}$ эл/см², $1,5 \times 10^{17}$ эл/см² и $4,5 \times 10^{17}$ эл/см² образцах $R_a = 2,91$ нм, $25,2$ нм и $35,2$ нм, соответственно. После облучения шероховатость поверхности нанокompозита (TiHfTa)CN увеличилась в 13,2 раза, скорее всего из-за движения дислокации в направлении к поверхности.

На рентгенограмме (TiHfTa)CN идентифицированы гранцентрированная кубическая (пр.гр. $Fm\bar{3}m$) и объемноцентрированная кубическая фазы (пр.гр. $Im\bar{3}m$) (рис.6.).

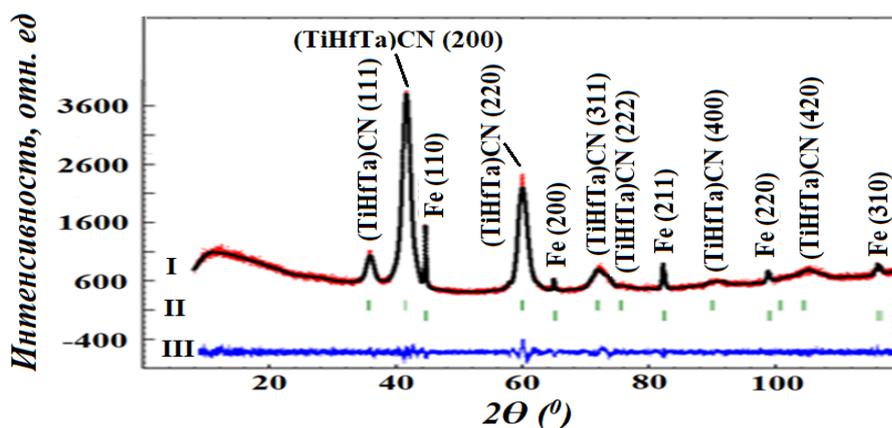


Рис.6. Рентгеновская дифрактограмма исходного (TiHfTa)CN: I - экспериментальные (-) и расчетные данные (-), II – Брэгговские рефлексы, III – разность экспериментальных и расчетных данных

В таблице 4 приведены результаты параметров элементарной ячейки исходного и облученного образцов. Видно, что параметры элементарной ячейки нанокompозита (TiHfTa)CN растут с увеличением флюенса электронов, а при флюенсе $4,5 \times 10^{17}$ эл/см², наоборот, параметры решетки уменьшаются. Расстояние между атомами также увеличилась при облучении до флюенса $3,5 \times 10^{17}$ эл/см² и уменьшилось при флюенсе $4,5 \times 10^{17}$ эл/см².

Таблица 4

Параметр элементарных ячеек исходного и облученного нанопокpытия (TiHfTa)CN

Флюенс, эл/см ²	<i>a, b, c</i>	R_b Брэгг фактор	R_f структурный фактор
0	4,3649±0,0002	2,14	1,56
$0,2 \times 10^{17}$	4,3649±0,0003	2,01	2,16
$1,5 \times 10^{17}$	4,3666±0,0002	1,41	1,65
$2,5 \times 10^{17}$	4,3896±0,0003	2,24	1,55
$3,5 \times 10^{17}$	4,4199±0,0003	2,17	1,22
$4,5 \times 10^{17}$	4,3628±0,0004	2,75	1,08

С увеличением флюенса электронов содержание аморфной фазы сокращается, а при флюенсе $4,5 \times 10^{17}$ эл/см² появился новый рефлекс за счет кристаллизации.

В параграфе 3.3 «Нанокристаллиты и плотности дислокаций в углеродных нанотрубках и нанопокpытиях», рассмотрено влияние флюенса

электронов на размеры нанокристаллитов и плотности дислокаций нанотрубок и углеродсодержащих нанопокровов.

Расчеты по определению размера нанокристаллитов (D) проводились с использованием метода построения диаграммы Вильямсона-Холла по уравнению Стокса. Для определения микронапряжений (ϵ) и плотности дислокаций (σ) использовался рентгеноструктурный анализ. Обнаружено, что размер нанокристаллитов ОСУНТ с увеличением флюенса электронов до $1,54 \times 10^{17}$ эл/см² растет, а значение микронапряжения и плотности дислокаций уменьшилось (табл. 5).

Расчеты по определению размера нанокристаллитов МСУНТ проводились по формуле Дебая-Шеррера. Выявлено, что размер нанокристаллитов с увеличением флюенса электронов до $5,1 \times 10^{17}$ эл/см² растет, а значение плотности дислокаций уменьшилось (табл. 5).

Таблица 5

Размеры нанокристаллитов, плотность дислокации и микронапряжения в ОСУНТ и МСУНТ

	ОСУНТ			МСУНТ				
	0	1,18	1,54	0	2,3	3,1	4,1	5,1
Флюэнс, эл/см ² , $\times 10^{17}$	0	1,18	1,54	0	2,3	3,1	4,1	5,1
D, нм	4,06± 0,02	4,09± 0,02	5,04± 0,03	9,35± 0,01	9,37± 0,01	9,39± 0,01	9,41± 0,01	9,46± 0,01
$\sigma \times 10^{12}$, см ⁻²	6,07± 0,01	5,98± 0,01	3,95± 0,01	1,144± 0,002	1,139± 0,002	1,134± 0,002	1,129± 0,002	1,117± 0,002
ϵ , $\times 10^{-3}$	8,42± 0,02	8,11±0, 02	7,62±0, 01	-	-	-	-	-

В таблице 6 приведены размеры нанокристаллитов, значения микронапряжений и плотность дислокаций нанопокровов (ZrTi)CN и (TiHfTa)CN.

Таблица 6

Размеры нанокристаллитов, значения микронапряжений и плотности дислокаций нанопокровов (ZrTi)CN и (TiHfTa)CN

Образец	Флюэнс, эл/см ²	D, нм	ϵ , $\times 10^{-3}$	$\delta \times 10^{12}$, см ⁻²
(ZrTi)CN	0	17,06±0,03	10,21±0,04	0,34±0,04
	$0,2 \times 10^{17}$	19,99±0,02	10,01±0,02	0,25±0,02
	$2,3 \times 10^{17}$	20,12±0,02	9,84±0,03	0,24±0,02
	$3,1 \times 10^{17}$	20,28±0,03	9,15±0,05	0,23±0,01
	$4,1 \times 10^{17}$	21,51±0,02	8,30±0,03	0,21±0,01
(TiHfTa)CN	0	7,30±0,03	5,38±0,06	1,88±0,08
	$0,2 \times 10^{17}$	12,24±0,04	3,87±0,08	1,02±0,05
	$1,5 \times 10^{17}$	20,69±0,03	1,31±0,09	0,23±0,06
	$2,5 \times 10^{17}$	23,73±0,03	1,30±0,07	0,18±0,07
	$3,5 \times 10^{17}$	24,23±0,03	1,29±0,05	0,17±0,06
	$4,5 \times 10^{17}$	27,34±0,02	1,20±0,05	0,13±0,04

Обнаружено, что с увеличением флюенса электронов размеры нанокристаллитов нанопокровтий (ZrTi)CN и (TiHfTa)CN растут, а значения микронапряжения и плотности дислокаций уменьшаются.

Установлен экспоненциальный характер зависимости размера нанокристаллитов МСУНТ от флюенса электронов (рис.7), который описывается функцией:

$$\Phi = \Phi_0 - \rho e^{-D/t} \quad (2)$$

здесь Φ – флюенс электронов, Φ_0 – значение, равное $6,70(0,18) \times 10^{17}$ эл/см², ρ и t – свободные параметры модели, которые подгоняются к экспериментальным точкам: $\rho = 909,10(11,30) \times 10^{17}$ эл/см², $t = 1,91(0,44)$ нм.

Характер зависимости размеров нанокристаллитов (ZrTi)CN от флюенса электронов (рис.7) описывается формулой:

$$D = D_0 e^{a - \frac{b}{\Phi + c}} \quad (3)$$

здесь D – размер нанокристаллита; $D_0 = 1$ нм; Φ – флюенс электронов; свободные параметры модели, которые подгоняются к экспериментальным точкам $a = 3,06 \pm 0,03$, $b = 0,07(0,01) \times 10^{17}$ эл/см², $c = 0,35(0,03) \times 10^{17}$ эл/см² – постоянные величины.

Зависимость размера нанокристаллитов (TiHfTa)CN от флюенса электронов (рис. 7) описывается формулой:

$$D = D_0 - \rho e^{-\Phi/t} \quad (4)$$

здесь $D_0 = 26,82(1,68)$ нм, Φ – флюенс электронов, ρ и t свободные параметры модели, которые подгоняются к экспериментальным точкам: $\rho = 18,4(1,8)$ нм, $t = 1,35(0,42) \times 10^{17}$ эл/см².

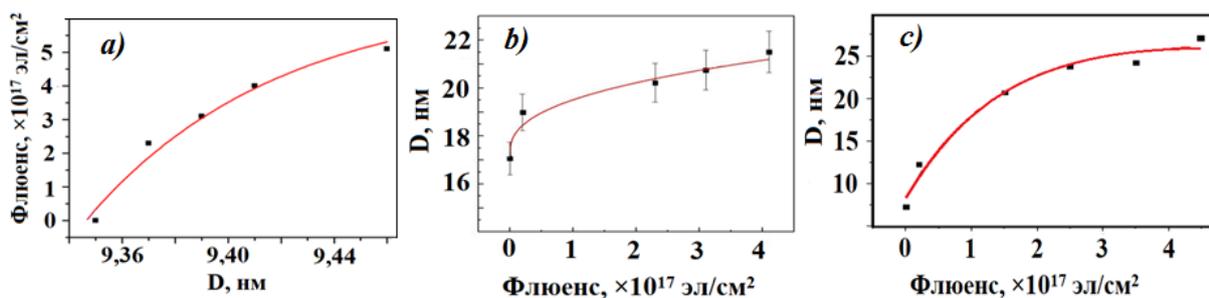


Рис.7. Зависимости размера нанокристаллитов МСУНТ (a), (ZrTi)CN (b), (TiHfTa)CN (c) от флюенса электронов: черные точки – экспериментальные результаты

Анализ полученных результатов по влиянию электронного облучения на структуру ОСУНТ показал увеличение параметров решетки, которое объясняется смещением атомов и образованием дефектов. Облучение ОСУНТ электронами высокой энергии способствовало также перестройке поверхности и изменению размеров из-за наличия вакансий на стенках ОСУНТ, «созданных» высокоэнергетическими электронами.

Облучение ОСУНТ электронами флюенсом $1,54 \times 10^{17}$ эл/см² стимулирует переход от металлической к полупроводниковой проводимости. На основе данных Рамановской спектроскопии рост интенсивности полосы D после электронного облучения можно было бы объяснить увеличением содержания аморфного углерода, однако её ширина меньше ~ 100 см⁻¹, а также на малых углах рассеяния рентгенограммы отсутствует широкий размытый пик, характерный для аморфного углерода. Все это свидетельствует о том, что облучение не способствует образованию аморфного углерода в ОСУНТ, а указывает на образование дефектов другого типа (разрыв связи C=C).

Необходимо отметить, что в результате облучения электронами плотность дислокаций в ОСУНТ и МСУНТ уменьшается. Вследствии радиационного отжига происходит кристаллизация неупорядоченных плоскостей.

С учетом приведенной выше информации вакансии, образующиеся за счет снижения микронапряжений на стенках нанотрубок, воссоединяются по «механизму застежки-молнии», а дислокации в нем движутся винтообразно и к кончику нанотрубки. Это также можно объяснить переходом металл – полупроводник.

Кристалличность образцов растет с ростом флюенса электронов, что можно определить по отношению интегральной интенсивности кристаллического отражения к интегральной интенсивности аморфного составляющего, имеющего место быть в малых углах рассеяния. После облучения электронами флюенсом $4,1 \times 10^{17}$ эл/см² значение этого отношения изменяется от 4,05 до 4,66 в (ZrTi)CN и от 2,04 до 9,83 в (TiHfTa)CN (рис. 8).

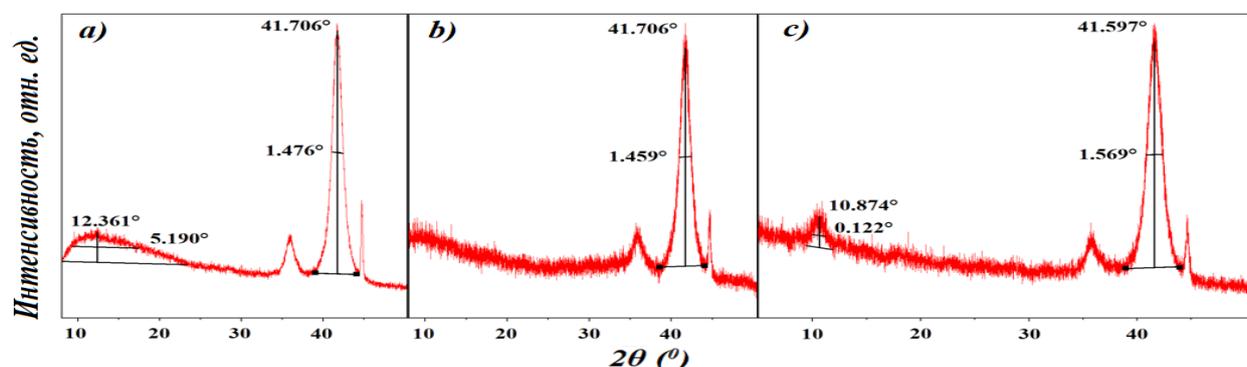


Рис.8. Участок рентгенограммы исходного (a) и облученного флюенсом электронов $2,5 \times 10^{17}$ и $4,5 \times 10^{17}$ эл/см² (b, c) (TiHfTa)CN

Увеличение размера нанокристаллитов в (ZrTi)CN связано с уменьшением границ раздела за счет их роста и слияния под воздействием облучения. Рост кристаллитов происходит по механизму двумерного зародышеобразования на поверхности покрытой изломами, ступенями, на дислокациях и расширяясь заполняет всю поверхность, а потом на образовавшемся слое возникает новый двумерный зародыш, происходит послынный рост. Этот механизм роста, скорее всего соответствует (ZrTi)CN и (TiHfTa)CN. В исходном (ZrTi)CN присутствовали поверхностные дефекты и примеси, которые «порождают» высокое микронапряжение и относительно

небольшую плотность дислокации. В исходном (TiHfTa)CN присутствовали трехмерные или объемные дефекты (т.е. в образце может присутствовать другая фаза, но не на поверхности кристалла), однако эти дефекты сопровождаются дислокациями, что подтверждается высокой плотностью дислокаций и низким значением микронапряжения. Таким образом, в результате облучения (ZrTi)CN и (TiHfTa)CN размеры кристаллитов увеличились по механизму двумерного зародышеобразования на поверхности дефектного слоя, дислокации перемещались по спирали, которые приводили к изменению шероховатости поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) на тему: «Структура и размеры нанокристаллитов углеродных нанотрубок и углеродосодержащих (ZrTi)CN, (TiHfTa)CN нанопокровов, облученных электронами» сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что в образце ОСУНТ существуют две гексагональные структуры с пространственной группой $R6/mmm$ и $R6_3/mc$. Облучение ОСУНТ электронами флюенсом до $1,54 \times 10^{17}$ эл/см² способствует увеличению параметров решетки a и b от $4,7623 \text{ \AA}$ до $4,9378 \text{ \AA}$, уменьшению параметра решетки c от $3,9491 \text{ \AA}$ до $3,9469 \text{ \AA}$, увеличению размера нанокристаллитов от $4,06 \text{ нм}$ до $5,03 \text{ нм}$, а также приводит к росту микронапряжений при увеличении флюенса электронов.

2. Облучение ОСУНТ электронами флюенсом $1,54 \times 10^{17}$ эл/см² стимулирует переход от металлической к полупроводниковой проводимости, о чем свидетельствует изменение хиральных индексов от $18,0$ для исходного до $15,5$ для облученного образцов.

3. При облучении МСУНТ флюенсами электронов до $5,1 \times 10^{17}$ эл/см² установлено увеличение параметров решетки a и b на $4,5 \%$, c на $4,8 \%$, что связано с появлением точечных дефектов (вакансий, смещения атомов), размер нанокристаллитов увеличился до $\sim 1,1 \text{ \AA}$, определена зависимость параметров решетки МСУНТ и размера кристаллитов от флюенса электронов.

4. Рентгеноструктурные исследования исходных нанокompозитных покрытий показали, что (ZrTi)CN состоит из двух фаз: кубической (пр. гр. $Fm\bar{3}m$) - (ZrTi)CN и тригональной (пр. гр. $R\bar{3}m$) - TiC_x , а (TiHfTa)CN является однофазным с кубической структурой (пр. гр. $Fm\bar{3}m$).

5. Облучение образца (ZrTi)CN электронами энергией 2 МэВ флюенсом до $4,1 \times 10^{17}$ эл/см² приводит к изменению параметров решетки, при флюенсе электронов $4,1 \times 10^{17}$ эл/см² происходит фазовый переход из тригональной (пр. гр. $R\bar{3}m$) в кубическую структуру (пр. гр. $Fm\bar{3}m$).

6. Облучение нанопокровов (ZrTi)CN флюенсом электронов $2,3 \times 10^{17}$ эл/см² стимулирует улучшение шероховатости поверхности в $2,2$ раза, облучение флюенсом $4,1 \times 10^{17}$ эл/см² приводит к увеличению размера

нанокристаллитов на 21%, уменьшению плотности дислокаций на 38% и микронапряжения на 19%.

7. Облучение образца (TiHfTa)CN электронами энергией 2 МэВ флюенсом до $3,5 \times 10^{17}$ эл/см² приводит к увеличению параметров решетки, а при флюенсе электронов $4,5 \times 10^{17}$ эл/см² происходит радиационных отжиг и параметры решетки приближаются к своему исходному значению.

8. Установлено, что при облучении (TiHfTa)CN флюенсом $4,5 \times 10^{17}$ эл/см² происходит рост шероховатости поверхности в 13,2 раза, размер нанокристаллитов увеличивается на 73%, плотность дислокаций и микронапряжения уменьшаются на 93% и 78%, соответственно.

9. Значительная разница в изменении параметров при облучении электронами для и (TiHfTa)CN объясняется их исходной структурой: если в исходном (ZrTi)CN присутствуют двумерные или поверхностные дефекты, то в (TiHfTa)CN – трехмерные или объемные дефекты.

10. Экспериментальные результаты (структура, шероховатость, размеры нанокристаллитов, диаметр нанотрубок, микронапряжение, плотность дислокации, влияние флюенса электронов) свидетельствует о возможности нанесения в качестве покрытия углеродных нанотрубок на (ZrTi)CN, (TiHfTa)CN с целью улучшения их эксплуатационных характеристик (износ, трение, сцепление, шероховатость, прочность) с использованием электронного облучения для управления некоторыми параметрами и свойствами нанотрубок и нанопокровтий.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ON AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**

INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS

YULDASHOVA IRODAKHON IKROMOVNA

**STRUCTURE AND SIZES OF NANOCRYSTALLITES OF CARBON
NANOTUBES AND CARBON-BASED (ZrTi)CN, (TiHfTa)CN
NANOCOATINGS, IRRADIATED BY ELECTRONS**

01.04.07 – Condensed matter physics

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

Tashkent - 2023

The dissertation theme of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences has been registered at the Supreme Attestation Commission at the Ministry of higher education, science and innovations of the Republic of Uzbekistan under No. B2022.4.PhD/FM546.

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian and English (abstract)) languages on the website of the Scientific Council at www.inp.uz and on the website «Ziyonet» Informational and educational portal at www.ziyonet.uz

Scientific supervisor: **Tashmetov Mannab Yusupovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents: **Nuritdinov Izzatillo**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Tashmukhamedova Dilnoza Artikbayevna
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization: **Fergana state university**

The defense of the dissertation will be held on «____» _____ 2023, at ____ at the meeting of Scientific Council No. DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: Institute of nuclear physics, Ulugbek settlement, 100174 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-41; fax (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz)

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through at the Information Resource Centre of the Institute of Nuclear Physics (registered under No. _____) Address: INP, Ulugbek settlement, 100214 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-41.

The abstract of dissertation was distributed on «____» _____ 2023.
(Registry record № _____ dated «____» _____ 2023).

I.I.Sadikov
Deputy chairman of the Scientific Council
on award of Scientific degrees,
D.t.s., Professor

O.R.Tojiboev
Scientific secretary of the Scientific Council
on award of Scientific degrees,
PhD on ph.-m.s., senior scientific researcher

E.M. Tursunov
Chairman of the Scientific seminar
of the Scientific Council
on award of Scientific Degrees,
D.ph.-m.s., Professor

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

The aim of the research is to determine the dependences of influence of electrons of different fluences on the structures and sizes of nanocrystallites of nanotubes and carbon-based multicomponent nanocoatings.

The tasks of the research:

researching the influence of electrons of various fluences with an energy of 2 MeV on the structure and spectroscopy of single-walled and multi-walled carbon nanotubes;

determination of the state of defects and nanocrystallites when exposed to single-walled and multi-walled carbon nanotubes by fast electrons of various fluences;

researching the influence of electrons of various fluences with an energy of 2 MeV on the morphology and structure of (ZrTi)CN nanocoatings;

studying the changes in dislocation density and nanocrystallites as a result of the effect of electrons of different fluences on (ZrTi)CN nanocoatings;

studying the effect of electrons of various fluences with an energy of 2 MeV on the morphology and structure of (TiHfTa)CN nanocoatings;

analysing the influence of electrons of different fluences on the dislocation density and nanocrystallites of (TiHfTa)CN nanocoatings;

The objects of the research work are single-walled, multi-walled carbon nanotubes and (ZrTi)CN, (TiHfTa)CN carbon-based nanocoatings.

The subject of the researchwork is the effect of fast electrons of various fluences on the structure and size of nanocrystallites of carbon nanotubes and (ZrTi)CN, (TiHfTa)CN carbon-based nanocoatings.

The methods of research. X-ray diffraction method, Rietveld method, Raman spectroscopy, atomic force microscopy and scanning electron microscope methods.

The scientific novelty of the research is as follows:

it has been established that single-walled carbon nanotubes are two-phase (sp. gr. P6/mmm and P6₃/mc), and multi-walled carbon nanotubes are single-phase with a hexagonal structure (sp. gr. P6₃/mc), which are preserved under irradiation with fluences up to 1.54×10^{17} el/cm² and 5.1×10^{17} el/cm², respectively;

for the first time in the Raman spectrum of single-walled carbon nanotubes at a fluence of 1.54×10^{17} el/cm², a new peak at 805 cm⁻¹ was found, associated with the appearance of point defects during irradiation and in multi-walled carbon nanotubes, the D' peak (1612 cm⁻¹), which refers to amorphous hydrogenated carbon, when irradiated with a fluence of 5.1×10^{17} el/cm², shifts towards low frequencies (1601 cm⁻¹) with a decreasing intensity was established;

it was found for the first time that the surface roughness during irradiation of (ZrTi)CN nanocoating with a fluence of 2.3×10^{17} el/cm² decreases by 2.2 times, (TiHfTa)CN with a fluence of 4.5×10^{17} el/cm² increases by 13.2 times due to the two-dimensional nucleation growth that occurs on the surface associated with the spiral movement of the dislocation towards the upper layer of the nanocoating;

it was established for the first time that the dependence of lattice parameters and nanocrystallite sizes on electron irradiation of samples of multi walled carbon nanotubes, (ZrTi)CN and (TiHfTa)CN nanocoatings has an exponential character, and the dislocation density decreases with increasing irradiation to a fluence of 5.1×10^{17} el/cm².

Practical results of research consist of the following:

the phase groups of single-walled carbon nanotubes were determined and it was found that irradiation with electrons with an energy of 2 MeV up to 1.54×10^{17} el/cm² leads to an increase in the lattice parameters *a* and *b* by 4%, nanocrystallite sizes by 19% and an increase in microstresses;

it was determined that after irradiation with an electron fluence of 1.54×10^{17} el/cm², the diameter of single walled carbon nanotubes changes by 1.2% and a metal-semiconductor transition occurs;

it was found that when multi walled carbon nanotubes are irradiated with electron fluences up to 5.1×10^{17} el/cm², the lattice parameters *a* and *b* increase by 4.5%, *c* by 4.8%, which is associated with the appearance of point defects, the dependence of the lattice parameters and size of crystallites on electron fluence;

it was found that irradiation of a (ZrTi)CN sample with 2 MeV electrons with a fluence of up to 4.1×10^{17} el/cm² leads to a change in the lattice parameters; at an electron fluence of 4.1×10^{17} el/cm², a phase transition from trigonal (sp. $R\bar{3}m$) into a cubic structure (sp. gr. $Fm\bar{3}m$).

The reliability of the research results of the study is confirmed by the use of a complex of complementary methods of physical experiment, modern high-precision equipment, modern full-profile analysis software “FullProf” for calculating X-ray patterns, good reproducibility of the results, their consistency with general physical concepts and coincidence with literature data.

Scientific and practical significance of the research results. The scientific significance of the results lies in establishing the regularities of the influence of high-energy electrons on the structure and morphology of nanotubes and nanocoatings, and the results obtained on structural parameters replenish and expand the world database on crystallography.

The practical significance of the results is determined by the fact that they can be used in the aerospace industry, for example, as radiation-shielding materials to protect equipment from the harmful effects of radiation, and also serve as an experimental database for the development of coating technology in the field of solid-state physics and materials science.

Implementation of research results.

The main results obtained on determining the structure and size of nanocrystallites of carbon nanotubes and carbon-based nanocoatings irradiated by electrons were introduced into the educational process of Karakalpak State University within the framework of the undergraduate program in the course “Solid-state physics” and the master’s program in the special course “Condensed Matter Physics” (letter from Karakalpak State University No. 01-21-04/2878 dated 12/21/2022), namely:

conclusions that single-walled carbon nanotubes have a two-phase, and multi-walled carbon nanotubes a single-phase hexagonal structure, which are preserved under irradiation, as well as the detection in the Raman spectrum of irradiated single-walled carbon nanotubes of a new peak (805 cm^{-1}), associated with the appearance of defects and irradiated multi walled carbon nanotubes to reduce the intensity of the shift towards low frequencies of the peak D', which refers to amorphous hydrogenated carbon. The application of scientific results made it possible to deepen students' perceptions of modern problems of condensed matter physics;

conclusions about the nature of the dependence of lattice parameters and nanocrystallite sizes on electron irradiation of samples of multi walled carbon nanotubes, (ZrTi)CN and (TiHfTa)CN nanocoatings, changes in the surface roughness of nanocoatings and dislocation density. The use of scientific results made it possible to expand students' understanding of phase transformations in solids.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, three chapters, a conclusion and a list of references. The volume of the dissertation is 131 pages.

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

I bo'lim (1 часть; part 1)

1. Yuldashova I.I., Tashmetov M.Yu. The influence of electron beams to structure parameters of multi walled carbon nanotube // *Physica B: Condensed Matter*. – Elsevier (Netherlands), 2019. – No.571(2). – pp. 280-284. (№1.Web of Science; IF = 2.436).
2. Tashmetov M.Yu., Yuldashova I.I., Ismatov N.B. Surface structure, nanocrystallite and defects in (ZrTi)CN nanocomposite irradiated by electron beam // *International Journal of Modern Physics B*. – World Scientific (Singapore), 2021. – Vol. 35, No. 08. – id.2150111. (№ 3. Scopus; IF = 1.219).
3. Yuldashova I.I., Tashmetov M.Yu. Single-walled carbon nanotube structure and radiation defects under the high energy electron beam // *O'zbekiston fizika jurnali*. – Tashkent: Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 2021.-No.23(2).-pp. 33–39 (01.00.00.№5)

II bo'lim (2 часть; part 2)

4. Yuldashova I.I., Tashmetov M.Yu., Sattarova Sh.G. The influence of electron beam to nanoparticles // *The Bulletin of Young Scientists*. – Tashkent, 2019. – № 1(3). – pp.131-135
5. Tashmetov M.Yu., Yuldashova I.I., Nazarov X.T. Elektronlar bilan nurlantirilgan (TiHfTa)CN nanokompozitining strukturasi va kristallitlar o'lchami // Preprint O'zR FA YaFI. –Toshkent: O'zR FA YaFI, 2022. – № P-9-725. – 18b.
6. Tashmetov M.Yu., Yuldashova I.I., Abdurakhimov B.A. Surface and structure of (ZrTi)CN nanocomposite coating // *International Scientific Forum "Nuclear science and technologies"* dedicated to the 60th anniversary of the Institute of Nuclear Physics. September 12-15, 2017. – Almaty, 2017. – pp.274.
7. Yuldashova I.I., Tashmetov M.Yu., Ismatov N.B., Nabiyeu M. Effect of electron beam on structure and surface of nanosized $(Zr_{1-x}Ti_x)(C_yN_{1-y})$ alloy // IX International conference "Modern problems of nuclear physics and nuclear technologies". September 24-27, 2019. – Tashkent, 2019. – pp.233-235.
8. Yuldashova I.I., Tashmetov M.Yu. Raman spectroscopy on irradiated single wall carbon nanotube with high e-beam // *International Conference o Young Scientists "Science and Innovation"*. November 1, 2019. – Tashkent, 2019. – pp. 216-217.
9. Yuldashova I.I., Tashmetov M.Yu. Study of the morphology and structure of (TiHfTa)CN nanocomposites under the electron irradiation // *International scientific-practical conference "The role of advanced innovative technologies and education in solving problems of automation and energy"*. June 24-25, 2021. – Namangan, 2021. – pp. 84-86.