

**O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI
YADRO FIZIKASI INSTITUTI**

Qo‘lyozma huquqi asosida
UDK 538.911: 669.018.95: 54.062: 549.086: 539.1.043

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)
ilmiy darajasini olish uchun yozilgan
DISSERTATSIYA

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

Toshkent - 2023

MUNDARIJA

KIRISH	6
I BOB. Uglrodli nanonaychalar, nanoo'lchamli qoplamalar va ularning morfologiyasi, strukturasi hamda Raman spektroskopiyasi	13
1.1-§. Bir va ko'p devorli uglrod nanonaychalari strukturasi hamda Raman spektroskopiyasi tadqiqotlari.....	13
1.2-§. Ko'p tarkibli nanoqoplamalar olish, ularning morfologiyasi va strukturasi	22
1.3-§. Nanokristallitlarning o'sish mexanizmlari va ularni aniqlash usulari	30
1.4-§. Radiatsiyaning nanonaychalar va nanoqoplamalar strukturasi, morfologiyasi hamda Raman spektroskopiyasiga ta'siri.....	41
Birinchi bob bo'yicha xulosalar.....	50
II BOB. Tajriba usullari va namunalar kristall strukturalarini hisoblash	52
2.1-§. Rentgen difraksiyasi usuli.....	52
2.2-§. Raman spektroskopiyasi usuli.....	55
2.3-§. Skanerlovchi elektron mikroskop va atom-kuch mikroskopi usullari.....	59
2.4-§. Namunani nurlantirish usuli.....	66
2.5-§. Fullprof dasturi.....	69
Ikkinchi bob bo'yicha xulosalar.....	74
III BOB. Elektronlar dastasining bir va ko'p devorli uglrod nanonaychalari, nanoqoplamalar strukturasi, morfologiyasi hamda Raman spektroskopiyasiga ta'sirini o'rganish	76
3.1-§. Elektronlar dastasining bir va ko'p devorli uglrod nanonaychalari strukturasi hamda Raman spektroskopiyasiga ta'siri tadqiqoti.....	76
3.1.1. BDUNNning rentgenostrukturaviy natijalari va tahlillari.....	76

3.1.2. BDUNNning Raman spektroskopiyasi natijalari va tahlillari.....	78
3.1.3. KDUNNning rentgenostrukturaviy natijalari va tahlillari.....	80
3.1.4. KDUNNning Raman spektroskopiyasi natijalari va tahlillari.....	84
3.2-§. Yuqori energiyali elektronlar dastasining (ZrTi)CN, (TiHfTa)CN nanoqoplamalar morfologiyasi va strukturasi ta'siri.....	86
3.2.1. (ZrTi)CN nanokompozitining SEM hamda AKM dagi morfologik natijalari va tahlillari.....	86
3.2.2. (ZrTi)CN nanokompozitining rentgenostrukturaviy natijalari va tahlillari.....	88
3.2.3. (TiHfTa)CN nanokompozitining SEM hamda AKM dagi morfologik natijalari va tahlillari.....	90
3.2.4. (TiHfTa)CN nanokompozitining rentgenostrukturaviy natijalari va tahlillari.....	93
3.3-§. Uglerodli nanonaychalar va nanoqoplamalar nanokristallitlari hamda dislokatsiya zichliklari.....	95
3.3.1. BDUNN va KDUNN nanokristallitlari hamda dislokatsiya zichliklari.....	95
3.3.2. (ZrTi)CN va (TiHfTa)CN nanoqoplamalar nanokristallitlari hamda dislokatsiya zichliklari.....	98
Uchinchi bob bo'yicha xulosalar.....	104
XULOSA.....	106
FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YHATI.....	108

KIRISH

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'pkomponentli 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 me'yoriy-huquqiy xujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertasiya muayyan darajada xizmat qiladi.

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,

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.

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 hamda spektroskopiyasiga 2 MeV energiyali turli flyuentsdagi elektronlar ta'sirini o'rganish;

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

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

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

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

(TiHfTa)CN nanoqoplama dislokatsiya zichligi va nanokristallitlarga turli flyuentsdagi 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 flyuentsli tez elektronlar ta'siridan iborat.

Tadqiqotning usullari: rentgen nurlari difraksiyasi usuli, Rietveld 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 flyuentsga qadar saqlanishi aniqlangan;

birinchi marta bir devorli uglerodli nanonaychalar Raman spektrida $1,54 \times 10^{17}$ el/sm² flyuentsda 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 yuza 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 nanoqoplamlar namunalarining $5,1 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensga qadarnurlantirilgan 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 nanonaychaning 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 siljishini aniqlandi. Ilmiy natijalardan foydalanish

talabalarning 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 notekisligi va dislokatsiya zichligi o'zgarishi haqida xulosalar qilingan. Ilmiy natijalardan foydalanish talabalarning 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 adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiya hajmi 131 betni tashkil qiladi.

Dissertatsiyaning asosiy natijalari quyidagi isharda nashr etildi:

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. – 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)

4. Yuldashova I.I., Tashmetov M. Yu., Sattarova Sh. G. The influence of electron beam to nanoparticles // Ёш олимлар ахборотномаси. – 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'zRes FA YFI. – Toshkent: O'zRes FA YFI, 2022. – № P-9-725. – 18 b.

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.

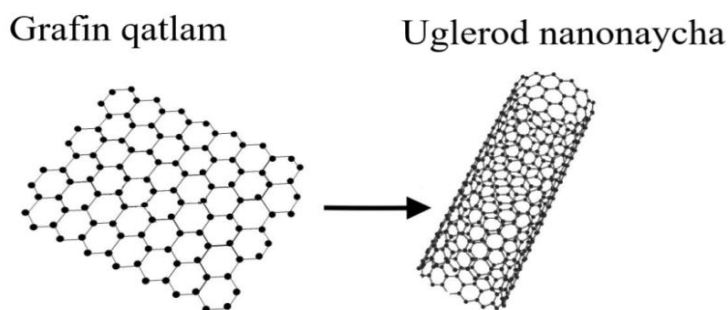
8. Yuldashova I.I., Tashmetov M.Yu. Raman spectroscopy on irradiated single wall carbon nanotube with high e-beam // International Conference o Young Scientists “Science and Innovation”. November 1, 2019. – Tashkent, 2019. – pp. 216-217.

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.

I BOB. UGLERODLI NANONAYCHALAR, NANOOLCHAMLI QOPLAMALAR VA ULARNING MORFOLOGIYASI, STRUKTURASI HAMDA RAMAN SPEKTROSKOPIYASI

1.1-§. Bir va ko'p devorli uglerod nanonaychalari strukturasi hamda Raman spektroskopiyasi tadqiqotlari

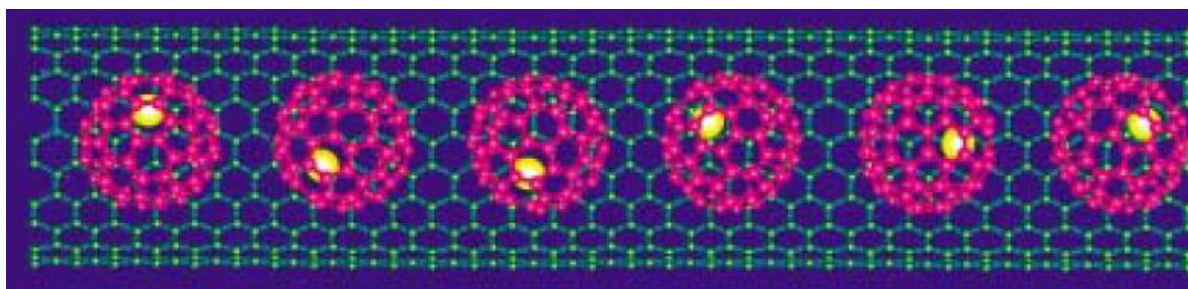
Uglerodli nanonaycha (UNN) – bu nisbatan oddiy tuzilishga, uglerod atomlarining ma'lum joylari va bog'lanishlariga, metall va (yoki) yarimo'tkazgich o'tkazuvchanligiga ega bo'lgan qulay model ob'ektidir. Unda milliondan ortiq uglerod atomlari mavjud bo'lib, diametri 1 nm atrofida, uzunligi esa bir necha 10 mikron bo'lgan naychasimon molekuladir (1.1-rasm). Nanonaychalar odam soch tolasidan 100 ming marta ingichka bo'lishiga qaramay, juda mustahkamdir [1]. Mehanik kuchlanish ta'sirida nanonaychalar uzilmaydi, sinmaydi, balki joyini almashtirib oladi. Ulardan o'ta yengil va o'ta mustahkam kompozitsion moddalar yaratish mumkin. UNN yuqori mustahkamligi, yengilligi, qattiqligi, egiluvchanligi, issiqlik va elektr o'tkazuvchanligi tufayli noyob materiallardir. Ular elektr energiyasini saqlashga yordam berish uchun ishlatilishi mumkin, masalan, superkondensatorlar uchun yaxshi elektrodlar yaratish orqali [2]. UNNlar suvni tozalash va dengiz suvini tuzsizlantirib, arzon narxlarda ichimlik suvini ishlab chiqarishda foydali bo'lishi ko'rsatilgan [3]. Ular bir necha jihatdan ichi bo'sh grafit tolalariga o'xshaydi, faqat ularning struktura mukammalligi darajasi yuqori.



1.1-rasm. Uglerod nanonaychasining tuzilishi [4]

Nanonaychalar ichiga boshqa moddalar atomlarini kiritish yo'li bilan nanonaychalarning elektron xossalarini o'zgartirishi mumkin. Dastlab

tadqiqotchilar tomonidan nanonaychalar ichiga fullerenlar zanjiri joylangan bo‘lib, uning ichiga esa gadolinij atomlari kiritilgan [5]. Bunday strukturaning elektr xossalari oddiy bo‘sh nanonaychalar va ichiga bo‘sh fulleren joylashgan nanonaycha xossalaridan katta farq qiladi. Ushbu struktura quyidagicha belgilanadi: $Gd@C_{60}@SWNT$ (SWCNT – single walled carbon nanotube), bu bir devorli nanonaycha ichida C_{60} , uning ichida Gd (1.2-rasm) mavjud ekanligini ifodalaydi.

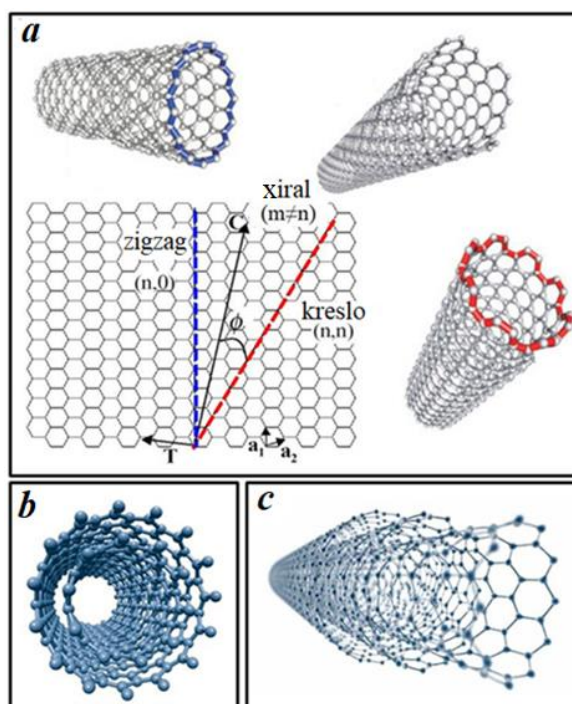


1.2-rasm. $Gd@C_{60}@SWNT$ ning tuzilishi [5]

Nanonaychalar turli shakllarda bo‘ladi: bir devorli (*a*), ikki devorli (*b*), ko‘p devorli (*c*), to‘g‘ri va spiralsimon (1.3-rasm). BDUNNni batafsil o‘rganish natijalari, ularni azot, kislorod, vodorod atomlari va og‘irroq atomlar “kiritilgan” aralashmalar sifatida murakkabroq nanokomponentlarni o‘rganishda foydalanishga imkon beradi. Kirishma atomlari tomonidan buzilishlar bog‘lanish energiyasining o‘zgarishiga, uglerod atomlarining ideal holatidan siljishiga va bular esa simmetriya o‘zgarishiga olib kelishi mumkin.

Ko‘p devorli atamasi BDUNNlardan farqli o‘laroq, naycha devorlari bir nechta grafen qatlamlaridan iborat bo‘lgan vaziyatni anglatadi. Ko‘p devorli uglerodli nanonaycha (KDUNN) devorining grafitga o‘xshash tuzilishi, nanometr kattalikdagi kanal, sp^2 uglerod bilan qurilgan yuzasi va boshqa xususiyatlarga ega [6].

Ikki olti burchakli markazlarni bog‘laydigan vektorga xiral vektor deyiladi va u BDUNN tuzilishini aniqlaydi.



1.3-rasm. Devorlari soniga qarab uglerodli nanonaychalarning tuzilishi va modellari: a) Bir devorli uglerodli nanonaychalar (BDUNN), ularning xirallik funksiyalari (zigzag, kreslo va xiral); b) Ikki devorli uglerodli nanonaychalar (IDUNN); c) Ko‘p devorli uglerodli nanonaychalar (KDUNN) [7]

Xiral vektor C ni $C = na_1 + ma_2$ shaklida yozish mumkin, bu erda a_1 va a_2 grafen panjarasining bazis vektorlari (1.4 a -rasm). Butun sonlar jufti (n,m) xiral indeks yoki xirallik deb ataladi. Bu shuni anglatadiki, bitta devorli uglerod nanonaycha tuzilishi butunlay xirallik bilan belgilanadi [8].

BDUNN diametri (d_t) va xiral burchak (θ) quyidagicha aniqlanadi [8]:

$$d_t = C_h/\pi = a_{CC} \sqrt{3(m+n+mn)}/\pi \quad (1.1)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}m}{2n+m} \quad (1.2)$$

Naycha uchlari $n = m$ ($\theta = 30^\circ$) bo‘lganda “kreslo” shaklida va $m = 0$ ($\theta = 0^\circ$) bo‘lganda “zigzag” shaklida bo‘ladi. Agar $n - m > 0$ bo‘lsa, BDUNN o‘ng qo‘l, aks holda chap qo‘l hisoblanadi (1.4 a -rasm) [8].

BDUNNning elektron tuzilishi olti burchakli Brilliyen zonasiga muvofiq bir qatlamli grafendan kelib chiqishi mumkin. BDUNNning Brilliyen zonasini grafen

Brillyuen zonasida kesilgan teng oraliqlarga ega parallel chiziqlar to‘plami sifatida ko‘rish mumkin (1.4 b-rasm.). BDUNNlar $(m - n) \text{ MOD } 3 = 0, 1 \text{ va } 2$ ga ko‘ra uchta guruhga bo‘linadi. MOD-0 BDUNN uchun kesish chizig‘i K nuqtasini kesib o‘tadi (valentlik va o‘tkazuvchanlik zonalarini tegadi) va shuning uchun u Fermi energiyasida holatlarning uzluksiz zichligi (DOS) bilan metallidir (1.4 c-rasm). Ruxsat etilgan kesish chiziqlari K nuqtasini kesib o‘tmaganligi sababli, MOD-1 va MOD-2 BDUNNlar yarim o‘tkazgichdir, ular xiralikka bog‘liq o‘tish energiyasini (E_{ii}) ko‘rsatadi (1.4 d-rasm) [8].

[9] mualliflari tomonidan birinchi va ikkinchi Van Hove optik o‘tishlaridan keng ko‘lamli yarim o‘tkazgich nanonaychalar uchun strukturaning funksiyasi sifatida ishlatilgan va diametri 0,48 dan 2,00 nm gacha bo‘lgan barcha 127 ta yarim o‘tkazgich nanonaycha strukturalarining ro‘yxatini n va m qiymatlarini oshirish tartibida keltirilgan. Diametr, xiral burchak va MOD ($n - m, 3$) qiymatlarini ko‘rsatadigan ustunlardan so‘ng, quyidagi tenglamalarda taxmin qilinganidek, birinchi Van Hove emissiyasi va ikkinchi Van Hove yutilishi uchun to‘lqin uzunliklari, chastotalar va foton energiyasi berilgan [9].

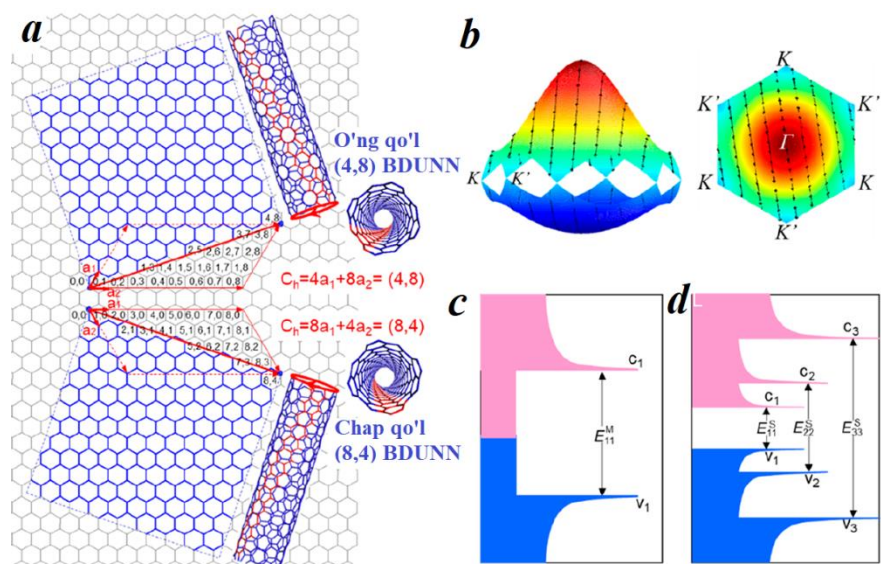
$$\bar{\nu}_{11}(\text{mod } 1) = \frac{1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-1}}{157.5 + 1066.9 d_t} - 771 \text{ cm}^{-1} \frac{[\cos(3\alpha)]^{1.374}}{d_t^{2.272}} \quad (1.3)$$

$$\bar{\nu}_{11}(\text{mod } 2) = \frac{1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-1}}{157.5 + 1066.9 d_t} + 347 \text{ cm}^{-1} \frac{[\cos(3\alpha)]^{0.886}}{d_t^{2.129}} \quad (1.4)$$

$$\bar{\nu}_{22}(\text{mod } 1) = \frac{1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-1}}{145.6 + 575.7 d_t} + 1326 \text{ cm}^{-1} \frac{[\cos(3\alpha)]^{0.828}}{d_t^{1.809}} \quad (1.5)$$

$$\bar{\nu}_{22}(\text{mod } 2) = \frac{1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-1}}{145.6 + 575.7 d_t} - 1421 \text{ cm}^{-1} \frac{[\cos(3\alpha)]^{1.110}}{d_t^{2.497}} \quad (1.6)$$

Yuqorida Van Hovening birinchi va ikkinchi o‘tish chastotalari uchun aniqlangan empirik funksiyalar keltirilgan bo‘lib, ularda o‘rtacha xatolik $\bar{\nu}_{11}$ uchun 10 sm^{-1} (1,3 meV) va $\bar{\nu}_{22}$ uchun 40 sm^{-1} (5 meV) ekanligi aniqlangan [9]. Bu ularni 0,5 nm dan katta diametrli nanonaychalar uchun qo‘llash afzalligini anglatadi.

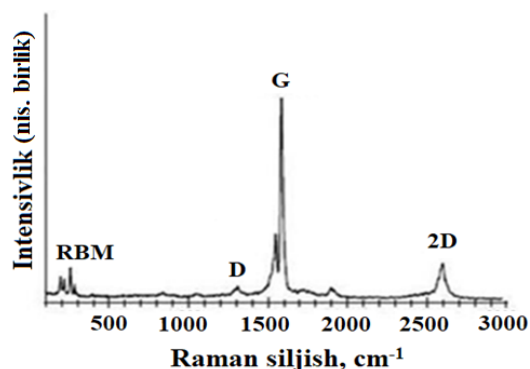


1.4-rasm. (a) Grafen qatlamlaridan o‘ralgan o‘ng qo‘l (8,4) va chap qo‘l (4,8) BDUNN ning sxematik tasviri. (b) Birinchi Brilliyen zonasidagi grafen qatlamining o‘tkazuvchanlik va valentlik diapazonlari uchun hisoblangan energiya dispersiyasi (E va k) konturlari. O‘ng, yon ko‘rinish; chap, vertikal ko‘rinish. (c, d) DOS sxemalari va m (metall) - BDUNN (c) va s (yarim o‘tkazgich) - BDUNN (d) ning tegishli elektron o‘tishlari [8]

UNNlarning diametrlar taqsimotini, xiralligini, tozaligini va arxitekturasini aniqlash uchun Raman spektroskopiyasi qimmatli usuldir [10-27]. Vibratsiya xususiyatlari, elektron strukturasi, namunalar sifati va turli xil uglerodli materiallarning diametr tavsifini, shu jumladan BDUNN [11-14], ikki devorli (IDUNN) [15] va ko‘p devorli (KDUNN) uglerodli nanonaychalar [10, 16] ni Raman spektroskopiyasi orqali tahlil qilish mumkin.

UNNlar Raman spektrlarida asosan RBM (radial breathing mode) “radial nafas olish” rejimlari, yuqori chastotali D (buzilishlar), G (grafit) va G' (Ramanning D-rejimidan ikkinchi darajali tarqalishi) rejimlar kuzatiladi [10]. D, G va G' rejimlari grafitda aniqlangan bo‘lsa ham, RBM BDUNN ga xos bo‘lib, naychaning izotrop radial kengayishining ifodasi hisoblanadi (1.5-rasm). UNNlarning RBM rejimi past chastotali rejim bo‘lib, UNN tarkibidagi barcha uglerod atomlari radial yo‘nalishda sinxron ravishda harakat qiladi va bu esa

«nafas olish» ga o‘xshash effekt hosil qiladi [6, 17]. Ushbu rejim faqat UNNlarga xosdir va boshqa uglerod modifikatsiyalarida kuzatilmaydi [10].



1.5-rasm. UNN ning Raman spektri [16]

Raman spektridagi RBM tebranish chastotasi qiymati UNN diametrini yuqori aniqlikda baholash, xiral-indeks turlarini ajratish yoki konglomeratlarini tavsiflash uchun standart to‘g‘ridan to‘g‘ri usul bo‘lib [11, 17-20], u d_t nanonaycha diametri bilan quyidagi ifoda orqali bog‘langan:

$$\omega_{RBM} = \frac{A}{d_t} + B \quad (1.7)$$

bu erda ω_{RBM} tebranish chastotasi, A va B esa parametrlardir va har bir naychalar uchun ular farq qiladi [6, 15]. Ba’zi mualliflar [19, 21] diametrni aniqlashda faqat doimiy A ni hisobga olishadi. Keltirilgan eksperimental va nazariy A qiymatlari 220 va 260 sm^{-1} nm orasida; B esa 0 dan 20 sm^{-1} gacha o‘zgarib turadi. [19], [22] da mualliflarning tanlovi boshqa hisob-kitoblar bilan juda yaxshi miqdoriy kelishuvga ega,

$$\omega_{RBM} = \frac{227}{d_t} \sqrt{1 + C_{env} d_t^2} \quad (1.8)$$

bu erda C_{env} atrof-muhitning RBM chastotasiga ta’sirini aniqlaydi va adabiyotlarda aksariyat namunalar uchun 0,056 nm^{-2} qiymat olingan.

IDUNNni KDUNNning bir turi deb hisoblash mumkin, buning uchun ichki va tashqi nanonaychalar orasidagi qatlamlararo o‘zaro ta’sir odatda turbostratik hisoblanadi. IDUNNning kreslo tuzilishi uchun ba’zi bir mutanosib tuzilishni

kutish mumkin va 3D grafitda kuzatiladigan G-rejimining bo'linishini ko'rish mumkin [6]. Ko'plab lazer energiyalari uchun RBMni o'lchash orqali ma'lum bir BDUNN nanonaychalarning diametrli taqsimotini topish mumkin [12]. Shunday qilib G-rejim barcha sp^2 uglerodli materiallar tebranishlari bilan chambarchas bog'liq bo'lgan uglerod nanonaychasining o'ziga xos xususiyati hisoblanadi. G-rejimning eng muhim jihati - bu nanonaychaning yarim o'tkazgich yoki metall bo'lishiga bog'liq bo'lgan xarakterli Raman spektri hisoblanib, bu ikkala turni ham ajratib turishga imkon beradi. Ushbu rejimda ko'rsatilgan ikkita komponent aylana yo'nalishi bo'yicha tebranishlar bilan bog'liq bo'lgan past chastotali (G^-) va yuqori (G^+) nanonaycha o'qining G yo'nalishi bo'yicha tebranishlariga bog'liq. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, (G^-) komponent nanonaychaning diametriga bog'liq, (G^+) esa metall va yarim o'tkazgichli nanonaychalarga bog'liq bo'lib, diametrga bog'liqlikni ko'rsatmaydi [21]. D va G' -rejimlarining xususiyatlari bitta nanonaychada yarim o'tkazgich va metall BDUNNning Raman spektrlarida ikkalasi ham kuzatiladi. Grafitdagi D-rejim grafen qatlamining asosiy simmetriyasini buzadigan nuqsondagi tarqalishni o'z ichiga oladi. U g'ovak, kirishmalar yoki boshqa simmetriyani buzadigan nuqsonlarni o'z ichiga olgan sp^2 uglerodlarida kuzatiladi. Boshqa tomondan, ikkinchi darajali G' -rejim nuqsonga bog'liq elastik tarqalish jarayonini ifodalamaydi, u nuqsonsiz sp^2 uglerodlar uchun kuzatiladi. Ushbu rejimlar nanonaychalarning buralganligi (xiralligi) va diametriga [6, 28] hamda lazer bilan qo'zg'alish energiyasiga bog'liqligini ko'rsatadi [13].

Barcha rezonansli Raman effektlarini tahlil qilish interfaol o'tishlarning Kataura uchastkasini kiritish orqali osonlashdi, E_{ii} (n, m) ning barcha qiymatlari uchun d_t ning funksiyasi sifatida, nanonaychadagi har bir juft indeks E_{ii} o'tish energiyasining noyob to'plamiga ega, bu grafit qatlami uchun doimiy energiya konturlarining trigonal burilish ta'siriga bog'liq [12].

KDUNNlar diametri o'nlab nanometr bo'lgan silindr shaklida o'ralgan konsentrik grafen qatlamlardan tashkil topgan [14]. Odatda KDUNN uchun tashqi naychalarning katta diametri va ular tarkibidagi kichikdan juda kattagacha bo'lgan diametrli uglerodli nanonaychalar ansambli tufayli KDUNNda BDUNNdagi

Raman spektrlarining grafit spektrlaridan ajratib turadigan xarakterli farqlarning aksariyati yaqqol sezilmaydi. Masalan, kichik diametrli ichki naycha (2 nm dan kam) bilan bog'liq bo'lgan RBM Raman xususiyati ba'zida yaxshi rezonans holati aniqlanganda kuzatilishi mumkin. Bu kamdan – kam uchraydigan natija, chunki katta diametrli naychalardan RBM signali kuzatilishi uchun juda zaif va naychanning ichki diametrlari ansamblining o'rtacha ko'rsatkichi signalni kengaytiradi [6]. $G^+ - G^-$ bo'linish kichik diametrli BDUNN naychalari uchun katta bo'lsa, KDUNNdagi G bandining mos ravishda bo'linishi intensivligi jihatidan ham kichik. Bu individual KDUNN ichidagi diametr taqsimotining ta'siri tufayli, shuningdek tozaligi yuqori bo'lmagan va odatdagi eksperimental namunalardagi KDUNN ansamblidagi turli xil naychalar o'rtasidagi farq tufayli. Shuning uchun G-band xususiyati asosan zaif assimetrik xarakterli chiziq shaklini grafit chastotasiga yaqin paydo bo'lgan refleks bilan namoyish etadi.

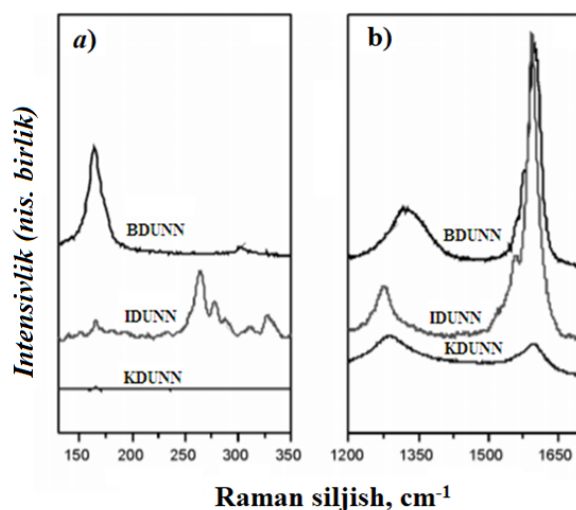
D va G reflekslar intensivligining nisbati ko'plab namunalar sifatini bildiruvchi yaxshi ko'rsatkichdir. Ushbu reflekslarning o'xshash intensivligi strukturaviy nuqsonlarning yuqori miqdoridan dalolat beradi.

1.6. -rasmda har xil nanonaychalar uchun Raman spektrlari keltirilgan.

Ushbu 1.6. a-rasmda BDUNNning RBM spektridan uning diametrini aniqlash mumkin. IDUNN va KDUNNlarning RBM spektrlari yaqqol kuzatilmaganligi uchun ularning ichki diametrini aniqlash imkoni mavjud emas.

KDUNN D va G spektrlari - bu grafitning ko'p qatlamlari tufayli eng past nisbatni, natijada strukturaviy nuqsonlarning yuqori miqdorini ko'rsatmoqda (1.6. b- rasm).

UNNlarning strukturasi o'rganishda raman spektroskopiya usuli bilan birgalikda rentgen-diffaktometriya (XRD) usulidan ham foydalaniladi va bu ikki usul bir birini to'ldiradi.

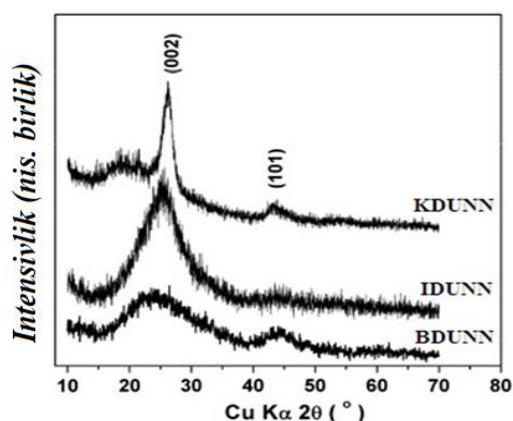


1.6-rasm. BDUNN, IDUNN va KDUNNlarning Raman spektrlari a) RBM, b) D va G rejimlar [16]

Ushbu rentgen difraktometriya usuli orqali nanonaychanning fazoviy guruhini, panjara parametrlarini, fazoviy sofligini, nanokristallitlar o'lchamini, qatlamlar orasidagi masofani, dislokatsiya zichligini aniqlash mumkin.

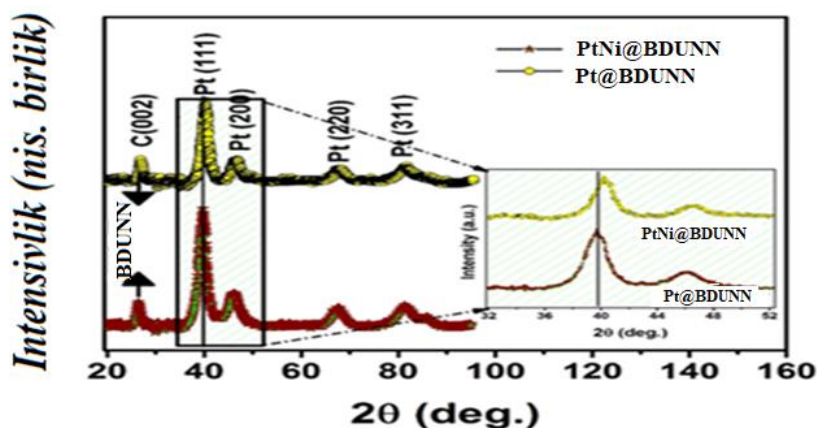
UNNlar strukturasi – fazoviy guruhlari, panjara parametrlari kam o'rganilgan bo'lib, [29] tomonidan UNNlar strukturasi geksagonal (fazoviy guruh P6/mmm) simmetriyadan iborat ekanligi aytiladi va aniqlangan panjara parametrlari $a=0,477$ nm va $c=0,412$ nm ni tashkil etgan.

1.7-rasmda UNN kukunlari namunalarining rentgen difraksiyasi natijalari keltirilgan [30]. BDUNN, IDUNN va KDUNN kukun namunalari uchun (002) va (101) reflekslar kuzatilgan. BDUNN kukuni uchun (002) refleksning intensivligi boshqa UNN kukun namunalari bilan taqqoslaganda zaifroq va kengroq. (002) refleksning kattaligi va kengligi qatlamlar oralig'ining o'zgarishi va tushayotgan rentgen nurlari flyuensiga yo'naltirilgan UNNlar yo'nalishi bilan bog'liq [31]. Bregg tenglamasiga asoslanib, BDUNN kukun namunasining qatlamlar oralig'i d , taxminan 0,3401 nm, IDUNN kukunining namunasi esa taxminan 0,3395 nm ekanligi aniqlangan [30]. KDUNNning kukun namunasi uchun qatlamlar oralig'i ham IDUNN ning kukun namunasiga o'xshash, ya'ni $d_{(002)} = 0,3401$ nm.



1.7-rasm. BDUNN, IDUNN va KDUNN kukun namunalari rentgenogrammalari [30]

[32] ishda PtNi@BDUNN (BDUNN ichida PtNi bo‘lgan namuna) ning kristalli tuzilishi XRD tahlillari bilan tekshirilgan (1.8-rasm). Taxminan $2\theta_B=25,1^\circ$ da kuzatilgan refleks intensivligi BDUNN grafit tekisliklarining uglerod (002) refeksi intensivligiga to‘g‘ri keladi.



1.8-rasm. Pt@BDUNN (BDUNN ichida Pt bo‘lgan namuna) va PtNi@BDUNN (BDUNN ichida PtNi bo‘lgan namuna) namunalarining rentgen difraktogrammalari [32]

39,8°, 46,2°, 67,7°, 81,5° va 83,8° difraksiya burchaklarida paydo bo‘lgan reflekslar mos ravishda (111), (200), (220), (311), (222). Ni va uning oksidlari uchun sezilarli xarakterli reflekslar rentgenogrammada mavjud emas. Lekin juda kichik kristallitlar sifatida mavjud bo‘lishi, shuningdek Pt va Ni o‘rtasida qotishma hosil bo‘lishi sababli ularni mavjud bo‘lishligini inkor etib bo‘lmaydi. Bundan

tashqari, Vegard qonuniga mos holda Pt@BDUNN bilan taqqoslaganda PtNi@BDUNN katta sochilish burchaklarida reflekslar siljishi aniqlandi [33] va bu Ni atomlarini almashtirish natijasidir.

1.2-§. Ko‘p tarkibli nanoqoplamalar olish, ularning morfologiyasi va strukturasi

Moddalarning makro o‘lchamdan nano o‘lchamlarga o‘tishida, ularning xossalari jiddiy o‘zgarishlar sodir bo‘ladi. Bu o‘zgarishlar asosan ikki sabab bilan bog‘liqdir: sirt ulushining kattalashishi va elektron tarkibning kvant effektlar kuchiga o‘zgarishidir. Agar nanozarrani sharcha deb qarasaq, uning yuzasidagi yupqa qatlamdagi atomlar sonining ulushi nanozarrachaning radiusi kamaygan sari oshib boradi [33].

Nanozarrachaning muhim hususiyatlaridan biri, yuza sathi uning hajmida joylashgan nuqsonlarni tortib olishidir [34]. U bu hususiyati bilan nano zarracha ichini nuqsonlardan tozalaydi va yanada takomillashtiradi.

Nanomateriallarning quyidagi fizik-mexanik xossalari strukturaviy holati ta’sir qiladi [35]:

- elastiklik moduli, oquvchanlik chegarasi, qattqlik, yopishqoqlikning buzilishi, yoyilishga chidamlilik, yuqori bosimlarda o‘ta plastiklik;
- keramikalarning elektr o‘tkazuvchanligi, metallarning elektr qarshiligi, Koertsitiv kuchning o‘zgarishi;
- fazaviy o‘tish temperaturasi, erish temperaturasi, issiqlik o‘tkazuvchanlik, diffuziya koeffitsienti.

Yuqoridagilardan ko‘rinadiki, zarraning strukturaviy holati ko‘pchilik fizik xarakteristikalarda aniq o‘lchamga yetganda ekstremal holatlar mavjud bo‘lar ekan. Shuni aytib o‘tish kerakki, nanomateriallarning fizik xossalari faqatgina struktura elementlarining o‘lchami bilan aniqlanmasdan, balki ushbu element joylashgan chegaraviy shartlar bilan aniqlanadi. Shu sababli struktura chegaralari, qo‘shni zarralar ta’siridagi ichki kuchlanish muhim rol o‘ynaydi. Masalan, qattiq jismning issiqlik xarakteristikalari – Debay temperaturasi, termik kengayishning

hajmiy koeffitsienti nanozarrachalar va nanomateriallar uchun mos kelmaydi, garchi ikkala holda ham massiv holatda bu xarakteristikalariga ko'ra ular farq qilsa ham.

Nanokristall plyonkalarni, qoplamalarni shakllantirish uchun o'suvchi plyonkadagi zarralarning o'lchamini va kristallografik oriyentatsiyasini boshqarishni o'rganish kerak. Bunga quyidagi yo'llar bilan erishish mumkin:

- Qoplamaning shakllantirish jarayonida energiyani o'zgartirish bilan;
- Zarralar o'lchamining o'sishini chegaralab, asosiy materialga qo'shimcha element kiritish bilan;
- Nanometer qalinligidagi qatlamlardan ko'p qatlamli plyonkalar yotqizish bilan;
- Nanokompozit qoplamalarni shakllantirish bilan [36-43].

Nanoqoplamalarni o'stirish yo'nalishida kristallar o'lchamini boshqarishning samarali usuli ko'p qatlamli nanostrukturalar olishdir. Turli qiyin eriydigan birikmalarning individual yupqa qatlamalarining davriy yotqizilishidan nanoqoplamalarda ko'p qatlamli tuzilishlar hosil qilinadi [36-41, 44, 45]. Natijada nanomaterial strukturasi umumiy hajmning bo'lim chegaralariga nisbatan fazalararo sirtiy bo'lim ulushi ortadi. Zarralar chegarasi dislokasiya va darzlar tarqalish yo'lidagi to'siq hisoblanadi hamda u qoplamaning qattiqligini oshiradi deb tahlil qilinadi.

Kvazibinar nitrid va karbid tizimlari o'ziga xos yuqori mexanik xususiyatlari bilan nanoqoplamalar sifatida alohida qiziqish uyg'otadi [41-45]. Olovga chidamli o'tish metall karbonitridlari himoya qoplamasi va ishlatishga bardoshli qoplama sifatida ishlatilib, bu erda ularning sirt notekisligi muhim ahamiyatga ega [46].

Nanokompozitli materiallar aralashmadan iborat loqal ikkita turli shakldagi kichik (<100 nm) zarralardan iborat. Zarralarning o'lchami, shakli va zarralar atrofidagi chegaralarning joylashuviga qarab nanokompozitli materiallarning xususiyatlari aniqlanadi. Ushbu sabablar nanokompozitli qoplamalarni takomillashgan hamda ko'p hollarda juda yangi kutilmagan noyob fizik va funksional xususiyatlarini namoyon etadi [47].

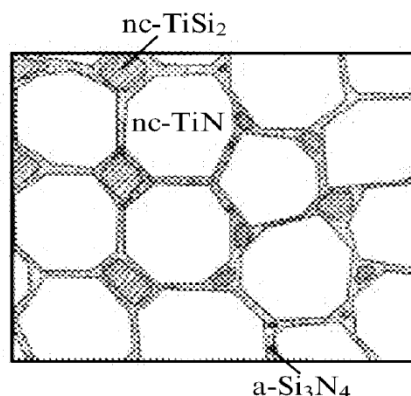
Geterogen struktura bilan xarakterlanadigan nanomaterialning ushbu o'ziga xos sinfi strukturali elementlarni <100 nm o'rtacha chiziqli o'lchamidagi fazalar bilan o'zaro ta'sirga uchramaydigan turi hisoblanib, ular kamida nanokristall va amorf strukturali ikkita fazadan iborat. Hozirgi kunda ushbu yo'nalishda amorf holatidagi boshqa faza materiali bilan to'liq qoplangan qattiq nanokristallar sistemasida bir qancha yutuqlarga erishildi [47].

[48] mualliflari tomonidan qattiq nanokristalli nanokompozit qoplamalarni yaratishning nazariy konsepsiyasi taklif etildi. Nazariyaga ko'ra, bunday qoplamalar (3-10) nm o'lchamli qattiq fazali nanokristallardan va (1-3) nm o'lchamli yupqa qatlamlarga ajratilgan amorf fazalardan tashkil topgan bo'lishi kerak. Turli xil materiallarni qoplash orqali komponentlar (birinchi guruhda Ti, Hf, Zr, Ta, Cr, Al, ikkinchisida Si kabi) to'liq aralashtirilmaydi va 2 faza hosil bo'ladi. 1.9-rasmda nanokristalli TiAlN- zarralari amorf Si_3N_4 -matritsaga singib ketadi va nano-kompozitsion tuzilish rivojlanadi [49]. Hozirgi paytgacha bu yo'nalishda bir qancha nitrid sistemalar bilan tadqiqotlar o'tkazilgan [41, 45, 50, 51].

Nanokompozit qoplamalarni 3 ta talabga (qattqlik, fazaviy tarkibi, o'lchamlilik) ko'ra quyidagicha ajratish mumkin: [43].

Qattqlik bo'yicha tasnif quyidagicha:

- a) $H \leq 40$ GPa qattiq qoplamalar
- b) $H = 40 - 80$ GPa super qattiq qoplamalar
- c) $H \geq 80$ GPa ultraqattiq qoplamalar.



1.9-rasm. $nc - AlTiN - a-Si_3N$ nanokompozitlar tuzilishi [49]

Fazalar bo'yicha esa quyidagicha tavsiflanadi:

Ikkita qattiq fazalar $nc - MeN$ /qattiq faza, masalan, Si_3N_4 , BN va boshqalar.

Bitta qattiq va bitta yumshoq faza $ns - MeN$ /yumshoq faza, masalan, Cu, Ag, Au, Ni, Y va boshqalar.

Bu yerda nc –nanokristall fazani bildiradi. $Me = Ti, Ta, Zr, Cr, Mo, W, Al$ va boshqalar.

Fazalarning o'lchamiga muvofiq tasnifi:

a) 2D – ikki o'lchamli qoplamalar (kichik panjarali qoplamalar);

b) 3D – uch o'lchamli qoplamalar (bir qatlamli nanokompozit qoplamalar).

Juda kichik panjarali qoplamalar panjaralar davri deb ataluvchi to'lqin qalinligi d bo'lgan ikkita turli kompozitsiyadagi qatlamning ko'plab ketma-ketligidan tashkil topib, panjaralar davri bir necha nanometr dan 15 nm gacha tebranadi. Uch o'lchamli bir qatlamli nanokompozit qoplamalar nanozarralarni matritsaga yoki asosiy materialga ekvivalent holda yupqa qatlam bilan qoplangan qalinligi 1 mm gacha bo'lgan qatlamlardan iborat [43].

Turli materialning mayda nanozarralari aralashmasidan yoki turli kristallografik orientatsiyalangan nanozarralar yohud panjarachali strukturasi bitta materialdan tashkil topgan nanokompozitlar ikkita kristall fazalar orasida yoki ikkita boshqalardan ustun kristallografik orientatsiyalangan zarralar orasida shakllanadi.

Nanokompozit qotishmalaridan qilingan qoplamalar kirishmali fazalar (karbidlar, boridlar, silisidlar, karbonitridlar va boshqalar) ga asoslangan qattiq qotishmalar bo'lib, entropiyani barqarorlashtirish natijasida o'ziga xos fizik-mexanik xususiyatlarga ega bo'lgan 4 yoki undan ortiq turdagi metallarni o'z ichiga oladi. Bunday yuqori entropiyali keramika ikkilik (masalan, TiC, TiN, ZrO_2 , Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4) keramikadan ustundir [52]. Ikkilik nitrit tizimlari orasida TiN himoya qoplamasi sifatida keng qo'llaniladi, ammo uning asosiy kamchiliklaridan biri bu $500^\circ C$ dan yuqori haroratlarda tez oksidlanishidir va bu uning qo'llanilish doirasini sezilarli darajada toraytiradi. Bunga himoya qoplamalarining kerakli xususiyatlarini yaxshilash uchun uchinchi va to'rtinchi nitrit tizimlarini joriy etish

orqali erishiladi. TiN tarkibiga Zr, Ta, Hf qo‘shilishi issiqlik barqarorligining yaxshilanishiga, oksidlanish va korroziyaga chidamliligiga olib keladi [53, 54]. Bunday aralashmaning yuqori entropiyasi bir fazali qattiq eritma hosil bo‘lishini barqarorlashtirishi va qotish paytida metallararo birikma hosil bo‘lishining oldini olishi mumkin [52].

Qattiq panjaradagi har xil deformatsiyalarni tashkil etuvchi elementlarning atom kattaligi atomlarning dispersiya koeffitsientini pasaytiradi va shu bilan kristallitlarning o‘shishini pasaytiradi [53]. Demak, [55, 56] ishlarda ko‘rsatilgandek, yuqori entropiya qotishmalari nano o‘lchamdagi tuzilmalarni hosil qiladi. Ma’lumki, o‘lchamlarning nanometrlarga kamayishi fizik-mexanik xususiyatlarining sezilarli o‘zgarishlariga olib keladi [57, 58]. O‘z navbatida, zarra chegaralarining tuzilishi va joylashishi nanokristalli materiallarda ham muhimdir.

HfNbTaTiZrN_x [52], (TiHfZrVNb)N [53], ZrTiSiN [54], TiSiN [59], TiHfZrNbVTaN [60], (TiZrNbTaHf)N [61], Ti_{1-x}Al_xN [62], , nanokompozit qoplamalar rentgenostrukturaviy tahlillari ularning barchasi tomonlari markazlashgan kub (TMK) strukturada shakllanganligi yuqoridagi ishlarda ko‘rsatilgan. Panjara parametri $a = 0,4246 \div 0,4552$ nm gacha oraliqda ekanligi aniqlangan. [54] ga ko‘ra, temperatura oshishi bilan panjara parametri kichiklashgan: 0,4522 nm – 300°C, 0,4514 nm – 500°C, 0,4506 nm – 1100°C.

Tomonlari markazlashgan kub kristall panjarali faza dominant kristall faza sifatida (ishchi gaz bosimining yuqori qiymatlari ostida) shakllangan ((TiHfZrVNb)N, HfNbTaTiZrN_x, ZrTiSiN, TiSiN, Ti_{1-x}Al_xN, TiHfZrNbVTaN). Avvalgi tadqiqotchilar [53-57] tomonidan tasdiqlanganidek, bu faza yuqori entropiyali qotishmalarning nitridlari uchun juda xosdir. Bunday kompozitlarda shuningdek hajmi markazlashgan kub (BCC) faza ham mavjud bo‘lishi mumkin. Hajmi markazlashgan kub panjarali kristall faza past vakuum sharoitida ishlab chiqarilgan qoplamalar uchun dominant hisoblanadi.

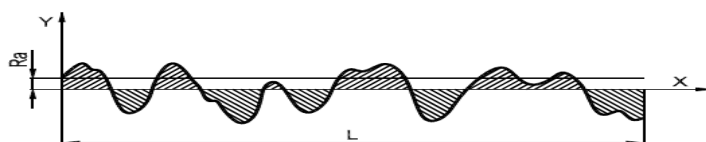
Ishqalanuvchi qattiq yuzalar orasidagi nanozarrachalar “dumalovchi” va sirpanuvchi “moy” vazifasini bajarishi mumkin. An’anaviy quruq moylash materiallari (masalan, grafit, quyma h-BN va MoS₂) bo‘lib xizmat qiladigan

ommaviy materiallardan farqli o'laroq, keng maydonli yuqori sifatli bir qatlamli ikki o'lchovli nanomateriallar ishqalanish va yeyilishni minimallashtiradigan bir atomli qalin qoplama sifatida xizmat qilishi mumkin. Bundan tashqari, sirt xususiyatlarini mos ravishda sozlash orqali ushbu materiallar energiya tejaydigan elektro-opto-magnito-mexanik nanosistemalarni yaratish uchun katta imkoniyat beradi [63]. Bir o'lchovli (0D) va ikki o'lchovli (1D) materiallar bilan taqqoslaganda, planar struktura ularni zamonaviy sanoatga kiritishni ancha osonlashtiradi. Bunday qoplamali materiallar juda past ishqalanishlari tufayli aerokosmik tizimlar, yuqori vakuumli tizimlar va keng harorat intervalida ishlaydigan tizimlar kabi mexanik tizimlarda ideal moylash materiallariga aylanadi [64, 65]. Ushbu o'ta past ishqalanish qatlamli materiallarning kuchli qatlamli kimyoviy bog'lanishiga nisbatan zaif qatlamlararo bog'lanishi (van der Waals kuchlari) bilan bog'liq. Bundan tashqari, van der Waals kuchining qatlamlararo o'zaro ta'siri haroratning oshishi bilan kamayganligi sababli, qatlamli materiallarning ishqalanishi yuqori haroratda yanada kamayishi mumkin [64-66].

Ishqalanish koeffitsienti sirt notekisligiga bog'liq bo'lib, u notekis yuzalar uchun yuqoriroqdir [67, 68]. [68] ish mualliflari tomonidan o'tkazilgan tekshiruvlar shuni ko'rsatadiki, sof Ni qoplamalar yuqori ishqalanish koeffitsientiga ega bo'lib, bu qoplama barcha sirt topografiyasi parametrlarining qiymatlari kompozit qoplamalariga qaraganda ancha yuqori.

Ma'lumki sirt notekisligi R_a (1.10.-rasm) quyidagi formula yordamida aniqlanadi [68]:

$$R_a = \frac{1}{2} \int_0^L y(x) dx \quad (1.9)$$



1.10-rasm. O'rtacha notekislik R_a ni aniqlash [67]

Sirt notekisligi yaxshilanib u nanoo'lchamga yaqinlashganda, unda "ho'llanish" hodisasi yuz berishi kamayadi.

Hozirgi vaqtda nano o'lchamdagi kukunlarni ishlatadigan materiallar va mahsulotlar keng qo'llaniladi. Bunday misollardan biri nanoqoplamalardir [69], shu bilan birga ko'p komponentli nanoqoplamalar, xususan, issiqlikka chidamli va o'tga chidamli elementlar va ularning uglerod, azot qo'shilgan qotishmalari. Umuman olganda, o'tga chidamli elementlar (Ti, Zr, Ta, Nb va boshqalar) bo'lgan mahsulotlar uchun ishqalanish koeffitsientlari (masalan, titan uchun, 10^{-6} - 10^{-3}) va yeyilish (titan va sirkoniy uchun, 0,6 va 0,8 gacha, mos ravishda) yuqoridir [70] va ularning uglerod va azot bilan qotishmasi ularga korroziyaga chidamlilik va yuqori erish haroratini beradi. Ko'p komponentli nanoqoplamalar (ikki yoki undan ortiq metallar, karbidlar, nitridlar va karbonitridlarning qotishmalari) o'ziga xos xususiyatlarga ega (erish nuqtasi – 2500°C dan yuqori, qattqlik 50 GPa dan yuqori), uglerod va azot kiritilgan ko'p komponentli issiqlikka chidamli materiallarga asoslangan nanoqoplamalar yanada yaxshi xususiyatlarga ega (erish nuqtasi – 3000°C dan yuqori, qattqlik 100 GPa dan yuqori).

Shuni ta'kidlash lozimki, o'tga chidamli qotishmalar, karbonitridlar, garchi ular juda yaxshi ekspluatatsiya xususiyatlariga ega bo'lsalar ham, bu qotishmalarni o'ta aniqlik talab qiladigan sohalarda qo'llanilishiga ularga ishlov berish qiyinligi tufayli, ya'ni, o'ta aniqlikdagi sayqallashda "optik" darajadagi sirt notekisligini olishda qiyinchiliklar mavjudligi to'sqinlik qiladi.

Nanoqoplamalarning ekspluatatsiya ko'rsatkichlarini yaxshilashning eng istiqbolli usullardan biri, asosiy nanoqoplamaga yaxshi xususiyatlar beradigan boshqa nanomaterialdan foydalanishdir. Shu bilan birga, ikkinchi qoplamaning qo'llash uchun (bunday ikkinchi nanoqoplamaning qo'llash maqsadga muvofiqligi uchun), ham birlamchi nanoqoplama, ham ikkilamchi nanoqoplama haqida imkon qadar to'liq ma'lumot bo'lishi lozim. Xususan, birlamchi nanoqoplamdagi strukturalar, sirt notekisliklari, nanokristallitlar, kuchlanishlar, shuningdek, birinchi va ikkinchi qoplamalardan foydalanish muhiti haqida ma'lumot zarur. Shuningdek, ushbu ikki nanoqoplamaning ba'zi xususiyatlari mos kelmasa, ikkinchi

nanoqoplamani qo'llash imkonini beradigan usullarni tanlash kerak. Nomaqbul xususiyatlar sifatida boshqa qoplamaga yopishishi (ilashishi) bilan bog'liq bo'lgan sirt notekisligi, mikrozo'iqish qiymatining kichikligi bo'lishi mumkin yoki ularni kamaytirish, yoki yaxshilash usullarini aniqlash kerak bo'ladi.

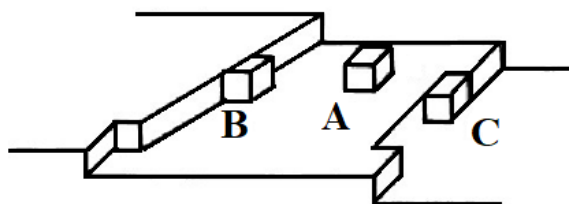
Sirt notekisligi o'rganilgan ko'plab ishlar mavjud bo'lib [71], ularda purkalgan kukunning zarracha hajmiga bog'liqligi sirt notekisligini nazorat qilish imkonini bergan. Sirt sifatining eng muhim mezonlari - qoplamaning taglikka yopishish mustahkamligi va qoplamaning g'ovakliligi yo'qligidir [72]. Shuningdek, sirt notekisligi ishqalanishga, yeyilishga, deformatsiyaga, mexanik kuchlanishga, korroziyaga chidamlilik, mustahkamlikning kamayishiga, zarba mustahkamligiga, germetiklik, qoplamaning mustahkamligiga va sifatiga, issiqlik o'tkazuvchanligiga va boshqala sifatlarga sezilarli ta'sir ko'rsatadi.

1.3-§. Nanokristallitlarning o'sish mexanizmlari va ularni aniqlash usullari

Ma'lumki ideal kristallar burchaklari, sirtlari atomlar joylashishi bo'yicha 3 turga bo'linadi: singulyar, vitsinal va nosingulyar (diffuz) sirtlar bo'ladi. Singulyar sirtlar deb, ideal sharoitda pog'onalarsiz bo'lgan silliq yoqlarga aytiladi. Singulyar yoqlarda atomlar zich taxlangan bo'lib, ular nisbatan kichik erkin sirtiy energiyaga ega. Vitsinal sirtlar singulyar sirtlarning bevosita yaqinida yo'nalgan sirtlar hisoblanadi. Ular singulyar yoqlar bilan kichik (α) burchak hosil qilib, uzun singulyar yoqlarning pog'onali yassi qismlaridan iborat bo'ladi. Vitsinal yoqlar pog'onali bo'lganligi tufayli singulyar yoqlarnikidan kattaroq sirtiy energiyaga ega. Nosingulyar yoqlar ko'p pog'onali bo'lib, ular singulyar yoqlar bilan yetarlicha katta burchaklar hosil qiladi va bu yoqlar eng katta sirtiy energiyaga ega [73].

Yuqori temperaturada singulyar yoqlar silliqdigi yo'qolishi va ular nosingulyar bo'lib qolishi mumkin. Bu hodisa kristallanish suyulish nuqtasidan pastda yuz berishi mumkin. Qatlamli o'sish singulyar va vitsinal sirtlarda amalga oshadi. O'sayotgan sirtga tushgan atom pog'onali sinig'ida mustaxkam bo'g'lanadi. Agar kubik panjara qaralsa mazkur (C) holatda atom 6 qo'shndan

uchtasi bilan bog‘lanadi. B-holatda atom faqat ikkita, A-holatda esa faqat bitta qo‘shni atom bilan bog‘langan bo‘ladi (1.11-rasm) [73].



1.11-rasm. Atom-silliqlik sirtining o‘shish modeli [73]

Tashqi fazadan kristall sirtiga tushgan atom o‘z energiyasining bir qismini panjaraga beradi va kristall sirti atomlari bo‘g‘lanish kuchlari ta‘sirida bu sirtga yutiladi (yopishadi). Pog‘ona sinig‘i to‘ldirila boradi, u tamoman to‘lib bo‘lganda yana kelgan atom boshqa pog‘onaga yopishib siniq hosil qiladi, keyingi kelgan atomlar uning qatoriga joylasha boradi, bu qator to‘lgach, yangi qator to‘ldirila boshlaydi va bu jarayon davom etib, kristall o‘sa boradi. Bunday o‘shish mexanizmi uchun qandaydir kritik o‘ta to‘yinish bo‘lishi zarur. Kristall o‘sovchi sirtida pog‘onalar hosil qiluvchi manba bor bo‘lib, bunday manba vazifasini, masalan, vintsimon dislokatsiya bajarishi mumkin, chunki u sirtga chiqib yo‘qolmas pog‘ona hosil qiladi. Vintsimon dislokatsiyalar yordamida o‘shish jarayoni ideal kristallda pog‘onali o‘shish mexanizmiga o‘xshash bo‘ladi: vintsimon dislokatsiya tufayli sirtida hosil bo‘lgan pog‘onalarda siniqlar bo‘lib, u joylarga yutilgan atomlar tizila boshlaydi, pog‘onalar vintsimon tarzda o‘sa boradi – kristall o‘sadi [73].

Nosingulyar sirtlarda kristallarning normal o‘shishi amalga oshadi. Bu sirtlar (atomlar o‘lchamida) g‘adir-budir bo‘lganligi sababli ularda siniqlar bir tekis joylashgan, yangi zarralar sirtning har qanaqa joyida qo‘shilib boradi. Shuning uchun bu o‘shish mexanizmini normal o‘shish deyiladi [73].

Kristall o‘shishi - bu erigan moddaning o‘ta to‘yingan eritmadan kristall sirtlarga to‘planishi jarayoni. O‘shish quyidagi uch bosqichdan iborat: materialni massadan kristall yuzasiga yaqin joyga tashish, materialni eritma chegara qatlamidan qattiq holatga o‘tkazish (sirt integratsiyasi), o‘shish nuqtasida chiqarilgan kristallanish issiqligining tarqalishi. Agar kristallanish issiqligining

tarqalishi e'tiborga olinmasa, jarayon "diffuziya bilan boshqariladi" yoki "sirt integratsiyasi nazorati ostida" o'sadi [74].

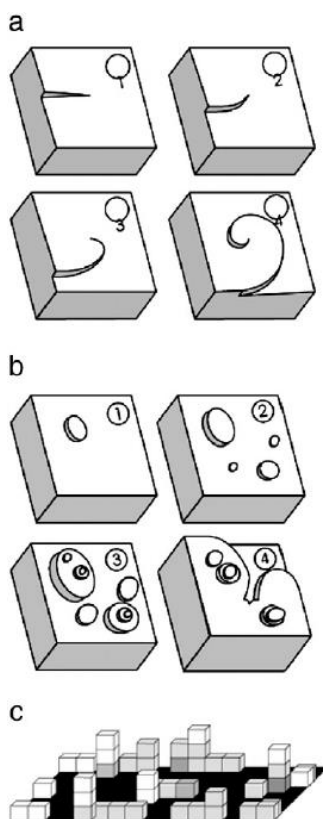
Kristallning o'sish sur'atlari haroratga, supersaturatsiyaga (super sovutish) va kristall yuzasiga yaqin joylashgan suyuqlik flyuensining tabiatiga bog'liq. Agar to'liq kristall panjaraga olib keladigan termodinamik to'siq bo'lmasa, energiya jihatidan qulay joylar to'ldiriladi [73].

Yuqori sirt energiyasiga ega bo'lgan silliq sirtlarda o'sish qiyin, va umuman olganda, kristalda panjara kamchiliklari keng tarqalgan. Kristal o'sishining atom kuch mikroskopi (AFM) va skanerlovchi electron mikroskopi (SEM) tahlillari turli yuzlar uchun o'sishning turli mexanizmlarini aniqlaydi. Yuzaki integratsiya - kristallanish materialining o'sish birliklari kristall yuzasiga ko'chirilgandan so'ng kristall panjara ichiga kiritilgan jarayon. Sirt integratsiyasini boshqaruvchi asosiy mexanizmlar quyida keltirilgan. Kristall yuzasida o'sish usullari vintsimon dislokatsiya mexanizmlari (1.12. a-rasm), 2 o'lchamli o'zaklanish (1.12. b-rasm) va tartibsiz o'sish (1.12. c-rasm) bo'lib, qo'shimcha zarrachalar to'plangan taqdirda ham qulay integratsiya joylarini doimiy ravishda saqlab turadi [74].

Ikki o'lchovli o'zaksimon o'sish kontseptsiyasiga ko'ra, planar kristall yuzalar yangi o'stirilgan qatlamlarning shakllanishi uchun energiya jihatidan noqulaydir. Mukammal tekis yuzada kristall o'sishini boshlashda birlik o'sish uchun qo'shilish joylarini (qadamlarini) ta'minlash maqsadida ikki o'lchovli o'zak yaratilishi kerak. Ikki o'lchovli o'zak o'sishi uchun bir nechta modellar taklif qilingan. Bir o'zakli modelda cheklovchi bosqich o'zak hosil bo'lishi hisoblanadi [74].

Bitta o'zak hosil bo'lgach, kristall yuzasi bo'ylab tarqaladigan keyingi o'sish cheksiz tezdir. Ko'p o'zakli model uchun tarqalish tezligi nol sifatida qabul qilinadi va kristall sirtini faqat etarli miqdordagi o'zaklarning to'planishi bilan qoplash mumkin. Ushbu ikkita o'sish modeli ikkita ekstremal holatni ifodalaydi. Uchinchi model, "tug'ilish va tarqalish" modeli sifatida tanilgan, o'zaklarning shakllanishiga va ularning keyinchalik cheklangan tezlikda o'sishiga imkon beradi.

Bunday holda, tugallanmagan qatlamlar ustida yangi o‘zaklar paydo bo‘lishi mumkin.



1.12-rasm. Kristal o‘shishi: (a) vintsimon dislokatsiya, (b) sirt o‘zaklari va (c) notekis o‘shish mexanizmlari [74]

Yuqoridagi uchta holat uchun turli xil chiziqli o‘shish sur‘atlari [75] tomonidan berilgan. Umuman olganda, bu o‘shish tezligi ifodalari o‘ta to‘yinganlik va boshqa kristall fizik xususiyatlarning biroz murakkab funksiyasini ifodalaydi. Bir o‘zakli modelda o‘shish tezligi kristall sirt maydoniga ham proporsionaldir. Ikki o‘lchovli o‘zak modellari ba‘zan kristallarning o‘shish sur‘atlarini bashorat qilish yoki o‘zaro bog‘lashda qoniqarli emas. Misol uchun, past darajada to‘yinganlik darajasida prognoz qilingan o‘shish sur‘atlari ko‘pincha eksperimental kuzatilganidan ancha past bo‘ladi [74].

Eksperimental kuzatishlar va ikki o‘lchovli o‘zak modellari o‘rtasidagi nomuvofiqlikni tushuntirish uchun [76] dislokatsiya nazariyasiga asoslangan o‘shish modelini taklif qildi. Vintsimon dislokatsiya spiral qadamni keltirib chiqarishi mumkin, bu o‘shish vaqtida yo‘qolmaydi. Demak, o‘shishni ta‘minlash uchun kristall

yuzasida ikki o‘lchovli o‘zak hosil bo‘lishi shart emas. [77] mualliflari spiralning o‘shishi adsorbsiyalangan o‘shish birliklarining kristall yuzasi bo‘ylab tarqalishi bilan cheklanganligiga asoslangan BCF (Burton-Cabrera-Frank) nazariyasini va shaklning o‘shish tenglamasini ishlab chiqdi:

$$G \propto (\sigma^2/\sigma_c)\tanh(\sigma^c/\sigma) \quad (1.10)$$

bu erda σ o‘ta to‘yinganlik parametri $(C_i - C_{eq})/C_{eq}$ bilan aniqlanadi va σ_c - qadamlar oralig‘iga bog‘liq parametrlarni o‘z ichiga olgan haroratga bog‘liq bo‘lgan murakkab konstanta. Past super to‘yinganlikda BCF tenglamasi $G \propto \sigma^2$ ga, yuqori super to‘yinganlikda esa $G \propto \sigma$ ga yaqinlashadi. Shaklning oddiy kuch-qonun tenglamasi sirt integratsiya jarayonini ifodalash uchun tez-tez ishlatiladi [77]:

$$G = k_i(C_i - C_{eq})^m \quad (1.11)$$

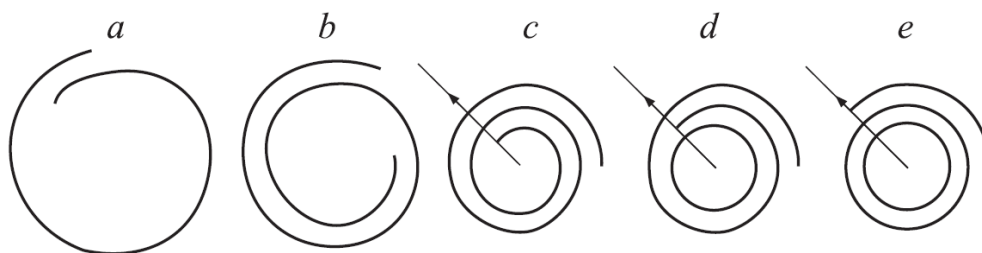
Bu BCF tenglamasining ikkita cheklovchi holatini aniq ifodalaydi va cheklangan o‘ta to‘yinganlik diapazonida ikki o‘lchovli o‘zaksimon modellarga yaxshi yaqinlashadi. E‘tibor berilsa, $k_i \propto L^2$ bo‘lgan ko‘p o‘lchamli o‘zaksimon o‘shish modeli bundan mustasno, sirt integratsiya konstantasi k_i kristall o‘lchamiga bog‘liq emas. m parametr odatda sirt integratsiya jarayonining “tartibi” deb ataladi [77].

Nanonaychalar hosil bo‘lishida ochiq va yopiq uchlari bilan o‘shishi, qobiqlarning ketma-ket yoki bir vaqtning o‘zida o‘shishi, grafit qatlamini aylantirish va boshqa mexanizmlar mavjud. Shuningdek nanonaychalar hosil qilish va o‘stirishda dislokatsiyalarning ham o‘rni alohidadir.

[78] mualliflari tomonidan KDUNNda dislokatsiyalar hosil bo‘lishi tahlil etilib, nanonaycha o‘shish mexanizmi ko‘rib chiqildi. Birinchi navbatda tayyor nanonaychada grafit tarmoqlarini qatlamlashdan iborat bo‘lib, dislokatsiyalar faqat tizimning energiya stabilizatorining roli bilan bog‘liq. Ushbu aloqada nanonaychalarni hosil qilishning mumkin bo‘lgan mexanizmlaridan biri - dislokatsiya taklif etiladi.

[79] da cho‘zilgan grafit bo‘lagini cho‘zilgan qirralari bir-biriga bog‘langan holda naychaga burish orqali nanonaycha hosil qilish mumkinligi ko‘rsatilgan. Ko‘rinib turibdiki, bunday mexanizmni faqat BDUNNlar yoki konuslar metall ishtirokida hosil bo‘lganda amalga oshirish mumkin, chunki sirtida adsorbsiyalangan metall atomlari grafit qatlamning yanada burishiga yo‘l qo‘ymaydi [80].

Quyida ko‘rib chiqilayotgan mexanizmدا grafit “varag‘i” darhol yopilmaydi (1.13. a-rasm), lekin qizdirilganda yoki tashqi stresslar ta’sirida, masalan, bosim ostida yanada burilishda davom etadi (1.13. b-rasm). Natijada, grafit qatlami van-der-Vaals kuchlari bilan birga ushlab turilgan spiral to‘plamga aylanadi (1.13. c-rasm).

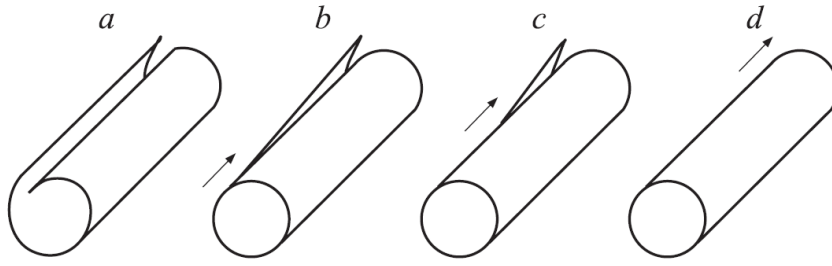


1.13-rasm. Grafit varag‘ini aylantirishning ketma-ket bosqichlari (a–c).

Dislokatsiya natijasida (c-e) BDUNN (d) va IDUNN (e) hosil bo‘lishi [80]

Mexanizmning mohiyati quyidagicha. Agar elastik kuchlanishlar dislokatsiya (disklinatsiya) harakati uchun zarur bo‘lgan kuchlanishdan ohsa, dislokatsiya sirpanishi sodir bo‘ladi, ya’ni grafit qatlamlarining tekisliklari c yo‘nalishi bo‘yicha, ya’ni spiral konvolyutsiyaning radial yo‘nalishi bo‘yicha siljiydi (1.13.-rasmdagi o‘q bilan ko‘rsatilgan, c-e). Dislokatsiyaning har bir siljishi, umumiy holatda ham chekka, ham vintli komponentga ega bo‘lishi mumkin bo‘lgan, bitta nanonaycha hosil bo‘lishiga olib keladi (1.13. d-rasm).

O‘ralgan varaqning yopilishi, “zipper” mexanizmi bilan sodir bo‘lishi mumkin (1.14.-rasm, a-d). Dislokatsiya sirpanishlari soni hosil bo‘lgan nanonaychadagi devorlar soniga teng. Dislokatsiya rulon yuzasiga etib boradi, sirpanish to‘xtaydi va ko‘p devorli nanonaycha hosil bo‘ladi (1.14. d-rasm).



1.14-rasm. Zipper mexanizmining ketma-ket bosqichlari: konvolyutsiya devorlariga yaqinlashish (a), dislokatsiyaning chiqishi (b; c) va nanonaycha (d) [80]

Agar dislokatsiya harakati to‘xtab qolsa va to‘planning ichki uchi o‘ralishda davom etsa, dislokatsiyaning sirpanish holati yana paydo bo‘ladi. Natijada, dislokatsiya o‘ramning yuzasiga chiqadi, lekin boshqa joyda. Dislokatsiyaning harakati ham, o‘ramning buklanishi ham to‘xtab qolsa, u holda qobiqlarning qurilishi to‘xtaydi. Bunday holda, hosil bo‘lgan nanonaycha sovutilganda o‘ramning ochilmagan qismidan “tushib ketishi” mumkin [80].

Nanonaychada o‘ralgan grafit qatlamining sferik energiyasini quyidagi shaklda yozish mumkin [81]:

$$\Delta E = 0.25A(d/R)^2 \quad (1.12)$$

bu yerda $A \sim 10 \text{ eV/atom}$, d - qatlamlar orasidagi masofa, R - nanonaychalar radiusi.

Radial yo‘nalishda dislokatsiyaning sirg‘alishi kuchlanish energiyasi ΔE Payerls energiyasi U dan katta bo‘lgandagi sharti bilan sodir bo‘ladi:

$$\Delta E > U, \quad (1.13)$$

bu yerda $U=(1/\pi)b^2\sigma$, σ – Payerls kuchlanishi. Ushbu holatda Byurgers dislokatsiya vektori \bar{b} buralishlar orasidagi masofaga teng: $b=d$. Buralish radiusidan kollaps shakillanib, 10 nm atrofida nanonaycha hosil bo‘lishni boshlashi mumkin.

Ushbu mexanizm yordamida hosil bo‘lgan ko‘p qatlamli nanonaycha bir xil spirallikdagi qobiqlardan iborat bo‘lib, har xil xirallikka ega. Biroq, agar

to'planning o'zi dislokatsiya sirpanishi paytida burilish o'qi bo'ylab cho'zilgan bo'lsa, bu turli xil spirallikdagi qobiqlarning shakllanishiga olib kelishi mumkin [80]. Yuqorida bayon qilingan usul bilan nanonaychalarni hosil qilish uchun optimal sharoitlarni tanlashda grafitning qizdirilishi o'rtacha bo'lishi kerakligini hisobga olish kerak. Shunda u grafitning alohida qatlamlari orasidagi van-der-Vaals bog'lanishlarini yo'q qilishga, ajratuvchi grafit varaqlarining to'plamlarini hosil qilishga imkon beradi va shu bilan birga bug'langan uglerod qatlamining alohida atomlarga parchalanishiga olib kelmaydi. Taklif etilayotgan mexanizm, ko'rinishidan, tayyor spiral to'plamlardan nanonaychalar hosil qilishda asosiy mexanizmdir.

Difraksion intensivliklarning kengligi yordamida rentgen nurlarining kogerent tarqalish mintaqalari (KTM) o'lchamlarini taxmin qilish mumkin, bu esa kristallitlarning o'rtacha o'lchamlariga (nanozarralar) to'g'ri keladi. Buning uchun odatda Debay-Sherrer formulasidan [81] foydalaniladi:

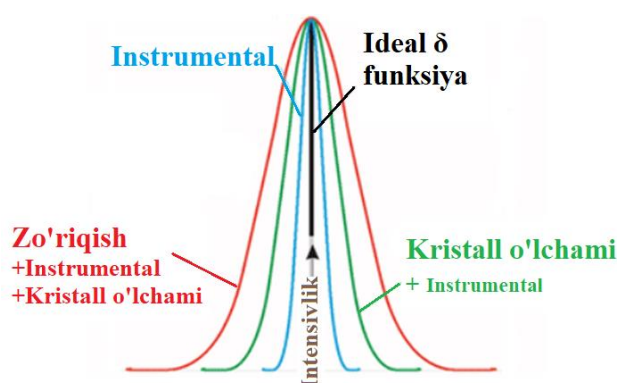
$$D = \frac{k\lambda}{\beta_s \cos \theta} \quad (1.14)$$

bu erda, k - zarra shaklini hisobga olish uchun tuzatish koeffitsienti ($k \sim 0,9$), λ - nurlanish to'lqin uzunligi (masalan, Cu anod uchun 0,15406 nm), θ - difraksiya refleksi uchun Bragg burchagi, β_s - maksimal intensivlik yarmining to'liq kengligi (radianlarda).

Amalda KTM kattaligi (1.14) formula bilan ~ 1500 - 2000 \AA dan 15 - 20 \AA gacha va turli kristallografik yo'nalishlarda (turli indeksli chiziqlar yordamida) aniqlanishi mumkin [81].

Bundan tashqari, difraksiya maksimumlarining kengayishiga kristallardagi mikrobuzilishlar sabab bo'lishi mumkin. Ideal kristallikdan og'ish sodir bo'lganda, XRD intensivligining kengayishi sodir bo'ladi (1.15-rasm). Ushbu kengayish namunaning tabiati bilan bog'liqdir. Namuna haqida gap ketganda, bu asosan kristallit hajmi, mikrozo'riqish, qattiq eritmaning bir xilligi va harorat omillariga bog'liq bo'lishi mumkin. Ular orasida mikrozo'riqish dominant omil bo'lib, u

namunadagi panjara parametrlaridagi o'zgarishlarning o'rtacha ildiz kvadrati sifatida aniqlanadi. Mikrozo'riqishning o'zi bir xil bo'lmagan panjara buzilishlariga, yoriqlar, dislokatsiyalar, antifaza domenlari chegaralari va zarra yuzasining bo'shashishiga bog'liq. Shuningdek, kattaroq ion qisman kichikrogi bilan almashtirilganda, panjara parametrlarining umumiy pasayishi yuz beradi. Ushbu pasayish boshlang'ich materialning makrozo'riqishi sifatida qaralishi mumkin. Ko'pgina olimlar bunday holatlarni tasvirlash uchun "kimyoviy bosim" atamasidan foydalanadilar [82].



1.15-rasm. Difraksion intensivliklarning kengligidagi rentgen nurlarining kogerent tarqalish mintaqalari

(1.15) formulada namunalarda mikrozo'riqishni mavjudligini hisobga olmaydi; shuning uchun yuqori deformatsiyalanadigan namunalarda KTMni hisoblash uchun mos emas. Buning uchun Stoks formulasi [83] mavjud:

$$\beta_D = 4\varepsilon \operatorname{tg} \theta \quad (1.15)$$

bu erda, ε – kristal panjaraning nisbiy deformatsiyalari qiymati.

Mikrobuzilishlar mavjud bo'lganda, bir xil (hkl) indekslarga ega bo'lgan har bir atom tekisliklar tizimi o'zining ma'lum tekisliklararo masofasi o'rniga, $d \pm \Delta d$ chegarada yotuvchi tekisliklararo masofalarga ega bo'ladi. Mikrobuzilishlarning kattaligi $\Delta d_{max}/d$ qiymatidan va mos ravishda ε mikrozo'riqishlarning kattaligi - $E\Delta d_{max}/d$ qiymatidan baholanadi, bu erda E bir xil yo'nalishdagi Young moduli [hkl]. Mos ravishda, $d \pm \Delta d_{max}$ qiymatlari, atom tekisliklarining har bir tizimining

burchaklari $\theta_{\pm\Delta\theta max}$ qiymatlari oralig'ida yotadi, bu esa rentgen diffraktogrammalarida chiziqlarning kengayishiga olib keladi, u qanchalik katta bo'lsa, Δd va $\Delta\theta$ ning maksimal qiymatlari shunchalik katta bo'ladi [83].

Eksperimental sharoitdan kelib chiqib, intensivlikning haqiqiy fizikaviy kengayishi (hkl) faqat mikrozo'riqishlar yoki faqat kristallitlarni maydalash natijasida kelib chiqadi degan xulosaga kelish mumkin bo'lsa, u holda panjara buzilishlarining kattaligi kristallit kattaligi bilan bir xil bo'ladi.

Mikrozo'riqishlarning o'rtacha qiymati uchun

$$\varepsilon = \frac{\beta_D}{4 \operatorname{tg} \theta} \quad (1.16)$$

tenglikni (1.15) dan keltirib chiqaramiz [84]. (1.14) va (1.15) formulalardan

$$\beta_s = \frac{k\lambda}{D \cos \theta} \quad \text{va} \quad \beta_D = 4\varepsilon \operatorname{tg} \theta$$

ekanligini inobatga olsak, u holda, refleksning umumiy integral kengligi quyidagicha yozilishi mumkin [84]:

$$\beta = \beta_s + \beta_D \quad (1.17)$$

$$\beta = \frac{k\lambda}{D \cos \theta} + 4\varepsilon \operatorname{tg} \theta \quad (1.18)$$

$$\beta \cos \theta = \varepsilon (4 \sin \theta) + \frac{k\lambda}{D}. \quad (1.19)$$

Hosil qilingan (1.19) tenglikni

$$y = ax + b \quad (1.20)$$

chiziqli funksiya sifatida qarab ushbu belgilanishlarni kiritamiz, $y = \beta \cos \theta$, $a = \varepsilon$, $x = 4 \sin \theta$, $b = k\lambda/D$.

Origin Pro 9 dasturidan foydalanib chiziqli funksiyasi chiziladi, bunda rentgenogrammada bir fazaga to'g'ri kelgan intensivliklar qiymatlaridan foydalaniladi. Olingan natijalar asosida nanokristallitning qiymati aniqlanadi.

Bunday holda, zarra o'lchami va mikrozo'riqish qiymatini aniqlash uchun Uilyamson-Xall va o'lchov-shtammlarni chizish usullari [84] dan foydalanish afzalroqdir.

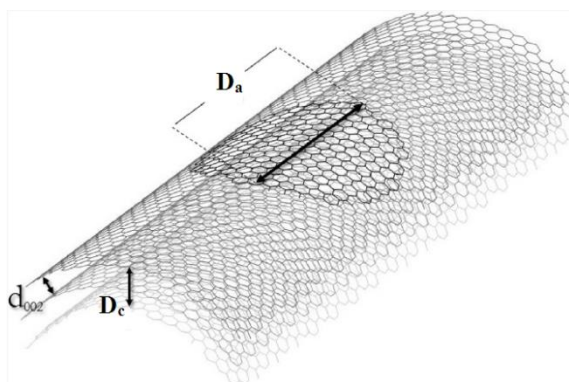
Mikrozo'riqishning musbat qiymati tegishli kristall tekisliklarning masofasi bir xil emasligini anglatadi, ehtimol nuqsonlar va deformatsiyalar mavjudligi sababli. Manfiy mikrozo'riqish instrumental kengayish va anizotropiya zo'riqishlari sabablidir va turli yo'nalishlar uchun o'lcham-deformatsiya parametrlarini alohida hisoblash zarur.

UNNlardagi kristallitlar tushunchasi bir muncha murakkab bo'lib, u quyidagicha tushuntiriladi.

UNNlar devorini hosil qilgan panjaralar ko'plab nanometrlarni hosil qiladi, ammo bir nuqtada nuqsonlar chizig'i yoki o'xshash olti burchakli panjaralarning ikki xil yo'nalishini ajratuvchi chegara bo'lishi mumkin. Atomlar bo'lagining mukammal tartiblangan hududini "kristall" deb atash odatiy holdir, shuning uchun ushbu holda bir xil naycha ichidagi har bir yaxshi tartiblangan mintaqani "kristallitlar" deb atashimiz mumkin. Katta kristallitlar va kam nuqsonli UNN "yuqori kristallik" deb ataladi [85].

Grafit va grafen uchun tekislik ichidagi kristallit o'lchami an'anaviy ravishda D_a bilan belgilanadi va xuddi shu belgi UNNlarning o'xshash devor ichidagi kristallit o'lchami uchun ishlatiladi. Grafitning qatlamlari bo'ylab kristallit o'lchami D_c deb ataladi va KDUNNlarning devorlar oralig'i bo'ylab kristallit o'lchami uchun qo'llaniladi. 1.16.-rasmda d_{002} qatlam oralig'idagi kristallit o'lchami D_a va D_c ko'rsatilgan [85]. UNNlarning kristallit D_a o'lchami (1.14) tenglik orqali topiladi.

Raman spektroskopiyasida nuqsonlar va buzilishlar bilan bog'liq bo'lgan D-cho'qqisining intensivligi grafit qo'zg'alishiga mos keladigan G-cho'qqisining intensivligi bilan taqqoslanadi. Ularning nisbati, $R = I_D/I_G$, tekislik ichidagi kristallit o'lchami D_a ga teskari proportsionaldir [86, 87]. Bu nisbat grafen [88] uchun ko'rsatilgandek monoton ravishda nuqson konsentratsiyasiga bog'liq emas va qo'zg'alish to'lqin uzunligiga ham bog'liq [89].



1.16-rasm. UNNlarda kristallalitar tuzilishi [85]

Naychalar uchun, yassi kristallar bilan solishtirganda, D-cho‘qqining intensivligi nafaqat devorlar ichidagi tartibsizlik bilan bog‘liq, balki devorlarning egriligi ham ta’sir qiladi [90]. Shuning uchun R-nisbati faqat o‘ta nuqsonli naychalardagi nuqson zichligining sifatli o‘lchovi bo‘lib ishlatilishi mumkin [91] va 10 nm dan kichik bo‘lgan kristallit o‘lchamlari uchun [92] foydalaniladi. Taxminan 2-10 nm gacha bo‘lgan kichikroq kristallit D_a o‘lchamini to‘g‘ridan-to‘g‘ri hisoblash uchun G-cho‘qqisining kengligi empirik ravishda olingan tenglamasidan foydalanib ham ishlatilishi mumkin [93].

1.4-§. Radiatsiyaning nanonaychalar va nanoqoplamalar strukturasi, morfologiyasi hamda Raman spektroskopiyasiga ta’siri

Uglerodli nanomateriallarning fizik-kimyoviy xususiyatlari xilma-xilligi ularning tuzilishiga ta’sir qilish hamda turli xil nuqsonlarni yaratish imkoniyati bilan belgilanadi [10, 13]. Materiallarning tuzilishi va xossalari o‘rtasidagi bog‘liqlik asosida [6] nuqsonlarni (buzilish, almashtirish) UNNga kiritilishi uning xususiyatlarini o‘zgartirishga olib keladi deb taxmin qilish mumkin. Shuni ta’kidlash kerakki, tashqi ta’sir (harorat, bosim va nurlanish) ostida UNN tuzilishiga xuddi shunday o‘zgarishlar kiritilishi mumkin. Ba’zi hollarda nurlanish ta’sirida nuqsonlarning paydo bo‘lishi va ularning simmetriyaga, uglerod atomlarining radiusli va tangensial tebranishlariga, UNNning tuzilishi va xususiyatlariga ta’sirini o‘rganishning optimal va boshqariladigan usuli hisoblanadi.

So‘nggi paytlarda tadqiqotchilar uglerod nanonaychalari, grafen va olmos kabi turli xil uglerod materiallariga (sp^3 yoki sp^2 materiallari) elektron nurlanishni ta‘sirini o‘rganmoqdalar [94-97]. Uglerod moddalarining tuzilishiga radiatsiya ta‘sirini o‘rganish, ushbu materiallarning keng qo‘llanilishi, masalan, aerokosmik sanoatida, masalan, xodimlar va uskunalarni radiatsiyaning zararli ta‘siridan himoya qilish uchun keng tarqalgan. Uglerod strukturasiidagi shikastlanish mexanik xususiyatlarga, shuningdek elektr va issiqlik o‘tkazuvchanligiga putur etkazishi mumkin [98].

Uglerod nanostrukturalari nurlanishga juda sezgir va bu sezgirlik ularning tuzilish xususiyatlarini boshqariladigan modifikatsiyasi uchun ishlatilishi mumkin, masalan, sp^2 gibridlangan uglerodni sp^3 ga aylantirish yoki yangi konstruksiyalar, choklashlar hosil qilish. Radiatsion choklashlar – bu xususiyatlarni o‘zgartirishning muqobil usuli. 200 keV elektron energiyasida nanonaychalarda turli xil shikastlanishlar, masalan amorflashish va bo‘shliqlar kuzatilgan [98-101]. [98, 100, 101] da elektronlarning past dozalarida ($2,4 \times 10^{13}$ el/sm²·s) esa strukturaviy shikastlanishlar va amorflashish sodir bo‘lmagan, ularda nurlanish natijasida naychada uzilgan bog‘lar sababli naychalar tugunidagi kovalent bog‘lar o‘rtasida qayta shakllanish yuzaga keladi, yuqori dozalarda (2×10^{16} el/sm²·s) esa namunaning amorflashishi kuzatildi [101]. Yuqori energiyali elektronlar, birlamchi yoki ikkilamchi elektronlar, atom o‘lchamidagi nuqsonlarni keltirib chiqarishi mumkin. Elektron energiyasi atomni panjaradagi dastlabki holatidan siqib chiqarishi va choklash jarayonini yoki katta o‘lchamdagi nuqsonlarni keltirib chiqarishi mumkin bo‘lgan nuqtaviy nuqson juftlarini hosil qilish uchun etarli bo‘lishi kerak [98].

So‘nggi paytlarda olib borilgan [99, 102-106] izlanishlarda qo‘shni UNNlar o‘rtasida choklashlar yaratish va shu bilan mustahkamlik xususiyatlarini yaxshilash uchun elektron nurlari (e-nur) bilan nurlantirishdan foydalanilgan. Elektron nurlanishning yana bir jozibali xususiyati shundaki, u keng ko‘lamli ishlov berishda ishlatilishi mumkin. Qatlamlar va tolalardagi UNN choklashlar - bu alohida nanonaychalar ichidagi bog‘lanishlarni sezilarli darajada o‘zgartirmasdan

va ularning mexanik xususiyatlarini pasaytirmasdan mustahkamlik chegarasini yaxshilash uchun etarli miqdordagi kovalent bog‘lanishlarni kiritish o‘rtasidagi ta’sirni muvozanatlashdir. Bundan tashqari, choklashdagi uglerodlarning gibridlanishi sp^2 dan sp^3 ga o‘zgarganligi sababli, UNN bo‘yicha elektr va issiqlik o‘tkazuvchanligiga ham salbiy ta’sir ko‘rsatishi mumkin [107]. [96-111] mualliflari mexanik xususiyatlarini, masalan, elektron nurlanishdan so‘ng tortishish, siqilish va burish xususiyatlarini o‘rganishdi. Hozirgacha uglerod nanonaychalarini rentgen-diffraktometriya (XRD) bo‘yicha tadqiqotlari kam [111-113], ayniqsa, elektron nurlanish ta’siridan keyingi tahlili.

UNNlardagi elektron nurlanish effektlari eksperimental va nazariy jihatdan elektron energiyasining 1 keV dan 4,5 MeV gacha bo‘lgan oralig‘ida va 5×10^{15} el/sm² dan $1,9 \times 10^{23}$ el/sm² gacha bo‘lgan flyuenslarda o‘rganilgan [6; 107-121]. [96] ishda UNN dagi strukturaviy o‘zgarishlarni ionlar flyuensiga bog‘liqlik funksiyasini kuzatish uchun Raman spektroskopiyasidan foydalanilgan va unga ko‘ra, I_D/I_G amorflashish darajasi o‘rganilib, 3×10^{13} ion/sm² da buzilishlar o‘sishi kuzatilgan. [97-110, 114-116] ishlarda UNNning mexanik xususiyatlarni, dielektrik doimiyligi va elektr o‘tkazuvchanligini o‘rganish uchun mustahkamlik sinovlari o‘tkazildi va mikroto‘lqinli spektroskopiya yordamida o‘lchandi, elektron nurlanishdan keyin XRD tahlili o‘tkazildi. Mexanik xususiyatlar va tekislikdagi elektr o‘tkazuvchanligi o‘rtasidagi teskari bog‘liqlik elektron nurlari ostida 22×10^{16} el/sm² gacha bo‘lgan flyuensda ortishi kuzatilgan [107]. Elektronlar ta’sirida uglerod oralig‘ining paydo bo‘lishi va ko‘chib o‘tishi nazariy va tajriba jihatdan [121] ishda o‘rganildi; nurlanish vaqti 820 s gacha, nurlanish flyuensining zichligi 60-500 A/sm². Shuningdek uglerod atomlarini siljitish chegarasi va defekt hosil qilish darajasi nanonaychalarning diametriga bog‘liqligi ko‘rsatildi. [120] ishda KDUNNlar uchun 70 va 110 keV elektron energiyasida turli flyuensda nurlatirish ta’sirida paydo bo‘ladigan buzilish mexanizmi o‘rganilgan, ammo yuqori elektron energiyalarida bu mexanizm o‘rganilmagan.

[17] ishda BDUNNda neytron oqimi va gamma nurlanish ta’siridan kelib chiqadigan radiatsiya nuqsonlari batafsil bayon etilgan. Unda namunalar neytronlar

bilan $1,28 \times 10^{17}$ n/sm² va gamma nurlari bilan $1,54 \times 10^{17}$ ph/sm² flyuensda nurlantirilgan. Neytronlar va gamma nurlari bilan nurlanishdan so'ng Raman spektroskopiyasi natijalari BDUNN namunalarining uglerod panjarasi tarmog'ida ko'plab buzilish belgilarini ko'rsatdi. I_D/I_G intensivligi nisbati to'yingan chiziqli bo'lmagan ortib boruvchi buzilish reaksiyasini ko'rsatdi, chunki nurlanish ta'sirlari namuna dopingidagi buzilish va zarrachalar ta'sirining buzilishini ko'rsatmoqda. RBM rejimini tahlil qilishda ko'rilgan naycha diametrining oshishi va nurlanish oqimining oshishi bilan D va 2D tarmoqli kengliklarining kengayishi ham BDUNN namunalarining kutilmagan dopingini nurlanishlar paytida yuzaga kelganligini aniqlash uchun ishlatilgan.

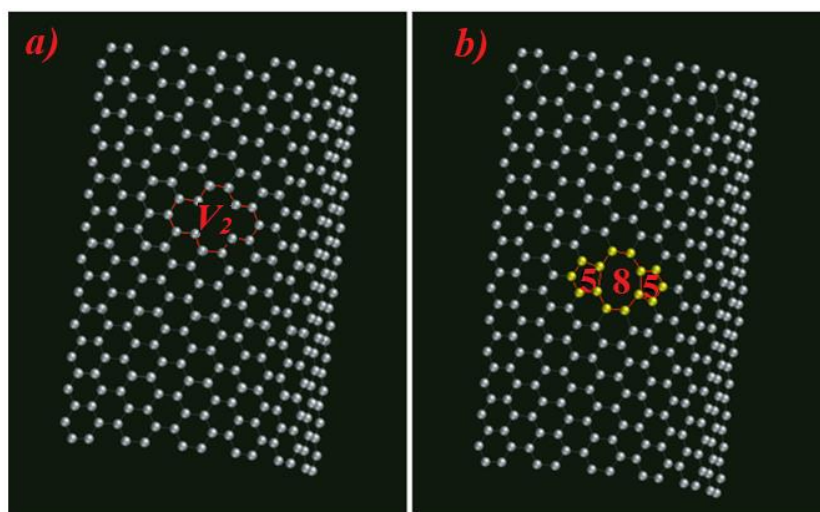
BDUNN xususiyatlarini o'zgartirish usullaridan biri bu elektron nurlanish natijasida nurlanish nuqsonlarini hosil qilishdir. Elektron bilan bombardimon qilish, asosan, π -elektron tizimlarini qo'zg'atish uchun ishlatiladigan kam energiyali fotonlar bilan nurlanishdan farqli o'laroq, nurlanish nuqtaviy nuqsonlarini yaratishga qodir va nanostrukturalar molekularining qutblanishiga olib kelishi mumkin [122]. BDUNNning elektron nurlanishi nafaqat radiatsion nuqsonlarni keltirib chiqaradi, bu nanonaychalarning degradatsiyasiga yordam beradi, bu erda bog'larning uzilishi tufali paydo bo'lgan vakansiyalar o'zaro kesishmalar paydo bo'lishiga olib keladi.

[12] ishda past energiyali elektron bir devorli uglerodli nanonaychaga ta'siri o'rganilgan. BDUNN sintezi paytida uglevodorod cho'kma yotqizilgan EBID va amorf uglerodga elektron nurlari 1 kV da 1 minut davomida 2.3×10^{21} dan 3.1×10^{21} el/sm² flyuensda ta'sir ettirilib, ular Raman spektrlarida D-rejim intensivligining ortishi asosan BDUNNlarning strukturaviy shikastlanishiga emas, balki amorf holatiga bog'liq degan xulosaga kelishdi.

[24] ishda Raman spektroskopiyasi yordamida (1 ~ 18 MeV) energiya va (3.0×10^{-7} ~ 2.2×10^{-2} nC/ μm^2) flyuenslarda BDUNNlardagi xususiyatlarning o'zgarishlari ko'rilgan va yuqori energiyali proton nurlanishi (~ 18 MeV) da Raman spektrlarida sezilarli o'zgarish kuzatilmagan, ammo kam energiyali proton nurlanishlaridan (1 ~ 6 MeV) keyin yarim o'tkazgich BDUNNlarning bir qismi

zararlangan. [118] ishda keltirilgan ma'lumotga ko'ra, elektronlar bilan nurlantirilgan BDUNNlar lokal deformatsiyaga uchragan va uglerod atomlarini taqsimlash joyidan siljishi tufayli naychada bo'yinga o'xshash xususiyatlarni rivojlantirgan.

D_i -vakansiyalar (V_2) da "zipper mexanizm" orqali qayta tartibga solinish natijasida BDUNNning vakansiyalari besh va sakkiz burchakdan iborat agloratsiyasiga aylanadi (1.17.-rasm), bu uning diametrini kattalashishiga olib keladi.



1.17-rasm. BDUNNda nuqsonlar qayta shakillanishi. D_i -vakansiya (V_2) ning besh va sakkiz burchakli halqalarning aglomeratsiyasiga aylanishi [123]

Shuning uchun uglerodli nanonaychalarni o'z-o'zini davolaydigan materiallar deb atash mumkin.

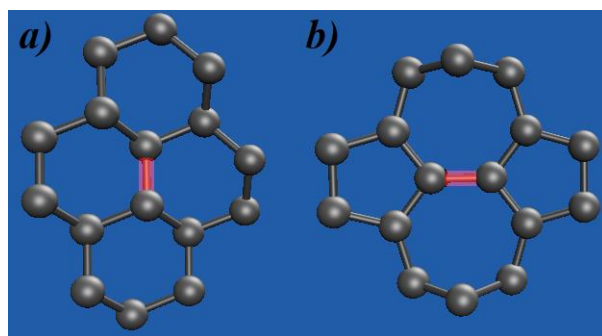
V_3 yoki V_4 singari ko'p vakansiyali nuqsonlar (V_n) tez adron nurlanishi va yuqori energiyali elektron nurlanishidan so'ng hosil bo'ladi. Ko'p vakansiyalar faqat klasterlarda paydo bo'ladi, ularning tuzilishi hali ham noma'lum. Ba'zi vakansiyalarni DLTS o'lchovlari bilan kuzatish mumkin [122].

Eksperimental ravishda kuzatilgan termik ishlov berish paytida UNN diametrining oshishi nisbatan past haroratlarda sodir bo'ladi va "zipper mexanizm" bilan bog'liq bo'lishi mumkin [108, 124], shuningdek adabiyotlarda [125] elektron nurlari ostida paydo bo'lgan vakansiyalarning "zipper mexanizm" orqali

birlashishi va qo'shni naychalar bo'ylab alohida naychalar panjaralarida atomlarning uzluksiz qayta tashkil etilishi aniqlangan. Ikki BDUNNning "birikishi" ning ushbu mexanizmi umumiy Stoun-Uels mexanizmiga asoslangan [126].

Stoun-Uels nuqsoni [127] - kristallografik nuqson bo'lib, u ikkita π -bog'langan uglerod atomlari bog'larining o'zgarishini o'z ichiga oladi va ularning bog'lanish o'rta nuqtasiga nisbatan 90° ga aylanishidan hosil bo'ladi [128].

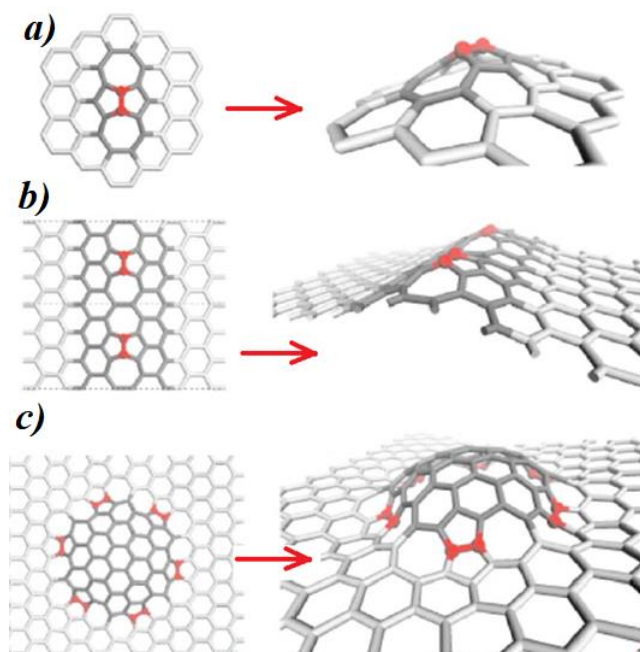
Reaksiya odatda naftalinga o'xshash tuzilmani fulvalen (bisiklopentadieniliden) ga o'xshash tuzilishga aylantirishdan iborat. Reaksiya uglerod nanonaychalari, grafen va shunga o'xshash uglerod ramkalarida sodir bo'ladi, bu erda pirenga o'xshash hududning to'rtta qo'shni olti burchakli halqalari (1.18. a-rasm) ikkita qo'shni aloqani birlashtiruvchi C-C bog'lanish 90° ga aylanganda ikkita besh burchakli halqa va ikkita etti burchakli halqaga aylanadi (1.18. b-rasm). Ushbu materiallarda qayta tartibga solish termal [129], kimyoviy, elektr va mexanik xususiyatlar [130] uchun muhim ahamiyatga ega deb hisoblanadi.



1.18 - rasm. Stoun-Uels nuqsoni

1.19. *a*-rasmda ko'rsatilganidek, mavjud olti burchakning qarama-qarshi tomonlariga ikkita atomni kiritish orqali torroq struktura hosil qilish mumkin. Buning natijasida teskari Stoun-Uels nuqsoni deb ataladigan beshburchak va yettiburchak juftlari hosil bo'ladi. Ushbu 16 atomli blisterning izi $12,2 \times 7,4 \text{ \AA}^2$ va balandligi $2,1 \text{ \AA}$, hosil bo'lish energiyasi $6,20 \text{ eV}$. Bir qator teskari Stoun-Uels pufakchalari deyarli ixtiyoriy konturning gofrirovka qilingan tizmasini hosil qilishi

mumkin (1.19. b-rasm). Bunday tuzilmalar zaryad tashishni boshqarishda foydali bo‘lishi mumkin. Bundan tashqari, yopiq konturlarning yaratilishi natijasida teskari Stoun-Uels nuqsonlari halqasi bilan o‘ralgan pufakchalar paydo bo‘ladi (1.19. c-rasm).



1.19-rasm. a) teskari Stoun-Uels nuqsoni, b) - c) bir qancha teskari Stoun-Uels nuqsonlari [131]

Yuqori energiyali ionlashtiruvchi nurlanish, u metall yoki qotishma bilan ta'sirlashganda, uning hajmiga kirib boradi va asta-sekin moddaning ionlari va elektronlari bilan to'qnashuvda energiyasini yo'qotadi. Bog'lanish energiyasidan katta bo'lgan qo'shimcha energiya olgan ionlarning bir qismi atrof muhitga energiya berish xarakatida ishtirok etadi. Xarakatdagi ionlar va qo'zgalgan (uyg'ongan) elektronlar relaksatsiyasi to'xtagandan so'ng vakansiyalar va atomlararo tugunlar birlashmasidan tashkil topgan buzilgan (shikastlangan, zararlangan) zona xosil bo'ladi. Uzoq muddatli nurlanish ta'siri ostida maxsus metall konstruktsiya hosil bo'ladi, bu termal va radiatsiyaviy stimulyatsiya qilingan diffuziya, klasterlash, nuqtaviy nurlanish nuqsonlarining ichki panjara nuqsonlari bilan o'zaro ta'siri: dislokatsiyalar, zarra chegaralari va aralashmalar paydo bo'lishiga zamin yaratadi. Qattiq jismdagi radiatsion nurlanish, turli xil

nuqsonlarning paydo bo'lishi bilan birga, ko'chish jarayonlarini kuchaytiradi. Misol uchun, radiatsiya ta'siri natijasida qotishmalardagi atomlarning tartiblanishini (yoki tartibsizlanishini), fazalarga parchalanishni tezlashishini, vakansiyalarning shakllanishini va boshqalarni keltirish mumkin [132].

Diffuziya jarayonlari tezlashuvining fizik tasviri ko'p jihatdan nurlanishning tabiatiga bog'liq bo'lib, bu turli xil qattiq jismlarda nurlanish bilan stimulyatsiya qilingan diffuziyaning kuzatilgan ta'sirini tushuntirishga mo'ljallangan xilma-xil modellarning paydo bo'lishiga sabab bo'ldi. Xususan, metallarda va metall birikmalarida radiatsiyaviy-stimullangan diffuziya (RSD) elektronlar mexanizmi ko'pincha nuqtaviy nuqsonlar (vakansiyalar va tugunlararo atomlar) ning ko'payishi bilan tushuntiriladi [132]. Metallarda RSD ning elektron mexanizmlari, yarim o'tkazgichlar va dielektriklardan farqli o'laroq, yuqori energiyali elektronlar qo'zg'alishlarining yuqori relaksatsiya darajasi tufayli samarasiz hisoblanadi.

Turli nitrit tizimlariga bo'lgan qiziqishlar yuqori bo'lganligi sababli turli xil eksperimental natijalarga erishilgan bo'lsada, ushbu tadqiqotlarning aksariyatida ularning fazalari bo'yicha tizimli tadqiqotlar olib borilmagan, ularda kondensatlarning mexanik xususiyatlariga, strukturaviy, tuzilmaviy va deformatsiyalanuvchi holatlarga radiatsiyaning ta'siri o'rganilmagan. [41, 43-45, 130-136] ishlarda Zr (Ti) -Si-N, Ti-Hf-Si-N, Ti-Al-N, (Zr-Ti-Cr-Nb) N, Zr-Ti-Si-N kabi nanokompozitlar o'rganilgan bo'lib, ushbu tadqiqotlarda, asosan, nanokompozitlarning qattiqligi, fazoviy tuzilmalar, fazalar, elastiklik moduli va nanoo'lchovlari aniqlangan.

Bunday nanokompozitlarni yadro reaktorlarida radiatsiyaga chidamli materiallar sifatida ishlatish bo'yicha tadqiqotlar ham mavjud [134]. Nanokompozitlarning nurlanishga chidamliligini o'rganish maqsadida ionlar bilan bambardimon qilish ba'zi mualliflar [134-143] tomonidan olib borilgan. Nanozarrachalarning o'lchamiga nurlanishning ta'siri asosan ionlar yordamida o'rganilgan [137-143]. Ion nurlanishi bilan zarra hajmining o'sishi o'rganilib [143], nanozarrachalarning o'lchami dozaga chiziqli bog'liqligi o'rnatilgan. Ba'zi kukunli metall plyonkalarining (germaniy, kremniy, oltin) Si^+ , Ar^+ , Ge^+ , Kr^+ , Xe^+

ionlari bilan nurlantirishda doza oshishi bilan zarra miqdori (L) ionlar bilan nurlanish dozasiga bog‘liq ravishda $L \propto \Phi t$ (Φ – ionlar flyuensi, t – bombardimon vaqti) ($1,96 \leq n \leq 4$) ko‘rinishda ortishi aniqlandi [144]. Mualliflarning fikriga ko‘ra, bombardimon paytida zarra o‘lchamining o‘shish sur‘atlari ularning nuqsonli populyatsiyalari bilan bog‘liq bo‘ladi. Biroq, [145] ishda Cu plyonkalari Ar^+ ionlari bilan nurlanish natijasida zarraning o‘lchami nurlanish dozasiga quyidagicha bog‘liqligi aniqlandi: $d^{-3.3} - d_0^{-3.3} = K\Phi$. [136] da Pt, Au, Cu va Zr turli xil energiya (0,5-1 MeV), dozalar (8×10^{15} ion/sm² gacha) va harorat (20 K - 300 K) bo‘lgan hollarda kripton va argon ionlari bilan nurlantirildi. O‘rtacha zarra hajmining ion dozasiga bog‘liqligi quyidagicha: $D^3 - D_0^3 = K\Phi t$. Adabiyot sharhidan ko‘rinib turibdiki, bitta element (metall) va ikki komponentli birikmalarning yupqa plyonkalari asosan energiya zonasida nurlanish uchun kripton va argon ionlari yordamida 1 MeV gacha va 10^{16} ion/sm² dozagacha o‘rganilgan.

Namunalarning sirt notekisligiga nurlanishning ta’siri, asosan, ionlar bilan nurlantirish orqali o‘rganilgan [146-148]. Ar va Xe ionlari bilan yupqa ikki qatlamli Ag/Fe plyonkalarini 300-750 keV energiya va 7×10^{16} ion/sm² gacha dozada 20, 77 va 300 K da nurlantirish yuzaning notekisligi va zarra hajmining oshishiga olib kelishi aniqlandi [147]. Argon ionlari bilan nurlanish Zn-Al dagi nanostrukturali qoplamaning yuza notekisligiga deyarli ta’sir ko‘rsatmasligi aniqlandi, ammo shunga o‘xshash nurlanish Fe-Al yuza notekisligini taxminan 2,6 barobar oshirdi [148]. Impulsli elektronlarning po‘lat yuzasidagi yuqori notekislik va past notekisliklarga ta’siri o‘rganilgan [149]. Yuqori sirt notekisligiga ega bo‘lgan po‘latni elektronlar bilan nurlantirish notekislikning pasayishiga olib kelgan, past notekislikka ega bo‘lgan namunada esa u ortadi. Ammo, elektronlarning har xil yupqa plyonkalar va qotishma tizimlariga ta’siri tadqiqotchilar tomonidan kam o‘rganilgan [137]. Garchi materialning fizik jarayonlari va xususiyatlariga ta’sir ko‘rsatsa ham [150], elektron nurlanishning nanokristallitlar kattaligiga va nuqsonlarning paydo bo‘lishiga (dislokatsiya

zichligi, mikro deformatsiya), ko'p komponentli tizimdagi notekislikka ta'siri o'rganilmagan.

Nurlanishning sirt notekisligiga ta'siri o'rganilgan ishlardan birida [151] qalinligi 348 nm bo'lgan VO₂ plyonkaga 18×10^{15} ion cm² dan 210×10^{15} ion cm² gacha bo'lgan flyuensli 2 MeV protonning ta'siri vakuumda o'rganildi. Muallif, boshlang'ich sirt notekisligi ~22,5 nm bo'lgan namuna 110×10^{15} sm⁻² flyuensgacha nurlantirishda oshishini (~ 26,5 nm), so'ngra 140×10^{15} ion sm² da ~20,5 nm gacha kamayishini va 210×10^{15} ion sm² flyuensda esa ~22 nm gacha oshishni boshlaganini aniqladi. Muallifning fikricha, notekislikning bu o'zgarishi "don" yo'nalishining o'zgarishi bilan bog'liq.

Birinchi bob bo'yicha xulosalar

Uglerod asosli nanonaychalarning va Zr, Ti, Hf, Ta, W, V, Nb aralashmali nanoqoplamalarning turli xususiyatlarini o'rganish muammosiga bag'ishlangan ko'plab ilmiy-tadqiqot ishlari yuqorida keltirilib o'tildi. Bu sohadagi deyarli barcha ishlar bitta yoki ikkita muammoning yechimiga qaratilgan bo'lib, ko'p qirrali (turli uslublar) tadqiqotlar olib borilmaganligi aniqlandi. Shuningdek, nanoqoplamalar va nanonaychalarga radiatsiyaning, xususan neytronlar va protonlar ta'siri tadqiqotlari ko'plab olimlar tomonidan keng qamrovli o'rganilgan bo'lib, ammo elektronlar ta'siri natijasida yuz beradigan fizik qonuniyatlar, jarayonlar, struktura o'zgarishining tadqiqi o'rganilmagan. Yuqori energiyalarda yuz beradigan fizik jarayonlarni tavsiflashda nanoqoplamalar va nanonaychalar strukturasi, sirt tuzilishi, atomlar orasidagi bog'lanishlarni o'rganish dolzarbligi sababli namunalarni nurlantirish uchun nanoqoplama namunalari qatlami ~5-7 mkm atrofida ekanligi va nanonaychalarning miqdori kamligi tufayli, ularda elektronlar yo'lini hisobga olib, yuqori energiya chegarasi sifatida 2 MeV elektron energiyasi tanlab olindi.

Tadqiqotda uglerod asosli nanonaychalar va nanoqoplamalar strukturaviy tahlillarini amalga oshirish uchun rentgen difraksiyasi usuli, nanoqoplamalar yuza morfologiyasini o'rganishda atom kuch mikroskopi va skanerlovchi elektron

mikroskop usullari, nanonaychalar tadqiqi uchun Raman spektroskopiyasi usuli tanlab olindi.

Ushbu tadqiqot ishini bajarishda quyidagi vazifalar qo'yildi.

Bir va ko'p devorli uglerodli nanonaychalar strukturasi, 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 va nanokristallitlar holatini aniqlash;

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

(ZrTi)CN nanoqoplamalarga turli flyuensdagi elektronlarning ta'siri natijasida dislokatsiya zichligi va nanokristallitlardagi o'zgarishlarni o'rganish;

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

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

II BOB. TAJRIBA USULLARI VA NAMUNALAR KRISTALL STRUKTURALARINI HISOBLASH

2.1-§. Rentgen difraksiyasi usuli

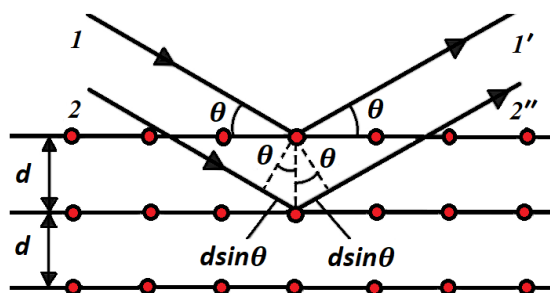
O'rganilayotgan namunaning strukturaviy xususiyatlari haqida eng to'liq va aniq ma'lumot olish vazifasi, shubhasiz, nanostrukturalar fizikasi va texnologiyasi uchun juda muhimdir. BDUNN, KDUNN, (TiZr)CN va (TiHfTa)CN nanokompozitlar strukturaviy xususiyatlarini o'rganishda rentgen difraksiyasi usuli tanlandi.

Rentgen nurlari $\lambda=(10\div 0.001)$ nm elektromagnit to'lqin uzunligiga ega bo'lib, uning qiymati kristalning elementar panjarasi parametrlariga yaqin bo'lganligi sababli atom va molekulalarning tuzilishi haqida yanada yaqqol tasavvurlarga ega bo'linadi. Va shu sababli kristal panjarasida rentgen nurlar difraksiyasi kuzatiladi [152].

Kristall panjara tugunlari kristallga to'lqinlar tushganida ikkilamchi to'lqinlar manbayi bo'ladi va turli atom tekisliklaridan qaytadilar (2.1.-rasm). Agar tugunlar bir tekislikda joylashgan bo'lsa tushish burchagiga teng bo'lgan qaytish burchagi ostidagi qaytgan nurlar yo'l farqi to'lqin uzunligiga karrali bo'lganida difraksion maksimumlar, yani yorug' nuqtalar paydo bo'ladi. Ikki tekislik orasidagi masofa d va rentgen nurlari sirpanish burchagi θ ekanligini inobatga olsak, ikki nurning yo'l farqi $2d\sin\theta$ ga teng bo'ladi. Bregg-Vulf sharti esa,

$$2d\sin\theta=n\lambda \quad (2.1)$$

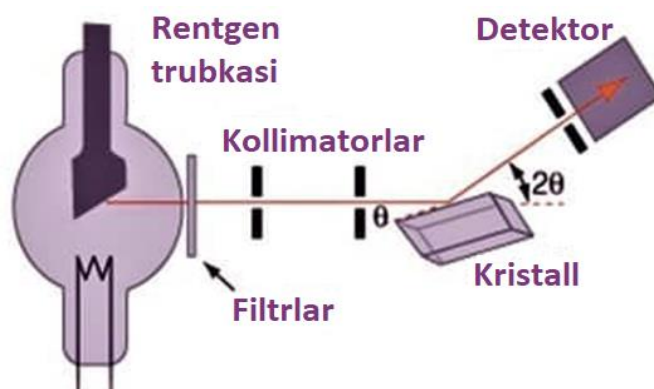
bu yerda n – butun son, λ – rentgen nurlarining to'lqin uzunligi [153].



2.1-rasm. Kristalldagi rentgen nurlar difraksiyasi

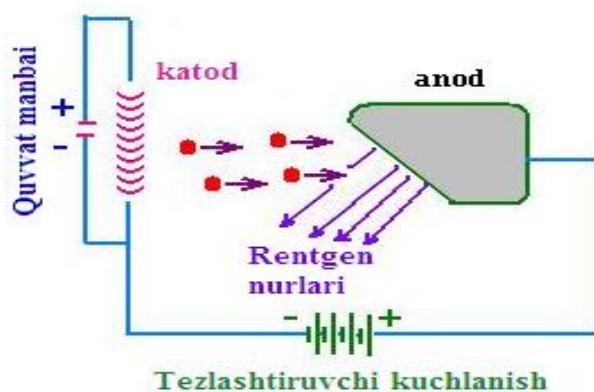
Hozirgi paytda kristallarda to‘lqin difraksiyasini kuzatishning uch xil usuli mavjud: Bregg usuli, Laue usuli, Debay-Sherrer usuli [152].

Ushbu usullardan biri – Bregg usulida o‘z o‘qi atrofida aylanayotgan kristallga monoxromatik nurlar tushiriladi (2.2.-rasm). Kristall Bregg-Vulf shartini qanoatlantiruvchi burchakka burilganda difraksion maksimumlar hosil bo‘ladi [152].



2.2-rasm. Bregg usuli [154]

Rentgen nurlari, ichiga katod va anod elektrodlari joylashtirilgan trubkada 10^{-5} - 10^{-7} mm Hg bosim ostida hosil qilinadi. Katod spiral shaklida bo‘lib, undan past voltli elektr toki o‘tkaziladi, spiral ~ 2000 °C gacha qiziganda katoddan termoelektronlar ajralib chiqadi va anodga kelib tushadi. Anod massiv sterjendan iborat bo‘lib, sterjen sirtida rentgen nurlarini tekshiradigan element qatlami o‘tqizilgan bo‘ladi (2.3.-rasm) [152].



2.3-rasm. Rentgen nurlarini hosil qilish [155]

Zamonaviy rentgen difraktometrlari bilan kukunlar, yupqa plyonkalar, nanomateriallar va qattiq jismlarni tahlil qilish mumkin. Namunalar strukturasi Malvern Pananalytical kompaniyasining Empyrean 3 rusumli zamonaviy difraktometrda tadqiq qilindi. Difraktometrning texnik ko'rsatkichlari 2.1 jadvalda keltirilgan.

Jadval 2.1

Difraktometrning texnik xarakteristikasi

	Empyrean 3
Yuqori kuchlanishli generator	Kuchlanish 10-60 kV; tok kuchi 10-60 mA; quvvati 4 kVt
Generator chiqishi barqarorligi	$\pm 0.01\%$ (10% quvvat o'zgarishi)
Rentgen trubka	nuqtaviy yoki chiziqli fokusga osongina o'tish qobiliyatiga ega ikkita berilyum oynali uzun va keng fokusli keramik naychalar, Cu anod
Goniometr	Vertikal $\theta - \theta$, $\theta - 2\theta$
Diameter	480 mm
Burchak diapazonidan maksimal foydalanish oralig'i	(aksessuarlarga qarab) - $111^\circ < 2\theta < 168^\circ$
Minimal qadam o'lchami	0.0001° (2θ)
Burchakli takrorlanuvchanlik	0.0002° (2θ)
Burchak tezligi	$15^\circ/s$
Soller tirqishi	0.04 rad
2θ chiziqlilik (linearity)	$\pm 0.01^\circ$

Ushbu qurilma o'zining texnik ko'rsatkichlari, tadqiqot o'tkazish imkoniyatlari, qo'shimcha asbob uskunalari, zamonaviy dasturlari, difraksiya natijalari asosida to'laqonli strukturalar bazasi mavjudligi bilan dunyodagi stabil, ishonchli ishlaydigan yetakchi qurilmalardan hisoblanadi. Boshqa difraktometrlardan farqli o'laroq, bu difraktometrda kichik va keng sochilish burchaklarida ham tadqiqotlar o'tkazish imkoniyatiga ega. Shuningdek, turli

o'lcham va holatdagi namunalarning strukturasi, tarkib-tuzilishi hamda ularning xossalari orasidagi bog'liqlikni aniqlash asosida ularning xossalarini yaxshilash mumkin [156].

2.2-§. Raman spektroskopiyasi usuli

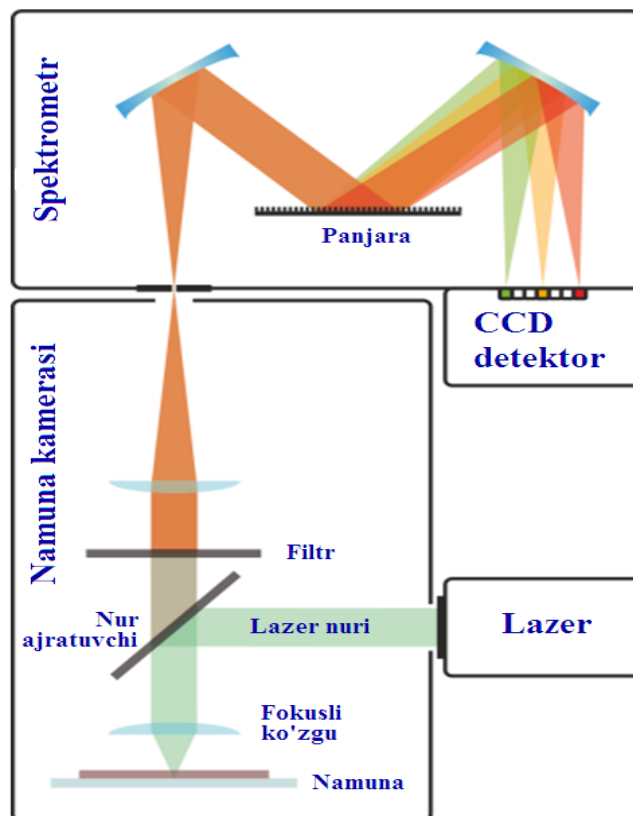
Raman spektroskopiyasi modda molekulalari tebranishini aniqlash uchun qo'llaniladi [157]. Raman spektroskopiyasi fotonlarning noelastik tarqalishiga asoslangan. Monoxromatik nurning manbasi sifatida odatda lazer nurining ko'rinadigan, yaqin infraqizil yoki yaqin ultrabinafsha oralig'idan foydalaniladi, shuningdek rentgen nurlaridan foydalanish ham mumkin. Lazer nuri tizimdagi molekulyar tebranishlar, fononlar yoki boshqa qo'zg'alishlar bilan o'zaro ta'sir qiladi, natijada lazer fotonlarining energiyasi yuqoriga yoki pastga siljiydi. Energiyaning siljishi tizimdagi tebranish rejimlari haqida ma'lumot beradi. Infraqizil spektroskopiya odatda o'xshash, qo'shimcha ma'lumot beradi [158].

Odatda namuna lazer nuri orqali yoritiladi. Yoritilgan joydan elektromagnit nurlanish ob'ektiv tomonidan yig'ilib, monoxromator orqali o'tadi. Lazer chizig'iga to'g'ri keladigan to'lqin uzunligidagi elastik sochilgan nurlanish (Rayleigh tarqalishi) (2.4.-rasm) yoki tirqish filtri, chekka o'tish filtri yoki tarmoqli o'tkazgich filtri bilan filtrlanadi, qolgan nur esa detektorga boradi.

Raman magnitudasining kattaligi molekuladagi elektronlarning qutblanuvchanligi bilan o'zaro bog'liq. Bu foton namunani qo'zg'atadigan noelastik nur sochish shaklidir. Ushbu qo'zg'alish molekulani foton chiqarilishidan oldin qisqa vaqt davomida virtual energiya holatiga keltiradi. Noelastik tarqalish degani, chiqarilgan fotonning energiyasi tushayotgan fotonning energiyasidan pastroq yoki yuqori bo'ladi. Tarqalish hodisasidan keyin namuna boshqa aylanish yoki tebranish holatida bo'ladi [159].

Tizimning umumiy energiyasi molekula yangi rovibronik holatga harakatlengandan keyin doimiy qolishi uchun tarqalgan foton boshqa chastotaga siljiydi. Ushbu energiya farqi molekulaning boshlang'ich va oxirgi rovibronik holatlari farqiga teng. Agar yakuniy holat dastlabki holatga qaraganda yuqori

energiyaga ega bo'lsa, tarqalgan foton umumiy energiya bir xil bo'lib qolishi uchun pastroq chastotaga (pastroq energiyaga) o'tkaziladi. Ushbu chastotali siljish Stoks siljishi yoki pastga siljish deyiladi. Agar oxirgi holat pastroq energiyaga ega bo'lsa, tarqoq foton yuqori chastotaga moyil bo'ladi, bu esa anti-Stoks siljish yoki yuqoriga siljish deb ataladi [159].



2.4-rasm. Raman spektrometrining ishlash prinsipi [158]

Raman effektini namoyish etadigan molekula uchun, uning elektr dipol-elektr dipol qutblanuvchanligi rovibronik holatga mos keladigan tebranish koordinatasiga nisbatan o'zgartirish kerak. Raman nurlarining tarqalish intensivligi qutblanishning ushbu o'zgarishiga mutanosibdir. Binobarin, Raman spektri (tarqalish intensivligi chastota siljishining funksiyasi sifatida) molekulaning rovibronik holatiga bog'liq [157].

Raman effekti namunadagi elektron bulut va monoxromatik nurning tashqi elektr maydoni o'rtasidagi o'zaro ta'siriga asoslangan bo'lib, uning polarizatsiyalanishi asosida molekula ichida induktsiyalangan dipol momentini hosil qilishi mumkin. Lazer nuri molekulani qo'zg'atmasligi sababli, energiya

darajalari o'rtasida haqiqiy o'tish bo'lishi mumkin emas [159]. Ramanning tarqalishi infraqizil (IQ) yutilishidan farq qiladi, bu erda yutilgan fotonning energiyasi dastlabki va oxirgi rovibronik holatlar orasidagi energiya farqiga to'g'ri keladi. Raman tarqalishining elektr dipol-elektr dipol qutblanuvchanligi hosilasiga bog'liqligi, shuningdek, elektr dipol momenti, atom qutb tensori (atomic polar tensor – APT) ning hosilasiga bog'liq bo'lgan IQ spektroskopiyasidan farq qiladi. Ushbu qarama-qarshi xususiyat Raman spektroskopiyasidan foydalangan holda IQ diapazonida faol bo'lmasligi mumkin bo'lgan rovibronik o'tishni tahlil qilishga imkon beradi [160].

Raman siljishi odatda teskari uzunlik birliklariga ega bo'lgan chastotada qayd etiladi, chunki bu qiymat to'g'ridan-to'g'ri energiya bilan bog'liq. Raman spektridagi spektral to'lqin uzunligi va chastota o'rtasida konvertatsiya qilish uchun quyidagi formuladan foydalanish mumkin [157]:

$$\Delta\tilde{\nu} = \left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_1}\right) \quad (2.2)$$

bu erda $\Delta\tilde{\nu}$ chastotada ifodalangan Raman siljishi, λ_0 – qo'zg'alish to'lqin uzunligi, λ_1 – Raman spektrining to'lqin uzunligi. Ko'pincha, Raman spektridagi to'lqinni ifodalash uchun santimetrning teskari nisbati (sm^{-1}) tanlanadi. To'lqin uzunligi aksar hollarda nanometr (nm) birliklarida ifodalanganligi sababli yuqoridagi formulani ushbu birlik konversiyasi uchun quyidagi ko'rinishga keltirish mumkin [157]:

$$\Delta\tilde{\nu}(\text{cm}^{-1}) = \left(\frac{1}{\lambda_0(\text{nm})} - \frac{1}{\lambda_1(\text{nm})}\right) \times \frac{(10^7 \text{nm})}{(\text{cm})} \quad (2.3)$$

Bugungi kunda eng keng tarqalgan zamonaviy detektorlar zaryadlangan qurilmalardir (Charge-Coupled Devices). Raman spektroskopiyasi lazer kabi yorug'lik manbasini talab qiladi. Spekr o'lchamlari ishlatilgan lazer manbasining o'tkazuvchanligiga bog'liq [161]. Odatda qisqaroq to'lqin uzunlikdagi lazerlar Ramanning sochilishini ko'ndalang kesishmalarning v^4 ga ko'payishi tufayli

kuchaytiradi, ammo namunalar degradatsiyasi yoki lyuminesentsiya bilan bog'liq muammolar paydo bo'lishi mumkin [162].

Sochilgan Raman nurlari odatda yig'iladi va spektrograf bilan tarqaladi yoki Fyurje konvertatsiyasini (FT) aniqlash uchun interferometr bilan ishlatiladi. Ko'p hollarda FT-IR spektrometrlari FT-Raman spektrometrlari sifatida o'zgartirilishi mumkin [163]. FT-IR va NIR kabi spektroskopiyaning boshqa tebranish usullari bilan solishtirganda, Raman sochilishi bir qancha muhim afzalliklarga ega. Bu afzalliklar Raman effekti namuna tomonidan yutilgan yorug'likda emas, balki tarqoqlikda namoyon bo'lishi bilan bog'liq. Natijada, Raman spektroskopiyasi deyarli hech qanday namuna tayyorlashni talab qilmaydi va suvning yutilish zonasiga sezgir emas. Raman sochilishining bu xususiyati qattiq, suyuqlik va gazlarni nafaqat bevosita, balki shisha, kvarts va plastmassa kabi shaffof idishlar orqali ham o'lchashni osonlashtiradi [163].

Raman spektroskopiyasi juda o'xshash molekulalar va kimyoviy birikmalarni aniqlash va farqlash imkonini beruvchi yuqori selektivlikka ega. Kimyoviy moddalar o'xshash molekulyar tuzilishga ega bo'lsa ham, ularning Raman spektrlari aniq farqlanadi. Spektral kutubxonalardan foydalanib, Raman spektrlaridan materiallarni aniqlash va tekshirish uchun foydalanish mumkin [163].

Qattiq jismlar fizikasida Raman spektroskopiyasi materiallarni tavsiflash, haroratni o'lchash va namunaning kristallografik yo'nalishini aniqlash uchun ishlatiladi. Yagona molekulalar singari, qattiq materialni ham xarakteristik fonon rejimlari bilan aniqlash mumkin. Fonon rejimi populyatsiyasi to'g'risidagi ma'lumotlar spontan Raman signalining Stoks va anti-Stoks intensivligining nisbati bilan berilgan. Raman spektroskopiyasi yordamida qattiq jismning boshqa past chastotali qo'zg'alishlarini, masalan plazmonlar, magnonlar va supero'tkazuvchi bo'shliq qo'zg'alishlarini kuzatish uchun ham foydalanish mumkin. Anizotrorefleks kristallning yo'nalishini kristallga nisbatan Raman-sochilgan yorug'likning qutblanishidan va lazer nurining qutblanishidan topish mumkin [157].

Nanotexnologiyalarda Raman mikroskopi yordamida ularning tuzilishini yaxshiroq tushunish uchun nanoo‘tkazgichlarni tahlil qilish mumkin va ularning diametrini baholash uchun odatda uglerod nanonaychalarining radial nafas olish rejimi qo‘llaniladi.

inVia Raman analitik asbobi uch xil lazer bilan jihozlangan:

Cobolt CW 532nm DPSS laser RL532C100: To‘lqin uzunligi 532 nm, nominal lazer kuchi 100 mW, nur diametri 0.7 mm.

HELIUM-CADMIUM LASER (IK3201R-F): To‘lqin uzunligi 325 nm, nominal lazer kuchi 20 mW, nur diametric 1.2 mm.

785 nm Spectrum Stabilized Laser Module: To‘lqin uzunligi 785 nm, nominal lazer kuchi 100 mW, nur diametri 0.7 mm.

Jadval 2.2

Renishaw Raman Mikroskopining parametrlari [160]

To‘lqin uzunligi diapazoni	200-2200 nm
Spektrni aniqlik darajasi	0,3 cm^{-1} (maksimumning yarmidagi to‘liq kengligi)
Turg‘unlik	$< \pm 0,01 \text{ cm}^{-1}$
Fazaviy aniqlik darajasi (ko‘ndalang yo‘nalishda)	0,25 mkm
Fazaviy aniqlik darajasi (o‘q yo‘nalishida)	$< 1 \text{ mkm}$

2.3-§. Skanerlovchi elektron mikroskopi va atom-kuch mikroskopi usullari

Mikroskopiya usullari materiallar nanostrukturasi haqida ma’lumot olish uchun xizmat qilib, zarralardan tarkib topgan materiallar o‘lchamini aniqlashga, bo‘linish chegaralarini kuzatishga hamda turli xil modda va materiallar tuzilishini tadqiq qilishga imkon beradi. Mikroskoplar elektronlarni namunadan o‘tish jarayonini (nur sochuvchi elektron mikroskopiya), elektronlarni namunada aks etishi (aks etuvchi elektron mikroskopiya, sust harakatlanadigan elektronlar mikroskopiya) va ionlarni aks etishi (maydon ichidagi ionli mikroskopiya); elektron nur tarami yordamida yuzani skanerlash (skanerlovchi elektron mikroskopiya) yoki zondlash ninasi (skanlovchi elektron mikroskopiya, atom

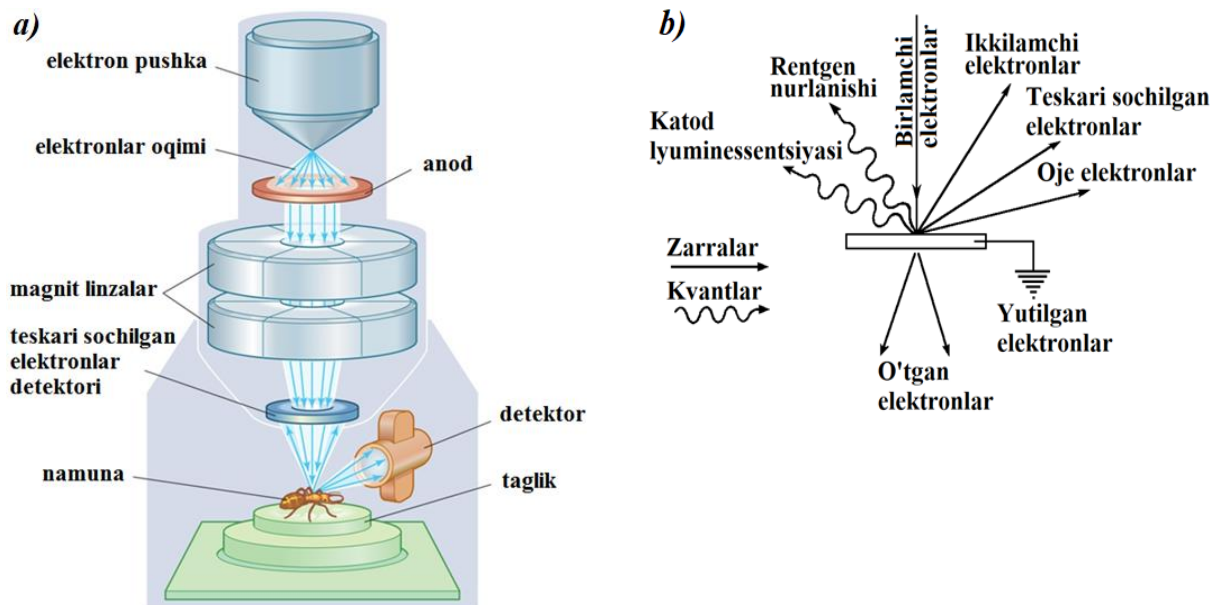
mikroskopiya) ni o'z ichiga qamrab oladi. Materiallarni tahlil qilishda ishlatiladigan aksariyat mikroskopiya usullari nanometrli masshtab hosil bo'lish sharoitlari va o'lchamlarini ta'minlaydi, maydon ichidagi ionli mikroskopiya, skanerlovchi tunnelli mikroskopiya va atom mikroskopiya esa atom o'lchamidagi mikroskopik refleks tasvirlar olish imkoniyatini beradi [165].

Skanerlovchi elektron mikroskopi (SEM) qattiq namunalarning yuzasida turli xil signallarni hosil qilish uchun yuqori energiyali (100-30000 eV) elektronlarning yo'naltirilgan nuridan foydalanadi. Elektron-namuna o'zaro ta'sirdan kelib chiqadigan signallar namunaning tashqi morfologiya (tuzilish) sini, kimyoviy tarkibi va namunani tashkil etadigan materiallar kristall strukturasi va yo'nalishi haqidagi ma'lumotlarni aniqlaydi. Ko'pgina dasturlarda ma'lumotlar namunaning sirtining tanlangan maydoni bo'yicha to'planadi va ushbu xususiyatlarning fazoviy o'zgarishini aks ettiruvchi o'lchovli tasvir hosil bo'ladi. Kengligi taxminan 1 sm dan 5 mikrongacha bo'lgan yuzalarni an'anaviy SEM texnikasi yordamida skanerlash rejimida tasvirlash mumkin (kattalashtirish 20X dan 30,000X gacha, fazoviy o'lchamlari 50 dan 100 nm gacha). SEM shuningdek namunadagi tanlangan joylarni nuqtaviy tahlillarini o'tkazishga qodir; ushbu yondashuv kimyoviy tarkibni (EDS yordamida), kristallit tuzilishini va kristall yo'nalishlarini (EBSD yordamida) sifat yoki miqdoriy jihatdan aniqlashda ayniqsa foydalidir [166].

SEM dagi tezashtirilgan elektronlar kinetik energiyaga ega va bu energiya "tushgan elektronlar" qattiq namunada sekinlashganda elektronlar bilan namunalarning o'zaro ta'siri natijasida hosil bo'lgan turli xil signallar sifatida tarqaladi (2.5. *a*-rasm). Ushbu signallarga ikkilamchi elektronlar (SEM tasvirlarini hosil qiluvchi), teskari sochilgan elektronlar, tarqoq teskari sochilgan elektronlar, fotonlar, ko'rinadigan yorug'lik va issiqlik kiradi (2.5. *b*-rasm).

Ikkilamchi elektronlar va teskari sochilgan elektronlar odatda namunalarni ko'rish uchun ishlatiladi: ikkilamchi elektronlar namunalarda morfologiya va topografiyani ko'rsatish uchun eng ahamiyatlisidir va teskari sochilgan elektronlar ko'p fazali namunalarda tarkibidagi "qarama-qarshiliklarni" tasvirlash uchun juda

muhimdir. Rentgen nurlanishlari tushayotgan elektronlarning namunadagi atomlarning diskret orbitalaridagi elektronlar bilan noelastik to‘qnashuvlari natijasida hosil bo‘ladi. Qo‘zg‘algan elektronlar pastki energetik holatga qaytganda, ular ma’lum bir to‘lqin uzunligidagi rentgen nurlarini beradi.



2.5-rasm. SEM ning ishlash prinsipi [167]

Shunday qilib, elektron nurlari bilan “qo‘zg‘atilgan” mineral tarkibidagi har bir element uchun xarakterli rentgen nurlari hosil bo‘ladi. Uzluksiz rentgen nurlanishining intensivligi Kramers munosabati bilan tavsiflanadi [168]:

$$I_T \sim i_Z \bar{Z} \frac{E_Z - E}{E} = i_Z \bar{Z} \left(\frac{\lambda}{\lambda_{min}} \right) \quad (2.4)$$

bu yerda i_Z – zond toki, Z – nishon atomlarining o‘rtacha atom soni, λ - elektron energiyasining E qiymatiga mos keladigan to‘lqin uzunligining joriy qiymati, $\lambda_{min} - \lambda_{min} = hc/E_Z$ munosabati bo‘yicha zond elektronlarining energiyasi E_Z bilan bog‘liq bo‘lgan spektrning qisqa to‘lqinli chegarasi (Dyuan-Hant chegarasi).

Namuna tayyorlash SEM tahlili uchun minimal bo‘lishi yoki to‘liq bo‘lishi mumkin, bu namunalarning tabiati va kerakli ma’lumotlarga bog‘liq. Minimal tayyorgarlik SEM kamerasiga joylashtiriladigan namunani va elektr izolyatsiyalovchi namunalarda zaryad paydo bo‘lishining oldini olish uchun biron bir moslamani yig‘ishni o‘z ichiga oladi. Elektr izolyatsiyalovchi namunalarning

aksariyati ingichka o'tkazgich materiallari, odatda uglerod, oltin yoki boshqa metall yoki qotishma bilan qoplangan. Supero'tkazuvchi qoplamalar uchun materialni tanlash olinadigan ma'lumotlarga bog'liq: uglerod eng maqbul bo'ladi, agar elementar tahlil ustuvor bo'lsa, metall qoplamalar yuqori aniqlikdagi elektron tasvirlash dasturlari uchun eng samarali hisoblanadi. Shu bilan bir qatorda, elektr izolyatsiya qiluvchi namunani «past vakuum» sharoitida o'tkazuvchan qoplamasiz sinovdan o'tkazish mumkin.

Skanerlash shuningdek elektron yordamida hosil bo'ladigan tokni o'lchaydigan zond yordamida amalga oshirilishi mumkin. Bunda elektronlar namuna yuzasi bilan zond uchi orasi yoki yuza va igna uchi orasidagi o'zaro ta'sir kuchini o'lchaydigan zond yordamida tunellanadi. Skanlovchi elektron mikroskopiyani asosiy qo'llanilish uslubi topografiyani va yuzada elementlarni taqsimlanish xartisini vizuallashtirishdan iborat.

Shuningdek SEM yordamida namunalarning energiya dispersion spektrini (EDS) aniqlash mumkin.

(ZrTi)CN va (TiHfTa)CN namunalarning murakkab tarkibini va yuzada tarqalishini aniqlash uchun skanerlash elektron mikroskopi (SEM EVO MA 10) (CARL ZEISS) ishlatilgan.

Skanerli elektron mikroskop majmuasining asosiy texnik va ekspluatatsion xarakteristikalari bo'yicha umumlashtirilgan ma'lumotlar keltirilgan:

1. Kattalashtirish diapazoni 2 dan 1 000 000 gacha
2. Tezlashtiruvchi kuchlanish diapazoni 0,3kVdan 30 kVgacha
3. Yuqori vakuum rejimida ajrata olish qobiliyati 100 nm dan yomon emas
4. Zondning tok diapozoni 1 pAdan 0,3 mA gacha oraliqdan kichik.
5. Past vakuum rejimida namuna kamerasidagi bosim diapazoni: 10 dan 250

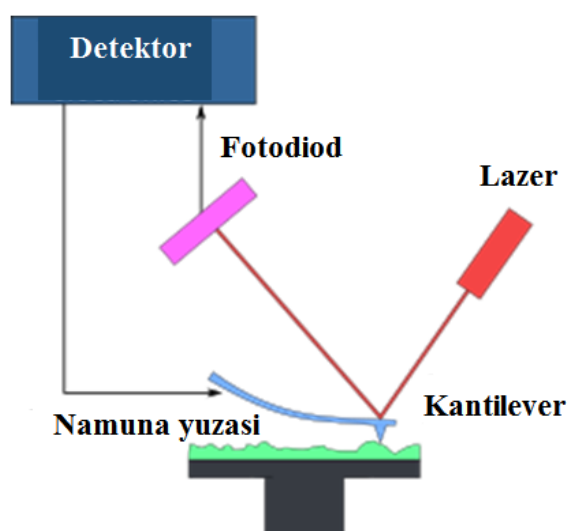
Pa gacha

6. Namunaning maksimal o'lchamlari – balandlik 30 mm, diametr 120 mm
7. Mavjud nishon materiallari – Au, Ag, C.

Materiialarning yuza qismi topografiyasini o'rganishda avvallari optik mikroskop qo'llanilgan bo'lsa, hozirda nanomaterillarni yuza qismini o'rganuvchi elektron mikroskoplar yaratildi. 1986-yili IBM ning Syurix bo'limi laboratoriyasida keyingi avlod mikroskoplari – atom-kuch mikroskoplar (AKM) yaratildi. AKM lar sirtlarni atom o'lchami aniqligida o'rganishga imkon beradi.

Ma'lumki, ~ 0.1 nm yaqin bo'lgan kichik masofalarda ikki jism atomlari o'rtasida itarish kuchlari, katta masofalarda esa tortishish kuchlari paydo bo'ladi. AKM ning ishlash tamoyili shu qonunga asoslangan. Bunda o'rganilayotgan sirt ustida uchi atom birligida bo'lgan igna (kantilever) sirpanadi. Igna uchiga lazer nuri tushiriladi, igna va sirt o'rtasidagi F kuch o'zgarganda o'zgarish lazer nuri orqali maxsus to'rt seksiyali fotodiodga o'tadi va sirtning relyefi haqida malumot beradi. Bunday sistema tufayli nurning $0,1''$ burchak ostida og'ishini o'lchash mumkin.

Igna sirtga yaqinlashgani sari uning atomlarining namuna atomlariga tortilishi kuchayib boraveradi. Igna va sirtning tortishish kuchi to'rt ular elektron bulutlari elektrostatik ravishda bir-biridan itarishish holatiga kelguncha davom etaveradi, yana ham yaqinlashishganda elektrostatik itarish kuchi eksponensial tarzda tortishish kuchini kamaytiradi (2.6.-rasm). Bu kuchlar atomlar orasidagi masofa $0,2$ nm ga yaqin bo'lganda muvozanatlashadi.



2.6-rasm. AKM ning ishlash prinsipi [169]

AKM da sirt ikki usulda tekshiriladi: kantilever orqali va taglik bilan tekshirish. Kantilever orqali tekshirilganda kantilever sirt ustida harakatlanadi, ikkinchisida esa aksincha, namuna o'rnatilgan taglik harakatlanadi.

AKM larning nafaqat namuna sirti relyefini, balki boshqa hususiyatlarini ham aniqlovchi turlari mavjud: Elektr-kuch mikroskop (EKM); Magnit –kuch mikroskop (MKM); Skanerlovchi issiqlik mikroskopi; Magnitorezonans mikroskop; Atomiy –kuch akustik mikroskop; Skanerlovchi friksion mikroskop.

Skanerlovchi tunnel va atom-kuchi mikroskopi o'rtasidagi fundamental farq shundan iboratki, birinchisida sirt (yuza) va zond o'rtasidagi tunnel toki, ikkinchisida ular o'rtasidagi o'zaro ta'sir kuchi aniqlanadi.

Atom kuch mikroskopining eng muhim afzallik tomoni –bu uning har qanday turdagi yuzalarni tadqiq etish uchun qo'llanilishidir: o'tkazgichlar, yarim o'tkazgichlar va dielektriklar. Zamonaviy asboblarni ignani ishqalanish kuchini o'lchashga, materialni tadqiq etilayotgan hududidan elastiklik kartasidan nusxa ko'chirmoq va tirnash usuli orqali chidamlilikni sinash uchun tadqiqotlar olib borishga imkon beradi. Yarim o'tkazgichli olmosli ignalarni hajm kattaligi o'zgarishi bo'yicha qo'llaganda namuna yuzasi (sirti) hajmi, sirdan oldingi qatlam o'tkazuvchanligi va aralashma konsentratsiyasi aniqlanadi. Usulning noqulayliklaridan biri nina materialining barqarorligidir. Biroq ko'pgina tadqiq etiladigan materiallar qattiqligini olmos yoki fulleritdan yasalgan ignalar yetarli darajada bajaradi. Barcha tar'riflangan mikroskoplar topografiya va atomga yaqin joylashgan yuza o'lchamlarini tuzilish nuqsonlari haqida ma'lumot berishga imkoniyat yaratadi.

Kelvin usuli (KM) bilan sirt potentsialini o'lchash rejimida mikroskopning ishlash tamoyillarini qarab chiqsak.

Sirt potentsialini o'lchash rejimida o'tkazuvchi zondga o'zgaruvchan kuchlanish qo'llaniladi va elektr quvvati aniqlanadi, bu bir vaqtning o'zida sirt profilini va sirt potentsial taqsimotini kuzatish imkonini beradi. Bunda biz bir xil sirtga ega zond va namunani ko'rib chiqamiz. Biz ularning ikkalasi ham o'tkazgichlar va ularning potentsiallari mos ravishda V_t va V_s deb faraz qilamiz.

Bunda doimiy potentsialga ega sistemaning elektrostatik erkin energiyasi G (2.5) formula bilan ifodalanishi mumkin [166]:

$$G = -\frac{1}{2}C(V_t - V_s)^2 \quad (2.5)$$

bu erda C - zond va namuna o'rtasidagi sig'im.

Zondga ta'sir etuvchi $F_Z^e(d)$ elektr quvvatini (2.6.) formula bilan ifodalash mumkin [166].

$$F_Z^e = \frac{\partial G}{\partial d} = \frac{\partial}{\partial d} \left[-\frac{1}{2}C(V_t - V_s)^2 \right] \quad (2.6)$$

bu erda d - zond uchi va namuna yuzasi orasidagi masofa.

d masofa ortib borishi bilan sig'im C kamayib borayotganligi sababli, zond va namuna o'rtasidagi elektr quvvati har doim tortuvchi bo'ladi va uning kattaligi sig'im gradientiga proporsionaldir. Zondga qo'llaniladigan kuchlanish quyidagicha yozilishi mumkin [170]:

$$V_t = V_{DC} + V_{AC} \cos \omega t \quad (2.7)$$

Keyin zondga ta'sir etuvchi elektr kuchini quyidagi formula bilan ifodalash mumkin [170]:

$$F(d, t) = F_Z^m(d) + \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial d} \left[(V_{DC} - V_s)^2 + \frac{1}{2} V_{AC}^2 + 2(V_{DC} - V_s)V_{AC} \cos \omega t + \frac{1}{2} V_{AC}^2 \cos 2\omega t \right] \quad (2.8)$$

Demak, ω chastotadagi elektr kuchining tebranishlari amplitudasini quyidagi formula bilan ifodalash mumkin [170]:

$$F_\omega^e = \frac{\partial C}{\partial d} (V_{DC} - V_s)V_{AC} \quad (2.9)$$

AKMda profilni o'lchashda zond va sirt orasidagi masofa doimiy saqlanadi va shu sababli sig'im gradienti va potentsial V_{AC} doimiy bo'ladi. Agar teskari aloqa zondga qo'llaniladigan V_{DC} ni o'zgartirsa, F_ω^e kuchi nolga teng bo'lganda, u holda

har bir skanerlash nuqtasida V_{DC} potentsial V_s ga teng bo‘ladi va namuna yuzasida potentsial taqsimotini chizish mumkin [171].

Dissertatsiya ishida (ZrTi)CN va (TiHfTa)CN namunalarini yuza topografiyasini o‘rganishda (NT-MDT) atom kuch mikroskopi ishlatilgan va uning xarakteristikalari 2.3 jadvalda keltirilgan.

Jadval 2.3

(NT-MDT) atom kuch mikroskopining skanerlash tizimi

Skanerlash maydoni	100×100×10 mkm ($\pm 10\%$)
Chiziqli o‘lchamlarning nisbiy o‘lchov xatoligi: XY tekisligida	1% dan ko‘p emas (teskari aloqa datchiklari bilan 0,1% dan ko‘p emas)
Z o‘qida	5% dan ko‘p emas
XY tekisligida chiziqli bo‘lmagan skanerlash (teskari aloqa datchiklari bilan)	0,1% dan ko‘p emas
XY o‘qi bo‘ylab shovqin	0,3 nm dan ko‘p emas 0,001 nm dan ko‘p emas (eng yuqori ruhsat etilgan rejimda)
Z o‘qi bo‘ylab shovqin	0,04 nm dan ko‘p emas 0,02 nmdan ko‘p emas (eng yuqori ruhsat etilgan rejimda)

2.4-§. Namunalar va ularni nurlantirish usuli

SEM natijalariga ko‘ra (ZrTi)CN qoplama quyidagi tarkibdan iborat: Zr – 65,2 (0,9)%, Ti – 10,4 (0,9)%, C – 11,0 (0,7)%, N – 12,5 (0,9)% va Fe – 0,9 (0,2)%. (TiHfTa)CN nanoqoplama esa Ti – 41,7 (0,2)%, Hf – 29,4 (0,2)%, Ta – 8 (0,2)%, N – 13,9 (0,3)% O – 3,0 (0,1)% va Fe - 0,4 (0,1)%. Nanokompozitlar namuna yuzasida bir tekis taqsimlanganligini aniqlash maqsadida 35 dan ortiq nuqtalar skanerlandi. Fe esa asos material elementidir.

Tadqiqotda namunalarni elektronlar flyuensi bilan nurlantirishda “Elektronika U003” elektron tezlatgichidan foydalanilgan. «Elektronika U003» elektron tezlatgichi ko‘p maqsadli ionlashtiruvchi nurlanish manbai bo‘lib, tezlashtirilgan elektronlar va tormozlangan nurlar yordamida ilmiy tadqiqotlar va radiatsion-texnologik jarayonlarda foydalanishga mo‘ljallangan [172].

Elektronlarning energiyasi oralig'i 4-8 MeV bo'lib, bunday energiya bilan nurlantirilgan yupqa qoplamali nanomateriallarda energiya yutilishi kam bo'lganligi bois strukturaviy o'zgarishlar kuzatilmadi. Elektronlar energiyasini kamaytirish maqsadida elektronlar yo'liga alyumin to'siq o'rnatildi. Elektronlar energiyasining kamayishi nishon qalinligiga va tanlangan materialga bog'liq. Elektronlarning effektiv bosib o'tgan yo'li uzunligi to'siqda elektronlarning to'liq yo'qotgan energiyasini harakterlaydi. Alyumin folgada effektiv bosib o'tilgan yo'l quyidagi tenglik bilan aniqlanadi [173]:

$$R_{eff}(Al) = 0.54E_e - 0.133 \quad (2.10)$$

bu yerda E_e – elektronlar energiyasi va $E_e > 0,8$ MeV.

Elektronlarning boshqa materiallarda effektiv bosib o'tgan yo'li uzunligi $R_{eff}(Al)$ bilan munosabati quyidagi tenglik orqali ifodalanadi [173]:

$$R_{eff}^{mat}(A, Z) = R_{eff}(Al) \frac{(Z/A)_{Al}}{(Z/A)_{mat}} \quad (2.11)$$

bu yerda Z – zaryad, A – nishon materialining atom nomeri.

2.4-jadvalda turli materiallarda turli energiyali elektronlarning effektiv bosib o'tgan yo'li uzunligi keltirilgan.

Jadval 2.4

Turli materiallarda turli energiyali elektronlarning effektiv bosib o'tgan yo'li uzunligi hisoblari

Material, g/cm ² Elektron energiyasi, MeV	Titan	Sirkoniy	Gafniy	Tantal
6,0	3,258	3,414	3,711	3,711
2,0	0,996	1,043	1,134	1,134

Alyumin to'siqdan o'tgan tok zichligini aniqlash uchun diametri 10 sm² va 1 sm² bo'lgan Faradey slindiridan foydalanildi. Faradey slindirining yutuvchi qismi sifatida zanglamaydigan po'latdan foydalanildi.

Elektronlar flyuens zichligini o'lchashdagi xatolik $\delta\varphi_e \leq 10\%$ [174].

Elektron energiyasini aniqlash maqsadida "Elektronika U003" chiziqli elektron tezlatgichida elektronlar dastasi yo'lga Riso 2 Piece alyumin pona qo'yildi va alyumin pona ichiga 30 ta "B3110 energy card B3WINdose radiochromic film (AQSh)" dozimetri joylashtirildi.

Nurlantirishdan so'ng dozimetrlarning yutilish dozalari va energiyalari Thermo Genesys 20 (AQSh) spektrofotometrda, Windose for Excell 2002 (AQSh) dasturi yordamida aniqlab borildi. Elektronlarning energiyasini aniqlash dasturi Gex korporatsiyasi tomonidan yaratilgan.

Alyuminiy ponaning o'lchash xatoligi 1,5 %, dozimetrlarni o'lchash xatoligi 5 %, spektrofotometr (P4120EU-Thermo Spectronic Genesys 20 Spectrophotometer) xatoligi 0,36 %, plyonka dozimetrining qalinlik xatoligi 1,2 %.

Namunani nurlantirish uchun namunalar Al to'siq ortiga elektronlar dastasiga nisbatan perpendikulyar ravishda o'rnatildi. Namunani o'rnatishdan oldin elektronlar energiyasi va dastatokining zichligi o'lchab olindi. Namunani nurlanish ta'sirida haroratini ko'tarilib ketishini oldini olish maqsadida sovutgich (ventilyator) o'rnatildi. Bunda namunlar energiyasi ~2 MeV bo'lgan tezlashtirilgan elektronlar bilan 0,17 mA/sm² dasta tokining zichligida nurlantirildi.

BDUNN $1,2 \times 10^{17}$ el/sm² va $1,5 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensda, KDUNN $2,3 \times 10^{17}$ el/sm², $3,1 \times 10^{17}$ el/sm², $4,0 \times 10^{17}$ el/sm² va $5,1 \times 10^{17}$ el/sm² flyuenslarda nurlantirildi.

(ZrTi)CN nanoqoplamasi $0,2 \times 10^{17}$ el/sm², $2,3 \times 10^{17}$ el/sm², $3,1 \times 10^{17}$ el/sm² va $4,1 \times 10^{17}$ el/sm² flyuenslarda nurlantirildi.

(TiHfTa)CN nanoqoplamasi $0,2 \times 10^{17}$ el/sm², $1,5 \times 10^{17}$ el/sm², $2,5 \times 10^{17}$ el/sm², $3,5 \times 10^{17}$ el/sm² va $4,5 \times 10^{17}$ el/sm² flyuenslarda nurlantirildi.

2.5-§. Fullprof dasturi

Hozirgi vaqtda rentgen difraktometriya eksperimentlari ma'lumotlarini qayta ishlashning eng keng tarqalgan usuli bu strukturaning sinov modeli uchun rentgen difraktometriya ma'lumotlarini modellashtirish va ularni o'lchov natijalariga moslashtirishdir. Bunday usulga asoslangan dasturlardan biri FullProf dir.

FullProf dasturidan tajriba yo'li bilan olingan namunalarning rentgenogrammalari (difraktogrammalari) orqali ko'rilayotgan namunaning strukturasini, namunani tashkil etgan elementlar konsentratsiyasini aniqlash va to'la profilli analiz uchun foydalaniladi.

FullProf dasturida Ritveld takomillashtirish uslubidan foydalaniladi [175].

Ushbu usul hisoblangan va kuzatilgan difraktogrammalar orasidagi farqlarni eng kichik kvadratlar usuli yordamida kamaytirishga asoslangan.

Unga ko'ra, difraksiya spektrlari ma'lumotlarini sochilish burchaklari yoki energiyalarning diskret to'plami uchun raqamli shaklda yozib olish mumkin. Agar bu tarqoq o'zgaruvchini T deb olsak, diffraksion namuna odatda ikkita $\{T_i, y_i\}_{i=1, \dots, n}$ massivlar shaklida beriladi [175].

Ma'lumotlar qayta ishlangan yoki biron bir tarzda normallashtirilgan bo'lsa, uchta $\{T_i, y_i, \sigma_i\}_{i=1, \dots, n}$ massivlari kerak bo'ladi, bu erda σ_i – profil intensivligi y_i ning standart og'ishi, u qoldiqlarni tuzatish uchun kichik kvadratlar usulida kerakdir. Hisoblangan y_{ci} qiymatlari yordamida Bregg reflekslari va fonning i -qadamdagi hissasini jamlab profilni modellashtirish mumkin [175, 176]:

$$y_{c,i} = \sum_{\phi} S_{\phi} \sum_h I_{\phi,h} \Omega(T_i - T_{\phi,h}) + b_i \quad (2.12)$$

h ($= H$, yoki $= H + k$) vektor Bregg refleksini ifodalaydi, ϕ indeks fazani bildiradi va modeldagi fazalar soniga qadar o'zgaradi. FullProf-da faza atamasi $I_{\phi,h}$ integral intensivlikni hisoblash bilan ekvivalentdir. Integral intensivlikning umumiy ifodasi [175]:

$$I_{\phi,h} = \{LAPCF^2\}_{\phi,h} \quad (2.13)$$

Soddalashtirish uchun biz ϕ -indeksni qisqartiramiz va $\{y_i\}$ va $\{y_{ci}\}$ massivlarini mos ravishda y_{ob} va y_{calc} deb belgilaymiz. (2.12.) va (2.13.) da keltirilgan tashkil etuvchilarning ma'nosi quyidagicha [175]:

- S_ϕ – ϕ faza uchun shkala faktori
- L_h – Lorens qutblanish va multipletlik faktori
- F_h – struktura faktori
- A_h – h yutilishni to'g'irlash
- P_h - yo'nalish funksiyasi (preferred orientation function)
- Ω - ham instrument, ham namuna effektlarni modellashtiruvchi reflekslar profilining funksiyasi
- C_h – maxsus tuzatishlarni o'z ichiga oladi (non linearity, efficiencies, special absorption corrections, extinction, etc)
- b_i – fon intensivligi qiymatlari

Rietveld usuli kuzatilgan $\{y\}_{i=1,\dots,n}$ va hisoblangan (2.12) difraktogrammalar $\{y_{c,j}(\alpha)\}_{i=1,\dots,n}$ o'rtasidagi o'rtacha kvadratik farqni (ma'lum og'irlik funksiyasi bilan) minimallashtirish orqali kristalli strukturani takomillashtirishdan iborat, $\alpha=(\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,\dots,\alpha_p)$ parameter vektoriga nisbatan [175]. Rietveld usulida minimallashtirilgan funksiya:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n w_i \{y_i - y_{c,i}(\alpha)\}^2 \quad (2.14)$$

$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$ og'irlik funksiyasi bilan, kuzatilgan y_i o'zgarishi σ_i^2 bo'ladi.

Agar erkin parametrlarning optimal to'plami α_{opt} bo'lsa, (2.17.) minimumi uchun zaruriy shart shundaki, χ^2 ning gradienti nolga teng bo'lishi kerak [175, 176]:

$$\left(\frac{\partial \chi^2}{\partial \alpha}\right)_{\alpha=\alpha_{opt}} = 0 \quad (2.15)$$

χ^2 ni yaxshilash uchun har bir hisob sikldagi parametrlarga qo‘llaniladigan siljishlar chiziqli tenglamalar tizimini (normal tenglamalar) echish yo‘li bilan olinadi.

$$A\delta_{\alpha_0} = b \quad (2.16)$$

Fullprofda ishlatiladigan Gauss-Nyuton algoritmidagi $p \times p$ matritsasi A va b vektorlarining tarkibiy qismlari quyidagi ifodalar bilan berilgan [176]:

$$A_{kl} = \sum_i w_i \frac{\partial y_{c,i}(\alpha_0)}{\partial \alpha_k} \frac{\partial y_{c,i}(\alpha_0)}{\partial \alpha_l} \quad (2.17)$$

$$b_k = \sum_i w_i (y_i - y_{c,i}) \frac{\partial y_{c,i}(\alpha_0)}{\partial \alpha_k} \quad (2.18)$$

Normal tenglamalarni echish natijasida olingan δ_{α_0} parametrlarining siljishlari boshlang‘ich parametrlarga qo‘shilib, yangi $\alpha_1 = \alpha_0 + \delta_{\alpha_0}$ to‘plamini keltirib chiqaradi. Yangi parametrlar keyingi sikldagi boshlang‘ich deb hisoblanadi va jarayon konvergensiya mezonlari bajarilguncha takrorlanadi. Belgilangan parametrlarning standart og‘ishlari quyidagi ifoda bilan hisoblanadi [175]:

$$\sigma(\alpha_k) = |a_k| \sqrt{(A^{-1})_{kk} \chi_v^2} \quad (2.19)$$

Bu yerda χ_v^2 quyidagicha aniqlanadi:

$$\chi_v^2 = \frac{\chi^2}{n-p} \quad (2.20)$$

a_k miqdori – bu α_k parametrning kompyuter ichki kodida yozilgan kod-koeffitsienti. Yuqoridagi formulada ishlatilgan χ_v^2 miqdori har doim Bregg hissasiga ega bo‘lgan refleksdagi nuqtalar uchun hisoblanadi, shuning uchun σ_1 boshqa dasturlar bilan hisoblangan, mos keladigan qiymatdan katta bo‘lishi mumkin. Fullprofda χ_v^2 miqdorni aniqlashda ko‘rib chiqilgan barcha punktlar uchun ham hisoblanadi, shuning uchun foydalanuvchi standart og‘ishning muqobil qiymatini osongina qayta hisoblab chiqishi mumkin [175, 176].

Kuzatilgan va hisoblangan profillar o'rtasidagi mos kelishlik sifati shartlifaktorlar to'plami bilan o'lchanadi. FullProfda n butun songa nisbatan ikkita indekslar to'plami hisoblanadi. Birinchi to'plamda n - takomillashtirishda foydalanilgan nuqtalarning umumiy soni. Ikkinchi to'plamda faqat Bregg hissasi bo'lgan joylar hisobga olinadi. p - aniqlangan parametrlar soni.

Indekslarning ta'rifi quyidagicha [175, 176]:

Shakl faktori:

$$R_P = 100 \frac{\sum_{i=1,n} |y_i - y_{c,i}|}{\sum_{i=1,n} y_i} \quad (2.21)$$

O'rtacha shakl faktori:

$$R_{wp} = 100 \left[\frac{\sum_{i=1,n} w_i |y_i - y_{c,i}|^2}{\sum_{i=1,n} w_i y_i^2} \right]^{1/2} \quad (2.22)$$

Kutilayotgan o'rtacha shakl faktori:

$$R_{exp} = 100 \left[\frac{n-p}{\sum_{i=1,n} w_i y_i^2} \right]^{1/2} \quad (2.23)$$

Mos ko'rsatkichni yaxshilash:

$$S = \frac{R_{wp}}{R_{exp}} \quad (2.24)$$

Xi –kvadratni kamaytirish:

$$\chi^2_v = \left[\frac{R_{wp}}{R_{exp}} \right]^2 = S^2 \quad (2.25)$$

Bregg faktori:

$$R_B = 100 \frac{\sum_h |I_{obs,k'} - I_{calc,h}|}{\sum_h |I_{obs,h}|} \quad (2.26)$$

Kristallografik R_F faktori:

$$R_F = 100 \frac{\sum_h |F_{obs,k} - F_{calc,h}|}{\sum_h |F_{obs,h}|} \quad (2.27)$$

Standart Rietveld R-faktorlari: cR_p , cR_{wp} yuqoridagi kabi hisoblanadi, lekin fonda tuzatilgan hisoblashlar yordamida maxrajdagi y_i miqdori $y_i - b_i$ ga o'zgartirilgan.

Kuzatilgan integral intensivlik $|I_{obs,h}|$ aslida Rietveld formulasidan hisoblanadi [175]:

$$|I_{obs,h}| = I_{calc,h} \sum_i \left\{ \frac{\Omega(T_i - T_h)(y_i - b_i)}{(y_{c,i} - b_i)} \right\} \quad (2.28)$$

Ushbu formula haqiqiy modelga muvofiq uning tarkibiy qismlari o'rtasida klasterning integral intensivligini mutanosib ravishda taqsimlashga ekvivalentdir. Agar model $\mathbf{h}(I_{calc,h} = 0)$ refleks uchun qat'iy nol integral intensivlikni o'z ichiga olsa, kuzatilgan integral intensiv ham nolga teng bo'ladi: $|I_{obs,h}| = 0$, $|I_{obs,h}|$ eksperimental spektrdan nolga teng emasligi aniq bo'lsa ham. Natijada reflekslar $I_{calc,h} = 0$ bilan Bregg R-faktoriga hissa qo'shmaydi [175, 176].

FullProf- 2018 dasturidan foydalanib namunaning rentgenogrammasini ko'rish, turli rentgenogrammalarni solishtirish, hisoblash, yarim kengliklarni aniqlash, hisoblangan rentgenogrammani rasm ko'rinishida saqlash va boshqa amallarni bajarish mumkin.

Namunaning rentgenogrammasini hisoblashda bizga FullProf dasturini nazorat qilish uchun ishlatiladigan **pcr** fayl zarur bo'ladi. Bu **pcr** faylni FullProf dasturida istalgan namunalar uchun yaratish mumkin. Buning uchun FullProf dasturining **ED PCR** paneli bilan ishlanadi.

Bundan avval namunani hisoblash uchun WinPlotr oynasidagi Point Selection panelidan rentgenogrammaning fonini belgilab, **BGR** format hosil qilamiz. Saqlangan fon biz uchun muxim xisoblanadi, namunaning rentgenogrammasini xisoblashda shu fondan foydalanamiz. Buning uchun saqlangan fon va **dat** fayl bir faylni ichida joylashishi kerak.

ED PCR oynasini ochib yangi *.pcr* fayl yaratiladi. **FullProf PCR Editor** oynasida joylashgan **General, Patterns, Phases, Refinement** panellari bilan ishlab namunaning *pcr* faylini yaratishimiz mumkin bo‘ladi. **Phases** va **Refinement** panellarida moddaning asosiy kristalografik kattaliklari bilan ishlanadi, unda kristall simmetriyasi, atomlar joylashuvi, kristall panjara parametrlarini aniqlash mumkin.

Ikkinchi bob bo‘yicha xulosalar

1. (ZrTi)CN va (TiHfTa)CN nanoqoplamalari, BDUNN, KDUNN strukturasi aniqlash usullarini tahlil qilish shuni ko‘rsatadiki, kristall tuzilishini o‘rganish uchun rentgen difraksiyasi usuli boshqa difraksiya usullariga nisbatan bir qator afzalliklarga ega. Shuning uchun bu ishda rentgen difraksiyasi usuli tadqiqot uchun asosiy eksperimental usul sifatida tanlangan. Tadqiqotda XRD-6100 (Shimadzu, Japan) va Empyrean 3 (Malvern Panalytical) difraktometrlaridan foydalanildi. BDUNN va KDUNN strukturasi o‘rganishda XRD-6100 (Shimadzu, Japan) qurilmasidan foydalanilgan. O‘lchov rejimi quyidagicha: skanerlash oralig‘i – $2\theta_B = 8^\circ - 90^\circ$, skanerlash tezligi – 2 deg/min va qadam – $2\theta = 0,020^\circ$. (ZrTi)CN va (TiHfTa)CN strukturasi o‘rganishda Empyrean 3 (Malvern Panalytical) qurilmasidan foydalanilgan. O‘lchov rejimi quyidagicha: skanerlash oralig‘i – $2\theta_B = 8^\circ - 100^\circ$, skanerlash tezligi – 2 deg/min va qadam – $2\theta = 0,013^\circ$.

2. (ZrTi)CN va (TiHfTa)CN yuza topografiyasini o‘rganish va elementlar taxlili uchun SEM va AKM mikroskoplaridan foydalanildi. Ushbu mikroskoplar yuqori aniqlikda o‘lchovchi so‘nggi texnologik qurilmalar sifatida ahamiyatlidir. SEM natijalariga ko‘ra (ZrTi)CN qoplama quyidagi tarkibdan iborat: Zr – 65,2 (0,9)%, Ti – 10,4 (0,9)%, C – 11,0 (0,7)%, N – 12,5 (0,9)% va Fe – 0,9 (0,2)%. (TiHfTa)CN nanoqoplama tarkibi esa quyidagicha: Ti – 41,7 (0,2)%, Hf – 29,4 (0,2)%, Ta – 8 (0,2)%, N – 13,9 (0,3)% O – 3,0 (0,1)% va Fe – 0,4 (0,1)%. Namunalarda Fe asos materialiga ta’luqli.

3. Raman spektroskopiyasi tahlili BDUNN va KDUNN lar haqida juda salmoqli ma’lumot beruvchi va rentgen difraktometrida olingan natijalar taxlillari bilan bir-birini to‘ldiruvchi usul bo‘lib, u olingan natijalarning ishonchliligi mezoni

bo'lib hizmat qiladi. Raman spektrlari xona haroratida argon ionli lazer qo'zg'alishi 532 nm (10 mVt quvvat) bilan 100-30000 sm^{-1} oralig'ida va 1800 I/mm (vis) panjara yordamida qayd etilgan.

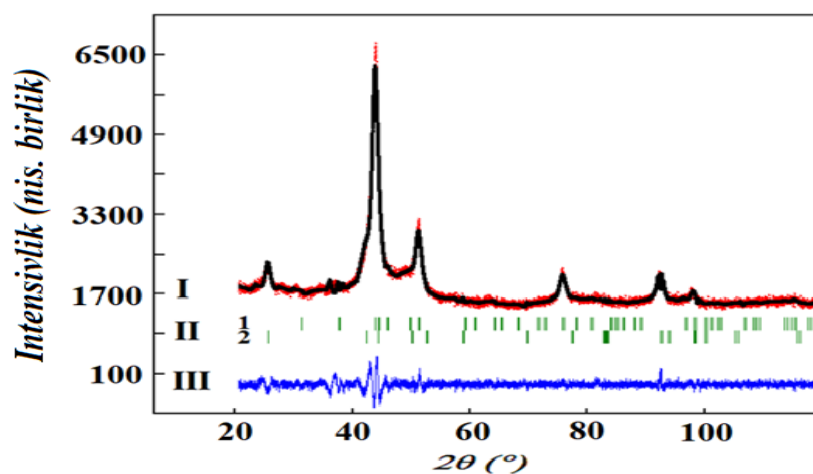
4. FullProf dasturi orqali Ritveld metodi bilan namunalarni strukturaviy tahlil qilish eng kichik kvadratlar usuliga asoslangan bo'lib, bu bizga aniq strukturaviy ma'lumotlar beradi.

III-BOB. ELEKTRONLAR DASTASINING BIR VA KO‘P DEVORLI UGLEROD NANONAYCHALARI, NANOQOPLAMALAR STRUKTURASI, MORFOLOGIYASI HAMDA RAMAN SPEKTROSKOPIYAGA TA‘SIRINI O‘RGANISH

3.1-§. Elektronlar dastasining bir va ko‘p devorli uglerod nanonaychalari strukturasi hamda Raman spektroskopiyasiga ta‘siri tadqiqoti

3.1.1. BDUNNning rentgenostrukturaviy natijalari va tahlillari

BDUNNning nurlantirishdan avvalgi difraktogrammalari Fullprof dasturi yordamida Ritveld usuli bilan ishlov berish orqali o‘rganildi (3.1.-rasm). Ko‘plab mavjud bo‘lishi ehtimoli bo‘lgan fazoviy guruhlar ($Fd\bar{3}m$, $P6_3mmc$, $P6_3/mc$, $P6/mmm$, $R\bar{3}m$) o‘rganildi va BDUNN namunasining fazoviy guruhi topildi. BDUNN fazoviy guruhi ikki fazadan iborat ($P6/mmm$ va $P6_3/mc$ ($\chi^2=2,09$)) ekanligi aniqlandi.



3.1-rasm. BDUNN strukturaviy tuzilishining dastlabki holat uchun rentgen difraktogrammasi. I –experimentda kuzatilgan (—) va hisoblangan (—) ma‘lumotlar, II –Bregg reflekslari, III –kuzatilgan va hisoblangan ma‘lumotlar [123]

Namuna bir fazali sifatida tahlil qilinganda χ^2 (Bregg hissasi.) 10,7, Bregg R-faktor 82,3, R_f -faktor 92,2 ni tashkil etdi. Namuna $1,18 \times 10^{17}$ va $1,54 \times 10^{17}$ e l /sm 2

elektronlar flyuensi bilan nurlantirildi, o'lchangan rentgenogrammalardan foydalanib, ikki fazaning elementar panjara parametrlari aniqlandi (3.1.-jadval).

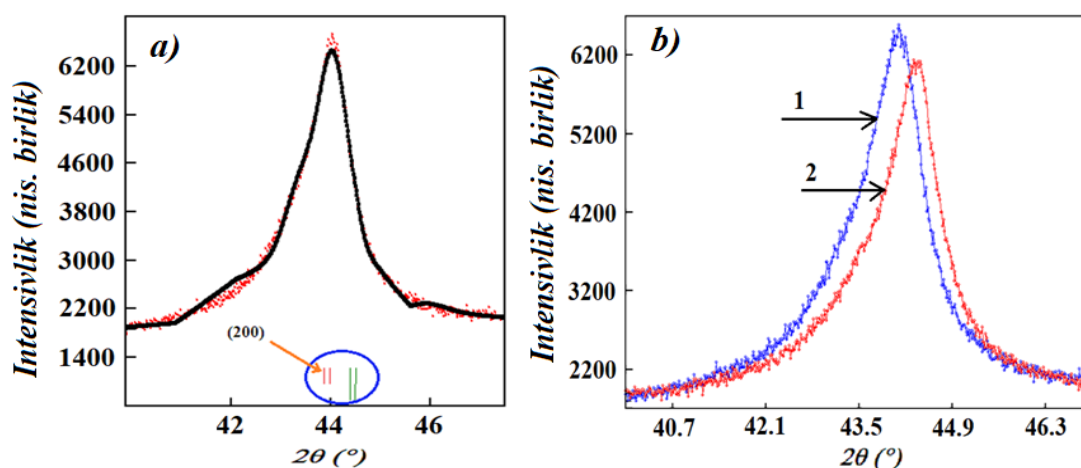
Jadval 3.1

BDUNN namunasidagi geksagonal elementar panjaralar parametrlari. 1-faza – (faz.gr. P6/mmm) va 2-faza – (faz.gr. P6₃/mc) [123]

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

Rentgenogrammada $2\theta_B=44^\circ$ burchakka birinchi fazadan (200) va (111) Bregg reflekslar, ikkinchi fazadan (101) refleks mos keladi (3.2 a-rasm). (111) va (101) reflekslarning intensivlik ulushi 0 ga teng va bu intensivlik birinchi fazaning (200) tekisligidan qaytayotganligini bildiradi.

Elektronlarning turli flyuenslari bilan nurlantirilgandan keyingi barcha eksperimental rentgenogrammalar taqqoslandi va faqat (200) refleksning intensivliklarida nurlanish flyuensining oshishi bilan yuqori sochilish burchagi tomon siljishi kuzatildi (3.2. b-rasm).



3.2-rasm. a) Nurlantirilmagan BDUNN rentgenogrammasidagi (200) Bregg refleksi, b) 1 – nurlantirilmagan va 2 – 1.54×10^{17} e⁻/sm² elektronlar flyuensida nurlantirilgan BDUNN difraktogrammasining kesimi [123]

Nurlanishdan keyin namunada C=C bog‘lar orasidagi masofa kattalashganligi aniqlandi (3.2-jadval).

Jadval 3.2

BDUNNda C-C bog‘lar orasidagi masofa [123]

Fluence, electron/sm ²	a_{C1-C2} , Å	a_{C1-C3} , Å	a_{C1-C4} , Å
0	1,453±0,001	2,749±0,001	3,109±0,001
$0,2 \times 10^{17}$	1,452±0,001	2,851±0,001	3,199±0,001
$1,54 \times 10^{17}$	1,453±0,001	2,749±0,001	3,109±0,001

3.1.2. BDUNN ning Raman spektroskopiyasi natijalari va tahlillari

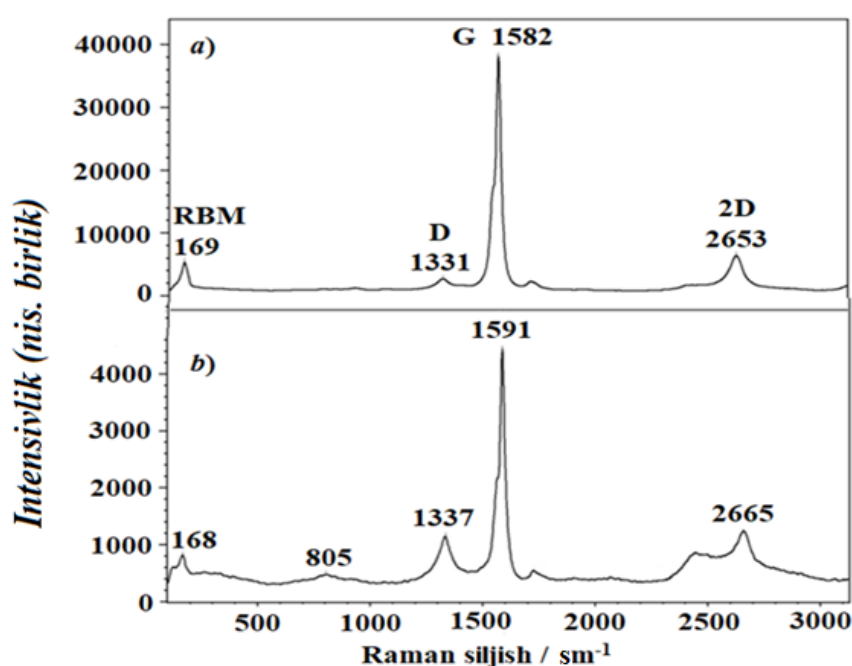
Raman spektroskopiyasida RBM rejimi chastotasi naycha diametriga teskari proporsional bo‘lib, u namunada diametr taqsimotini aniqlash uchun muhim hisoblanadi. BDUNNning RBM rejimi chastotasi mos ravishda nurlantirilmagan va nurlantirilgan namunalar uchun 169 cm^{-1} va 168 cm^{-1} da kuzatilgan. (1.2) tenglamadan nanonaycha diametri d_t qiymati hisoblab topilgan: nurlantirilmagan namuna uchun 1,42 nm (3.3a-rasm), $1,54 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$ da nurlantirilgan namuna uchun 1,43 nm (3.3b-rasm).

RBM rejimi orqali topilgan nanonaycha diametrlariga ko‘ra [9], nanonaychanning xiral indeksleri nurlantirilmagan namuna uchun (18,0) va nurlantirishdan keyingi namuna uchun (15,5) ekanligi aniqlandi. Nanonaychalarning kreslo turi har doim metall ($n = m$), qolgan ikki turi - Zigzag ($n = 0$ yoki $m = 0$) va Xiral ($0 < \theta < 30^\circ$) ularning xiral holatiga qarab metall yoki yarim o‘tkazgich bo‘lishi mumkin [177]. Agar $(n-m)$ 3 ga karrali bo‘lsa, u holda naycha metall, agar $(n-m)$ 3 ga karrali bo‘lmasa, naycha yarimo‘tkazgich bo‘ladi. Ushbu bog‘liqlikdan nurlantirilmagan namuna metall, nurlantirilgan namuna yarimo‘tkazgich deb aytish mumkin [177].

G rejim - grafit tekisligida cho‘zish (stretching) rejimiga mos keladigan uglerod atomlarining tangensial taqsimot rejimi [14] va nanonaychanning yarim o‘tkazgich yoki metall ekanligiga bog‘liq [16]. Raman spektrida nurlantirilmagan namunada G rejim 1582 cm^{-1} ekanligini ko‘rsatdi (3.3a-rasm). $1,54 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$

nurlanish flyuensidan so‘ng G rejim intensivligi 1591 sm^{-1} ga siljigan, intensivligi pasaygan (3.3b-rasm). G rejimning intensivligi assimetriyasi (elektron nurlanishidan oldin va keyin) ushbu spektr G^+ va G^- bog‘lanishlardan iborat ekanligini ko‘rsatadi, bu erda G^+ (uglerod atomlarining ko‘ndalang tebranishlariga mos keladi) zaryadlarning uzatilishi bilan bog‘liq va G^- (uglerod atomlarining bo‘ylama tebranishlariga mos keladi) bir devorli uglerodli nanonaychanning metall yoki yarim o‘tkazgich o‘tkazuvchanligi bilan bog‘liq.

Ushbu ishning muhim natijalaridan biri G rejimining to‘lqinlar sonining elektronlar bilan nurlanishidan so‘ng dastlabki holatdagi 1582 sm^{-1} dan 1591 sm^{-1} gacha o‘zgarishi. Ma’lumki, G rejimining 1582 sm^{-1} qiymati metall o‘tkazuvchanligiga mos keladi [27] va uning 1591 sm^{-1} ga o‘zgarishi o‘tkazuvchanlikning yarimo‘tkazgich xususiyatini ko‘rsatishi mumkin [27].



3.3-rasm. BDUNNning Raman spektri: a) nurlantirilmagan, b) $1.54 \times 10^{17} \text{ e}^-/\text{sm}^2$ elektronlar flyuensi bilan nurlantirilgan [123]

D rejimi bo‘ylama optik fonon bo‘lib, tartibsiz yoki nuqsonli (masalan, geteroatomlar, vakansiyalar, olti burchakli – beshburchak juftliklar, burmalar, aralashmalar mavjudligi va boshqalar) rejim sifatida ma’lum, chunki elastik tarqalishi uchun jarayon tezligini saqlab qolishda nuqson kerak [13]. D rejim intensivliklari 1331 sm^{-1} (3.3a-rasm) va 1337 sm^{-1} (3.3b-rasm) holatlarda

nurlantirilmagan va nurlantirilgan namuna uchun kuzatildi. Elektronlar bilan nurlantirilgandan so'ng D rejimining intensivligi o'zgarishi namunada nuqsonlar paydo bo'lganligidan dalolat beradi (3.3 a, b-rasm).

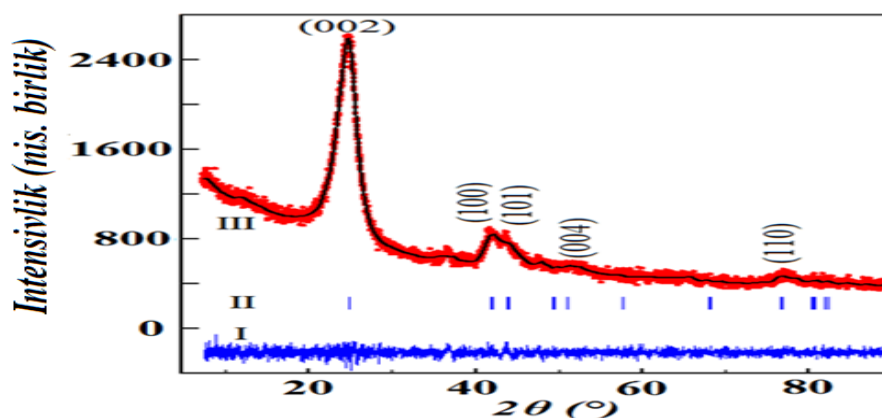
G' rejimining chastotasi D rejimining ikki baravariga yaqin va odatda 2500 dan 2900 sm^{-1} gacha oraliqda kuzatiladi va 2D kabi ham belgilanadi. Bu LO (longitudinal optical) fononlarining ikkita zonasidagi ikkinchi tartibli jarayon (bo'ylama va ko'ndalang rejimlar uchun optik fononlar ko'pincha LO va TO fononlari sifatida qisqartiriladi). G' rejimi nanonaycha va grafitning o'ziga xos xususiyati bo'lib, D rejimi umuman bo'lmagan nuqsonsiz nanonaychalarda ham mavjud [177]. G' rejimining intensivliklari nurlantirilgan va nurlantirilmagan namunalar uchun mos ravishda 2653 sm^{-1} va 2665 sm^{-1} da paydo bo'ladi.

Elektronlar bilan nurlantirish I_D/I_G integral intensivliklar nisbatini 0,04 dan 0,26 gacha oshirdi. Intensivlik koeffitsienti to'g'ridan-to'g'ri UNN strukturasi ko'rsatuvchi o'lchovi bo'lib xizmat qiladi, bundan, bir devorli nanonaychaning strukturasi sifati hosil bo'lgan nuqsonlar hisobiga yomonlashganini aytish mumkin.

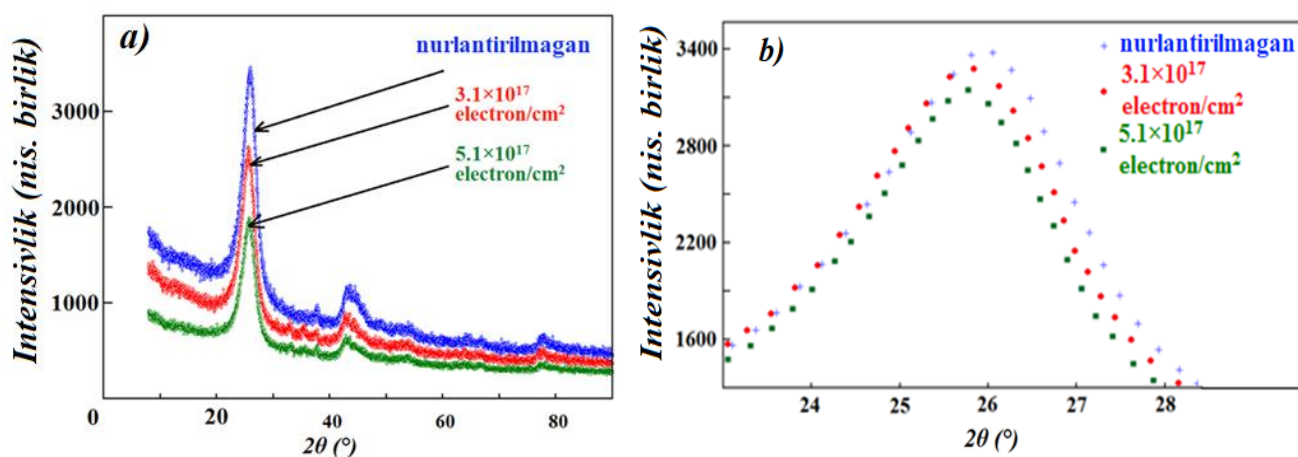
3.1.3. KDUNN ning rentgenostrukturaviy natijalari va tahlillari

Dastlabki KDUNN rentgenogrammasi Fullprof dasturida quyidagi fazalarning hosil bo'lish imkoniyatini nazarda tutgan holda qayta ishlandi: kub (faz.gr. $Fd\bar{3}m$), olti burchakli (faz.gr. $P6_3/mmc$, $P6/mmm$), trigonal (faz.gr. $R\bar{3}m$), rombsimon (faz.gr. $Smma$, $Smmm$, $Pcca$, $Pban$). Hisob-kitoblar shuni ko'rsatdiki, dastlabki KDUNN, BDUNN dan farqli o'laroq, bir fazali bo'lib olti burchakli tuzilishga ega (faz.gr. $P6_3/mc$), elementar panjara parametrlari: $a=b=2,4398 \text{ \AA}$ va $c=6,6637 \text{ \AA}$ (3.3-jadval). Shuni ta'kidlash kerakki, olingan parametrlar Crystallographic Open Database (COD) ma'lumotlaridan farq qiladi, bu erda KDUNN lar uchun $a=b=2,461 \text{ \AA}$ va $c=6,708 \text{ \AA}$. 3-rasmda KDUNN rentgenogrammasi va Miller indeksleri ko'rsatilgan.

Turli elektronlar flyuensi bilan nurlantirishdan keyingi barcha eksperimental rentgen difraktogrammalari 3.5. a-rasmda keltirilgan.



3.4-rasm. Nurlantirilmagan KDUNN difraktogrammasi. I –experimentda kuzatilgan (—) va hisoblangan (—) ma’lumotlar, II –Bregg reflekslari, III – kuzatilgan va hisoblangan ma’lumotlar o‘rtasidagi farq [178]



3.5-rasm. KDUNN namunalarining nurlantirilmagan va nurlantirilgan rentgenogrammalari: a) 8° dan 90° gacha bo‘lgan intervalgacha va b) 23° dan 29° gacha [178]

Jadval 3.3

Nurlantirilmagan va elektronlar bilan nurlantirilgan KDUNN namunasining elementar panjara parametrlari [178]

Flyuens, el/sm ²	<i>a, b</i> , Å	<i>c</i> , Å	R _B Bregg faktori	R _f struktura faktori
0	2,4398±0,0001	6,6637±0,0002	1,03	1,11
2,3×10 ¹⁷	2,5042±0,0001	6,7672±0,0002	1,54	1,31
3,1×10 ¹⁷	2,5327±0,0002	6,9048±0,0003	1,79	1,86
4,0×10 ¹⁷	2,5417±0,0001	6,9705±0,0002	1,12	1,97
5,1×10 ¹⁷	2,5504±0,0003	6,9800±0,0001	2,54	2,56

Experimentda namunalarning (002) reflekslari intensivligining pasayishi va elektron flyuensining oshishi bilan kichik burchaklarga siljish mavjudligini ko'rsatdi (3.5. b-rasm), bu esa panjara parametrlarining oshishi bilan bog'liq (3.3-jadval).

Grafitlanish darajasining ko'rsatkichi bo'lgan d_{002} qatlamlar oralig'i barcha namunalar uchun (2.1) Bregg tenglamasidan foydalanib hisoblab chiqilgan (3.4-jadval).

Jadval 3.4

Turli elektronlar fluensida nurlantirilgan KDUNN namunasi rentgen difraktogrammalari tahlili natijalari [178]

Flyuens, el/sm ²	2θ [002], (°)	d ₀₀₂ , nm
0	26,0166	0,3424
2,3×10 ¹⁷	25,8977	0,3440
3,1×10 ¹⁷	25,7947	0,3454
4,0×10 ¹⁷	25,6917	0,3468
5,1×10 ¹⁷	25,6429	0,3474

d_{002} qatlamlar oralig'i 0,3424 nm (nurlanmagan namuna uchun) dan 5,1×10¹⁷ el/sm² flyuensda nurlantirilgan namuna uchun 0,3474 nm gacha o'sib boradi. [120] mualliflar natijalariga ko'ra 5×10¹⁵ el/sm² flyuensda 70 keV energiyali elektronlar bilan nurlantirilgan KDUNNlarning qatlamlararo d_{002} oralig'i oshirib borgan va elektronlar energiyasi 110 keV bo'lganda esa aksincha d_{002} qatlamlararo oralig'i asta-sekin kamaygan. [120] mualliflari KDUNNning qatlamlararo masofasining oshishini yoritib, KDUNN strukturasi 70 keV elektron nurlanishida qisman buzilganligini ta'kidlaganlar.

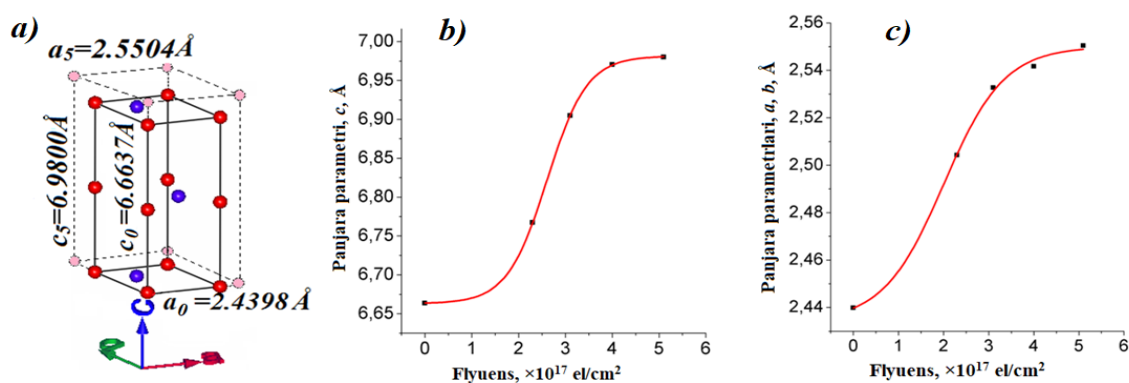
KDUNNning panjara parametrlari $a=b$ va c ning x flyuensga bog'liqligi 3.6.b va 3.6.c-rasmlarda ko'rsatilgan.

Ushbu bog'liqlik quyidagi (3.1) funksiya $f(x)$ bilan ifodlanadi:

$$f(x) = \frac{A1-A2}{1+e^{-(x-x_0)/d_x}} + A2 \quad (3.1)$$

bu yerda, $f(x)$ panjara parametrlari, A1 boshlang'ich kristall panjarasi parametri, A2 oxirgi kristall 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. Ushbu bog'liqlik funksiyasining qiymatlari 3.5-jadvalda keltirilgan.

Nurlanish jarayonining boshida panjara parametrlari keskin oshadi va panjara kattalashadi. $x=4\div 5 \times 10^{17}$ el/sm² flyuens oralig'ida panjara parametrlari sekin o'zgaradi, bu to'yinganlikni anglatadi. Elektronlar flyuensi oshishi bilan, panjara o'lchamlari o'zgarmaydi.



3.6 - rasm. a) nanonaycha namunalarining geksagonal panjara o'lchamlari o'zgarishi (a_0, c_0 – nurlantirilmagan, a_s, c_s – 5.1×10^{17} el/sm² flyuens bilan nurlantirilgan nanonaycha kristalli elementar panjarasi parametrlari), b) KDUNNning a va b elementar panjara parametrlarining elektronlar flyuensiga bog'liqligi: qora nuqtalar eksperimentdan olingan natijalar (3.1. formula), c) KDUNNning c elementar panjara parametrsining elektronlar flyuensiga bog'liqligi: qora nuqtalar eksperimentdan olingan natijalar (3.1. formula) [178]

3.5-jadval

Bog'liqlik funksiyasining qiymatlari [178]

Elementar panjara Parametrlari	A1,nm	A2,nm	x_0 , el/sm ²	d_x , el/sm ²
a,b	2,43(0,01)	2,55(0,01)	2,01(0,17)	0,67(0,19)
C	6,66(0,01)	6,98(0,01)	2,61(0,01)	0,43(0,01)

Nurlantirilgandan so‘ng KDUNN namunasida C=C bog‘lar orasidagi masofa ortdi (3.6-jadval).

3.6-jadval

KDUNN larning C-C bog‘lari orasidagi masofasi.

Fluence, el/sm ²	a_{C1-C2} , Å	a_{C1-C3} , Å	a_{C1-C4} , Å
0	1,409±0,001	2,439±0,001	2,817±0,001
$2,3 \times 10^{17}$	1,446±0,001	2,504±0,001	2,891±0,001
$3,1 \times 10^{17}$	1,462±0,001	2,532±0,001	2,924±0,001
$4,0 \times 10^{17}$	1,467±0,001	2,541±0,001	2,935±0,001
$5,1 \times 10^{17}$	1,472±0,001	2,550±0,001	2,945±0,001

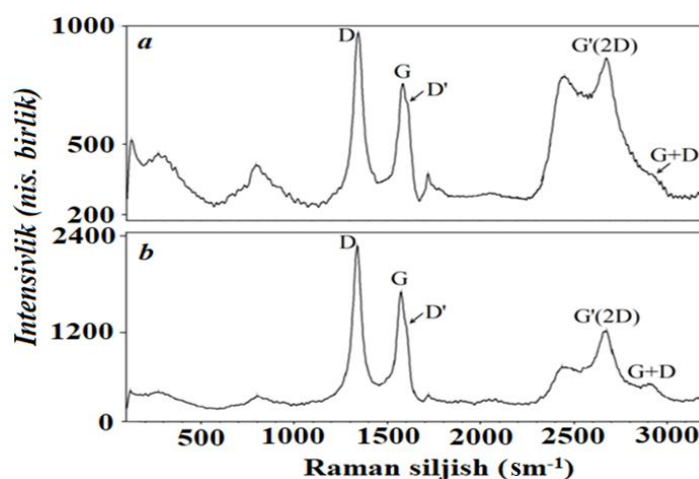
3.1.4. KDUNNning Raman spektroskopiyasi natijalari va tahlillari

Nurlantirilmagan va elektronlar bilan nurlantirilgan namunaning Raman spektrlari 3.7. a, b-rasmlarda keltirilgan [178]. KDUNNlarda RBM rejimi ularning ichki naychalaridan kelib chiqadi, chunki faqat ichki naycha BDUNN bilan o‘xshash holatdadir va ichki naychani diametri (1.7) ifoda orqali aniqlanadi [10, 23]. Nurlantirilmagan namuna uchun RBM tepaligi 124 sm⁻¹ chastotada kuzatilgan (3.7. a-rasm) va KDUNNning ichki diametri 2,05 nm, $5,1 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensda nurlatishdan so‘ng RBM tepaligi 120 sm⁻¹ chastotada kuzatildi (3.7. b-rasm) va ichki diametri 2,13 nm bo‘ldi. Elektronlar bilan nurlantirilgandan so‘ng KDUNN ning ichki diametri oshdi.

Nurlantirilmagan KDUNNning D rejimi 1347 sm⁻¹ chastotada aniqlangan (3.7. a-rasm). $5,1 \times 10^{17}$ el/sm² flyuens bilan nurlantirilgan namuna uchun D rejim 1340 sm⁻¹ da aniqlandi (3.7. b-rasm). Nurlangan namunaning D rejim intensivligi nurlanmagan namuna D rejimidagi intensivlikdan yuqori. Ushbu D rejim UNNdagi tartibsizlikka bog‘liq [179] ekanligi yuqorida ta’kidlab o‘tildi. Bu nanoo‘lchamli grafit tekisliklaridagi nuqsonlar va yoki boshqa uglerod shakllari bilan bog‘liq [180]. Ushbu nuqsonlar haqida BDUNNning D rejimini tavsiflashda keltirib o‘tdik. Odatda sp² uglerod namunalari g‘ovaklar, aralashmalar va boshqa simmetriyani buzuvchi nuqsonlarni o‘z ichiga olgan [121]. Shularni inobatga olgan holda, $5,1 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensda nurlatishdan so‘ng buzilishlar kuchayayotganini

aytish mumkin. Nurlantirilmagan KDUNNda kuzatilgan yana bir taniqli G rejim intensivligi 1590 cm^{-1} chastotada paydo bo‘ldi (3.7. a-rasm), bu tartiblangan kristalli grafit va sp^2 gibridlangan uglerodning tekislikdagi tebranishlarining E_{2g} tangensial cho‘zish (stretching) rejimini ifodalaydi [181]. Nurlantirilgan namunada ($5,1 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$) kuzatilgan G rejimining tepaligi 1579 cm^{-1} chastotada paydo bo‘ldi (3.7. b-rasm).

Nurlantirilmagan namunada 1612 cm^{-1} da namoyon bo‘lgan G rejim yelkasidagi D’ rejim (3.7. a-rasm) amorf gidrogenlangan uglerodan (a: H-C) [6] chiqadi va nuqsonli grafit strukturasi bir turi sifatida qaraladi [182, 183]. G rejim intensivligi nafaqat nurlantirilmagan namunada, balki nurlantirilgan namunada ham D’ tepalikka nisbatan yuqori, D’ tepaligi 1601 cm^{-1} chastotada aniqlangan (3.7. b-rasm).



3.7 -rasm. KDUNNning Raman spektri: a) nurlantirilmagan namuna, b)

$5.1 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$ flyuens bilan nurlantirilgan [178]

Pastroq chastotali G rejim UNN atrofi bo‘ylab tebranishlar bilan bog‘liq bo‘lsa, nanonaychaning diametriga bog‘liq bo‘lgan yuqoriroq chastotali D’ rejim nanonaychaning o‘qi bo‘ylab tebranishlar bilan bog‘liq [23]. G - D’ bo‘linishi (shuningdek G^+ - G^- ham deyiladi) kichik diametrli BDUNNlar uchun katta, ammo KDUNNda mos keladigan bo‘linish deyarli sezilmaydi, chunki individual KDUNN ichida diametr taqsimoti mavjud [23].

2D rejim, ba’zi adabiyotlarda [179] D rejimning mohiyatiga tegishli bo‘lgan G’ rejim deb ham ataladi va u bizning ishda nurlantirilmagan namuna uchun 2686

sm^{-1} chastotada paydo bo'ldi (3.7. *a*-rasm). 2D rejimi D kabi buzilishlarni ifodalovchi tepalik emas; ushbu rejim KDUNN kukunidan olingan. Xususan, D rejimi har qanday tizim buzilishining paydo bo'lishini aniqlash uchun eng yaxshisidir, 2D rejimi esa namuna qo'shimchasi tufayli yuzaga kelgan panjara buzilishi o'rganish va miqdorini aniqlash uchun eng yaxshisidir [16]. Namuna $5,1 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$ flyuensda nurlantirilgandan so'ng 2D rejim 2681 sm^{-1} chastotada paydo bo'ldi va intensivligi oshdi (3.7. *b*-rasm).

Raman spektridagi D rejimi integral intensivligining G rejimi integral intensivligiga nisbati (I_D/I_G) tizimning amorflanish darajasini baholashda keng qo'llaniladi [98]. Nurlanish tufayli yuzaga keladigan modifikatsiyani yanada o'rganish uchun buzilish parametrining o'zgarishini elektronlar oqimi funksiyasi sifatida chizamiz. Nurlantirilmagan va nurlantirilgan namunalarning I_D/I_G nisbati egri chiziqlar maydoni bo'yicha hisoblab chiqilgan va yon devoridagi nuqsonlar sonining ko'payishi bilan I_D/I_G ortadi. I_D/I_G nisbati 1,45 dan 1,50 gacha o'sganligi KDUNNni elektronlar bilan nurlatirilganda nuqsonlarning ko'payishini ko'rsatmoqda.

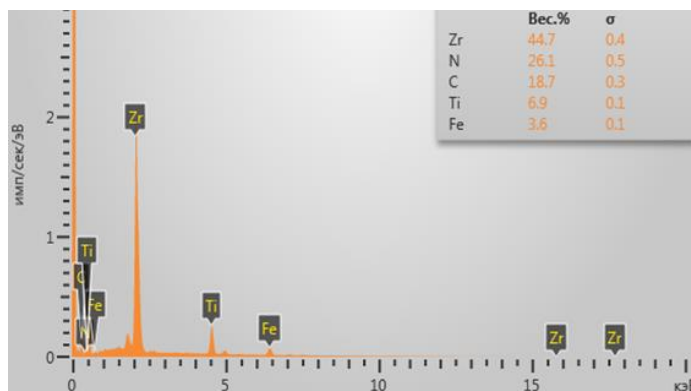
3.2-§. Yuqori energiyali elektronlar dastasining (ZrTi)CN, (TiHfTa)CN nanoqoplamalar morfologiyasi va strukturasi ta'siri

3.2.1. (ZrTi)CN nanokompozitining SEM hamda AKM dagi morfologik natijalari va tahlillari

Ushbu bo'limda elektron nurlari ta'siri ostidagi nanokompozitlarning morfologik va strukturaviy tahlili natijalari keltirilgan. Ushbu ishlar [184, 185, 187] maqolalarda nashr etilgan.

Energiya ajratuvchi spektroskopiya (EDS) uslubi yordamida nanokompozit elementlarini yuz bo'ylab qanday taqsimlanganligini aniqlash maqsadida (ZrTi)CN namuna yuzasida 35 dan ortiq maydonchalarda o'lchashlar amalga oshirildi. EDS natijalariga ko'ra qoplama quyidagi tarkibdan 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) va

nanokompozitlar asosda bir tekis taqsimlanganligi aniqlandi [180]. Bu erda Fe asos materiali (3.8-rasm).

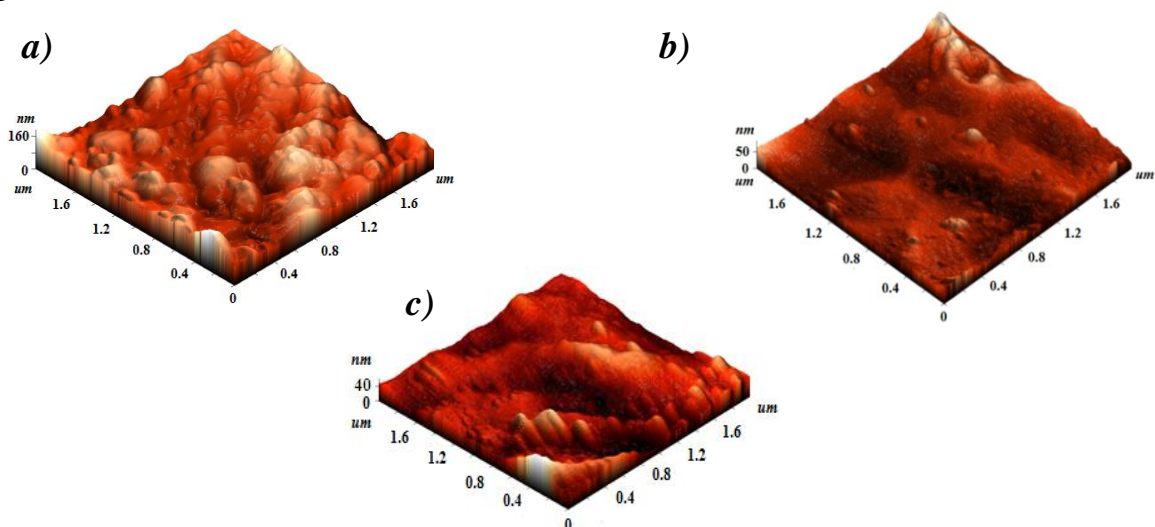


3.8-rasm. (ZrTi)CNning EDS tahlili

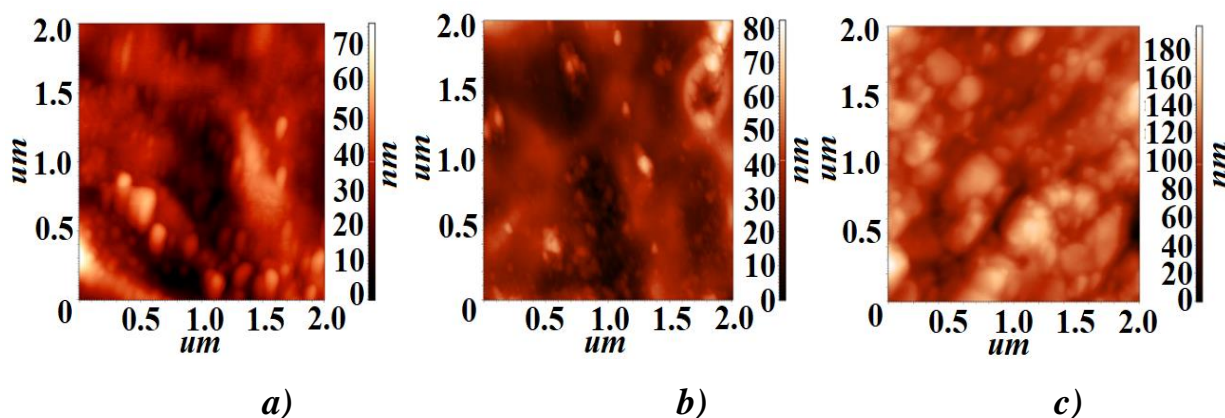
(ZrTi)CN qoplamali nanokompozitining nurlantirilishdan oldingi va keyingi yuza topografiyasi AKM yordamida 2D va 3D $2 \times 2 \mu\text{m}$ o'lchamda kuzatildi (3.9 a, b, c -rasm).

3.10-rasmda yuzaning 2D o'lchamli tasviri keltirilgan, bunda elektronlar flyuensi bilan nurlantirilgandan so'ng namunaning yuza notekisligi yaxshilanganligini ko'rish mumkin.

Yuza notekisligining o'rtacha qiymat kattaligi (R_a) ushbu 2D formatdan foydalanib topildi va dastlabki nurlantirishdan oldingi holat uchun $R_a = 26,80 \text{ nm}$ (3.10 a-rasm), $0,2 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$ va $2,3 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$ flyuenslar bilan nurlantirishdan so'ng mos holda $R_a = 13,83 \text{ nm}$ (3.10 b-rasm) va $12,22 \text{ nm}$ (3.10 c-rasm).



3.9-rasm. (ZrTi)CNning AKMda olingan 3D yuza topografiyasi: a) dastlabki; nurlantirilishdan so'ng – b) $0,2 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$, c) $2,3 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$ [184]



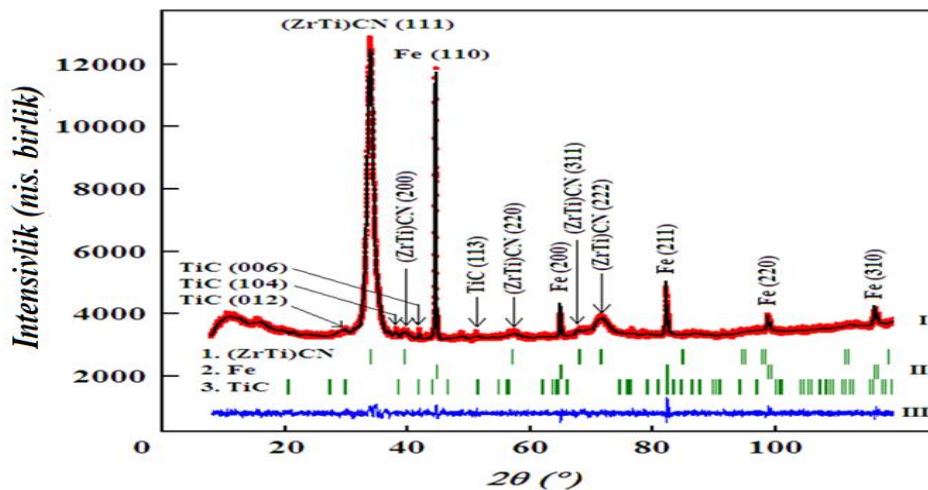
3.10 -rasm. (ZrTi)CN nanokompozitining nurlantirishdan avvalgi va keyingi 2D yuza topografiyasi: a) dastlabki, b) 0.2×10^{17} el/sm² va c) 2.3×10^{17} el/sm² flyuensi bilan nurlantirilgandan so‘ng [184]

3.2.2. (ZrTi)CN nanokompozitining rentgenostrukturaviy natijalari va tahlillari

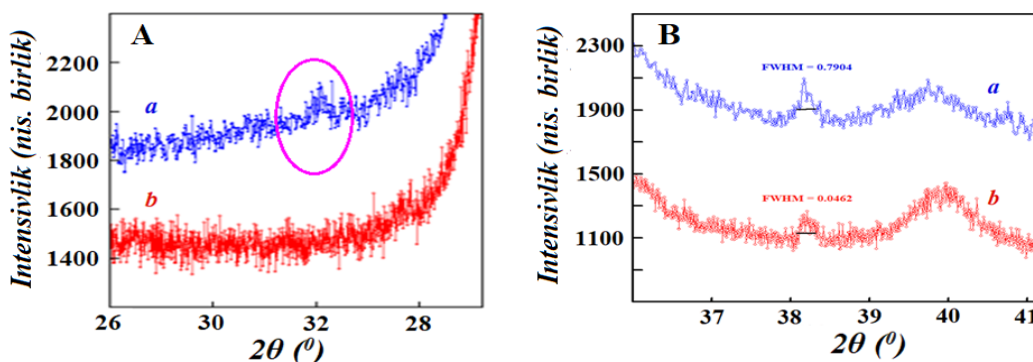
Kompleks karbid va nitrid tizimlarining fazaviy diagrammasini o‘rganish [46] shuni ko‘rsatdiki (ZrTi)CN tizimi asosan sirkoniy va titanning ikkilik birikmalarida mavjud bo‘lgan fazalarni hosil qiladi. Shu munosabat bilan hisob-kitoblar quyidagi fazalar mavjudligini hisobga olgan holda amalga oshirildi: kub (fazoviy guruhlar $Fm\bar{3}m$; $F\bar{4}3m$; $Fd\bar{3}m$; $Im\bar{3}m$; $P1$), trigonal (fazoviy guruhlar $P3_1$; $R\bar{3}m$), monoklinik (fazoviy guruh $C2/m$), α -Ti, Zr.

3.11-rasmda (ZrTi)CN nanokompoziti bilan qoplangan namunaning rentgen difraksiyasi keltirilgan. Rentgen difraktogrammalar natijalari Rietveld usuli yordamida sharxlanib [186], Miller indeksleri, panjara parametrlari va fazoviy guruhlar topilgan. Shunga ko‘ra, 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 qayt etildi. Rentgenogrammada boshqa reflekslar ham mavjud bo‘lib, ularning tahlili temirga (faz.gr. $Im\bar{3}m$), ya’ni namuna asosining reflekslariga to‘g‘ri kelishini ko‘rsatdi. Difraktogramma tahlili natijalari 3.7-jadvalda keltirilgan. $4,1 \times 10^{17}$ el/sm² elektronlar flyuensi bilan nurlantirilganda, (ZrTi)CN

rentgenogrammasida titan karbidining trigonal tuzilishiga mos keladigan $2\Theta_B = 20,49390$ va $29,83600$ reflekslardan tashqari barcha reflekslarlar mavjud edi (3.12.A-rasm).



3.11 -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 [184]



3.12-rasm. (ZrTi)CNning 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 [184]

Namunaning rentgen difraktogrammasining hisob-kitoblari shuni ko’rsatdiki, reflekslar panjara parametri $a = 4,3019 \text{ \AA}$ 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 3.12. B-rasmda

ko‘rish mumkin va bu trigonal tuzilishdan kubik tuzilishga tizimli o‘tishning yana bir dalilidir.

3.7-jadval

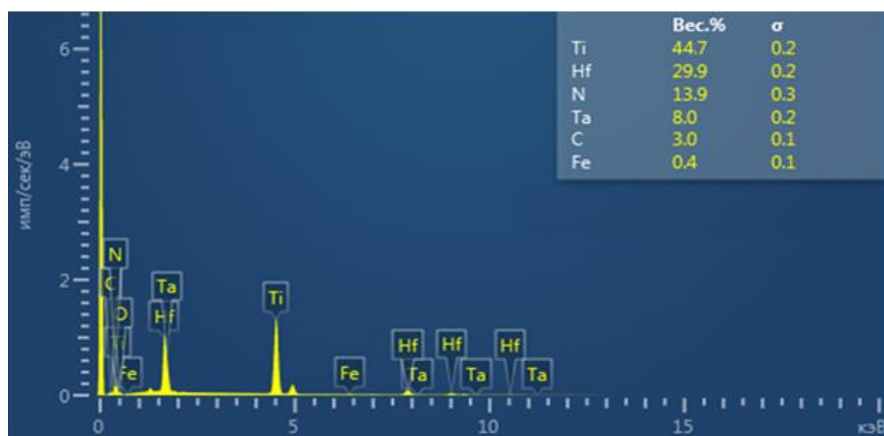
(ZrTi)CN nanoqoplamasining dastlabki va turli elektron flyuenslari bilan nurlantirilgandan keyingi elementar panjara parametrlari [184]

Fluyens, el/sm ²	Elementar panjara parametrlari, <i>a,b,c</i> , Å		R _B Bregg faktori	R _f struktura faktori
	(ZrTi)(CN) faz. gr. (Fm $\bar{3}$ m)	TiC faz. gr. (R $\bar{3}$ m)		
0	4,5687±0,0002	<i>a</i> = <i>b</i> =3,9047±0,0002; <i>c</i> =12,9899±0,0004	2,75	1,85
0,2×10¹⁷	4,5697±0,0003	<i>a</i> = <i>b</i> =3,8957±0,0003; <i>c</i> =12,9899±0,0005	1,09	2,86
2,3×10¹⁷	4,5741±0,0003	<i>a</i> = <i>b</i> =3,8716±0,0001; <i>c</i> =12,9798±0,0004	2,06	1,47
3,1×10¹⁷	4,5762±0,0002	<i>a</i> = <i>b</i> =3,9752±0,0002; <i>c</i> =12,9247±0,0003	1,15	2,45

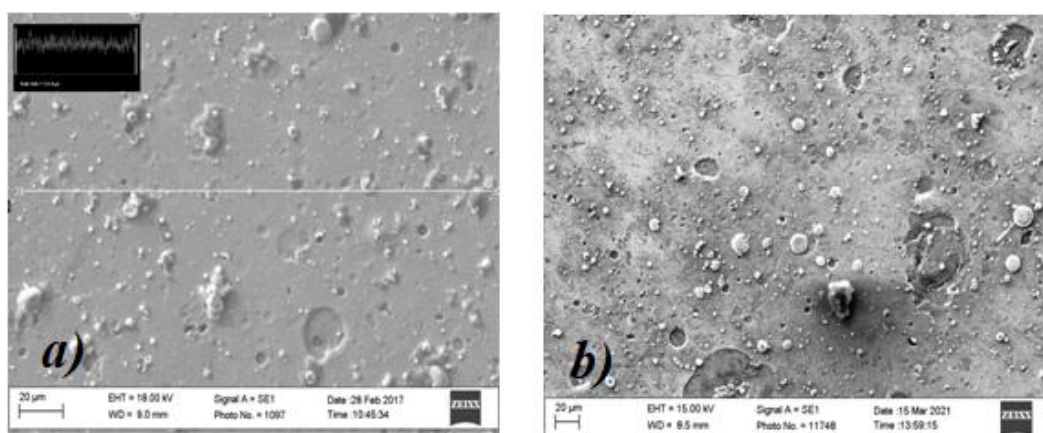
3.2.3. (TiHfTa)CN nanokompozitining SEM hamda AKM da morfologik natijalari va tahlillari

SEM natijalariga ko‘ra nanokompozitlar elementlari namuna yuzasida bir tekis taqsimlanganligi aniqlandi, qoplama quyidagi tarkibdan iborat: 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) %. Bu erda Fe asos materialidir. Nanokompozitlar namuna yuzasida bir tekis taqsimlanganligini aniqlan maqsadida 35 dan ortiq nuqtalar skanerlandi.

SEM yordamida yuza topografiyasi ham o‘rganilib, 3.16.-rasmda nanuma yuzasida nurlanishdan keyin dislokatsiya natijasida 2 o‘lchamli o‘zaklanish shakillanganligini ko‘rish mumkin [74].



3.15-rasm. (TiHfTa)CNning EDS tahlili [185]

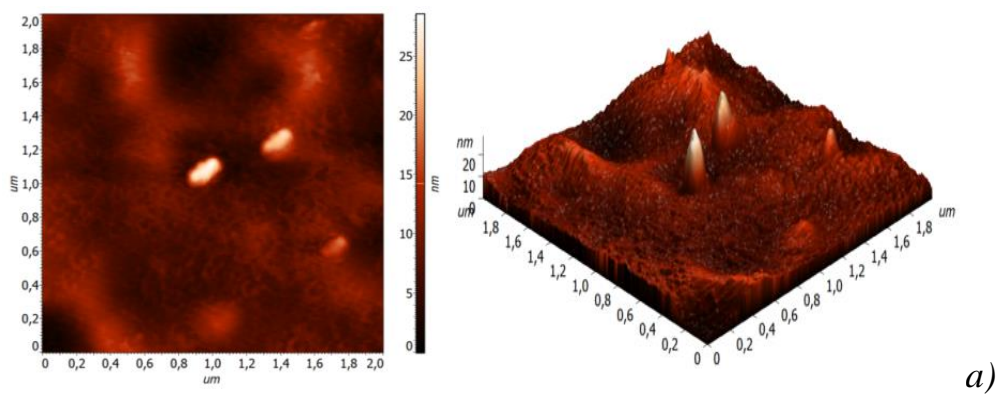


3.16-rasm. SEM yordamida olingan (TiHfTa)CN sirt topografiyasi: a) nurlantirilmagan; b) $1,5 \times 10^{17}$ el/sm² elektronlar flyuensida [187]

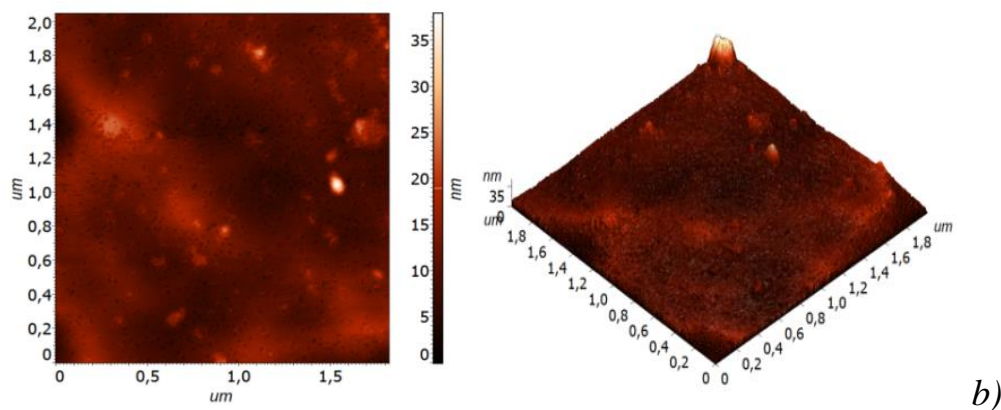
AKM nanokompozitlarning sirt topografiyasini tavsiflashda sifatli 2D va 3D tasvirlarni olish uchun ishlatilgan (3.17-rasm).

Yuza notekisligining oʻrtacha qiymat kattaligi (R_a) 2D oʻlchamdan foydalanib topildi va nurlantirishdan oldingi holat uchun $R_a = 2,67$ nm (3.17. a-rasm), $0,2 \times 10^{17}$ el/sm², $1,5 \times 10^{17}$ el/sm² va $4,5 \times 10^{17}$ el/sm² flyuens bilan nurlantishdan soʻng mos holda $R_a = 2,91$ nm (3.17. b-rasm), 25,2 nm (3.17. c-rasm) va 35,2 nm (3.17. d-rasm) boʻldi.

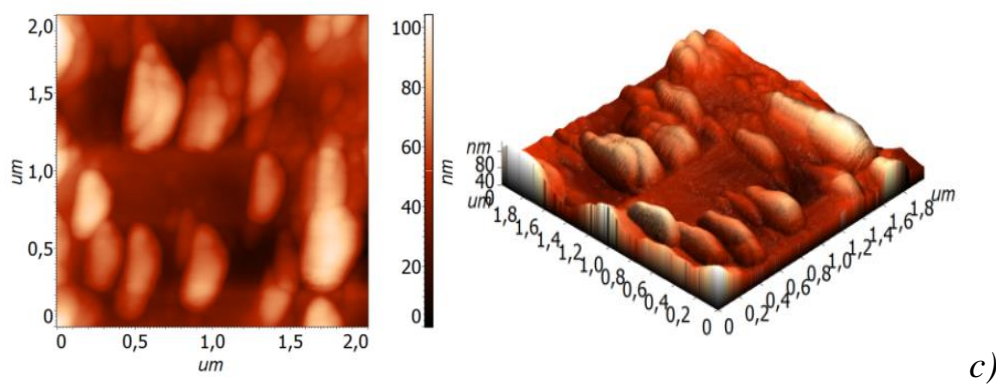
Nurlantirishdan soʻng (TiHfTa)CN nanokompozitining yuza notekisligi 13,2 marta oshdi, bu, ehtimol, dislokatsiyaning sirtga qarab harakatlanishi bilan bogʻliq [74].



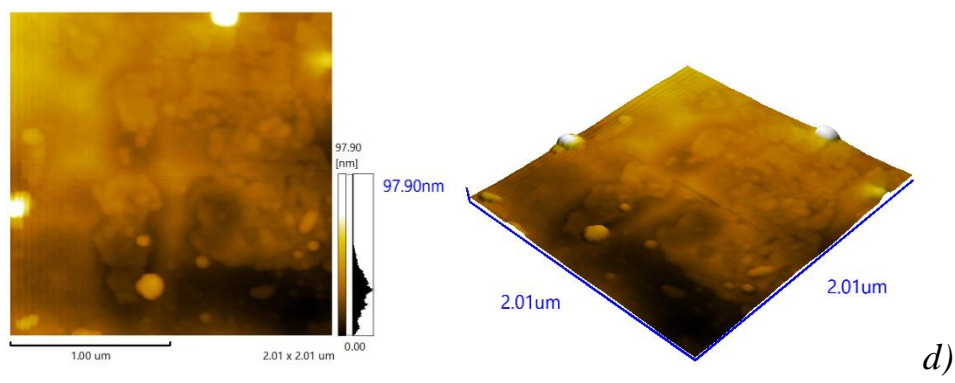
a)



b)



c)

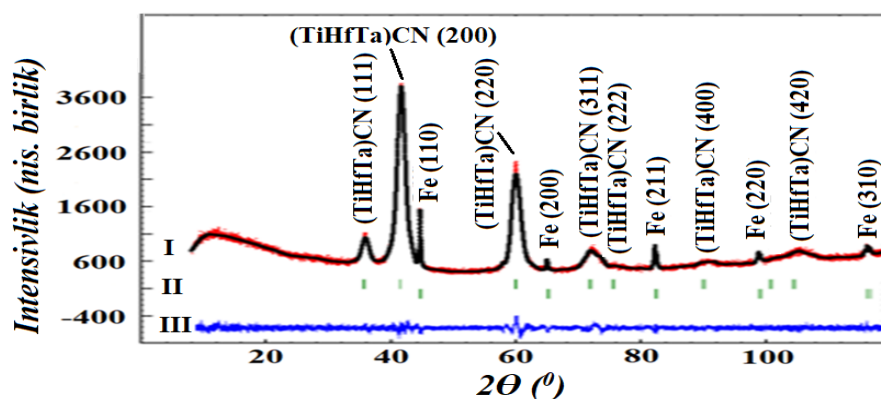


d)

3.17. -rasm. (TiHfTa)CNning AKMda olingan 3D va 2D yuza topografiyasi: a) dastlabki; nurlantirilishdan so‘ng – b) $0,2 \times 10^{17}$ el/sm², c) $1,5 \times 10^{17}$ el/sm², d) $4,5 \times 10^{17}$ el/sm² [185]

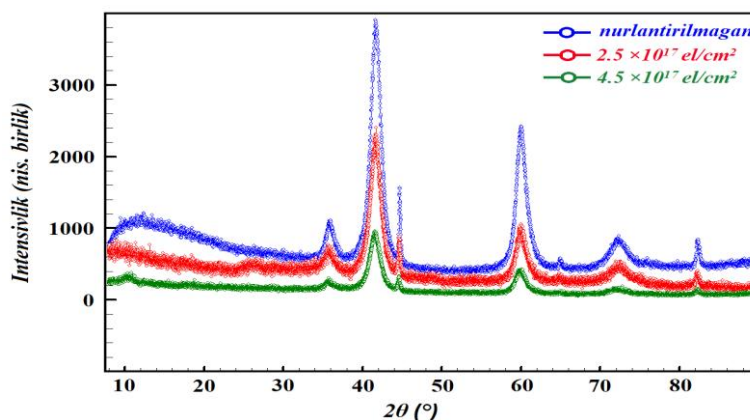
3.2.4. (TiHfTa)CN nanokompozitining rentgenostrukturaviy natijalari va tahlillari

(TiHfTa)CN nanokompozitining rentgen difraktogrammalaridan foydalanib, Rietveld usuli yordamida Miller indeksleri, panjara parametrlari va fazaviy guruhlar aniqlandi. (TiHfTa)CNning rentgenogrammasida yoqlari markazlashgan kub (faz.gr. $Fm\bar{3}m$) va hajmi markazlashgan kub (faz.gr. $Im\bar{3}m$) fazalar aniqlangan (3.18.-rasm).

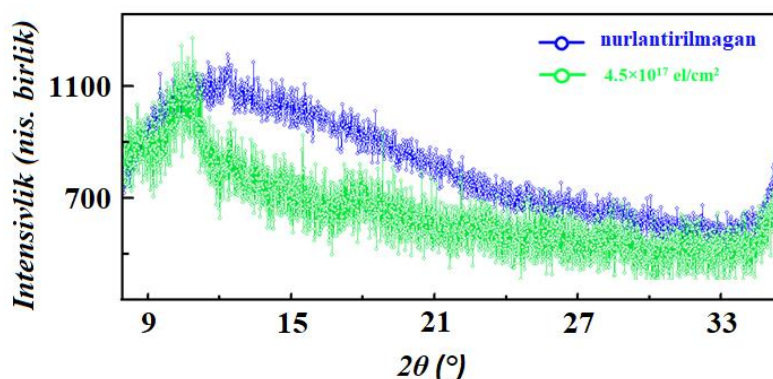


3.18-rasm. Nurlantirilmagan (TiHfTa)CN rentgen difraktogrammasi. I – experimentda kuzatilgan (—) va hisoblangan (—) ma’lumotlar, II –Bregg reflekslari, III –kuzatilgan va hisoblangan ma’lumotlar o‘rtasidagi farq [185]

3.19-rasmda turli flyuenslarda nurlantirilgan namuna rentgenogrammalari keltirilgan bo‘lib, elektronlar flyuensining oshishi bilan amorf fazaning tarkibi kamayadi va $4,5 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensda kristallanish tufayli yangi refleks paydo bo‘ladi (3.20-rasm).



3.19-rasm. (TiHfTa)CNning turli elektronlar flyuensidagi rentgen difraktogrammalari [187]



3.20-rasm. (TiHfTa)CNning nurlantirilmagan va $4,5 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensda nurlantirilgandagi $2\theta_B=8-35^\circ$ oraliqdagi rentgenogrammalari [187]

3.9-jadvalda nurlantirilmagan va nurlantirilgan namuna uchun aniqlangan elementar panjara parametrlari natijalari keltirilgan.

3.9-jadval

(TiHfTa)CN nanoqoplamasining nurlantirilishdan avvalgi va keyingi elementar panjara parametrlari [185, 187]

Flyuens, el/sm ²	<i>a, b, c</i>	R _B Bregg faktori	R _f struktura faktori
0	4,3649±0,0003	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±0,0002	2,24	1,55
$3,5 \times 10^{17}$	4,4199±0,0002	2,17	1,22
$4,5 \times 10^{17}$	4,3628±0,0003	2,75	1,08

Ko‘rish mumkinki, nanokompozitning panjara parametrlari flyuensning oshishi bilan ortadi, $4,5 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensda esa 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 (3.10-jadval).

(TiHfTa)CN nanoqoplamasining nurlantirilishdan avvalgi va keyingi bog'lar orasidagi masofa [187].

Flyuens, el/sm ²	0	0,2 ×10 ¹⁷	1,5 ×10 ¹⁷	2,5 ×10 ¹⁷	3,5 ×10 ¹⁷	4,5 ×10 ¹⁷
Bog'lar orasidagi masofa (Å)						
(Ti1)-(Ti1)	3,0864	3,0865	3,0873	3,1039	3,1231	3,0840
(Ti1)-(Hf1)	3,0864	3,0865	3,0873	3,1039	3,1231	3,0840
(Ti1)-(Ta1)	3,0864	3,0865	3,0873	3,1039	3,1231	3,0840
(Ti1)-(C1)	2,1825	2,1825	2,1830	2,1948	2,2084	2,1807
(Ti1)-(N1)	2,1825	2,1825	2,1830	2,1948	2,2084	2,1807

3.3. Uglerodli nanonaychalar va nanoqoplamalar nanokristallitlari va dislokatsiya zichliklari

3.3.1. BDUNN va KDUNN nanokristallitlari va dislokatsiya zichliklari

BDUNN larning nanokristallit o'lchamlari elektronlar flyuensi $1,54 \times 10^{17}$ el/sm² gacha oshirib borilishi bilan kattalashishi kuzatildi [24] va ushbu hisob-kitoblar Stoks tenglamasi orqali, Uilyamson-Xall diagrammsini chizish usullari [84] dan foydalanib aniqlandi (1.20).

Buning uchun 1 - fazadan (200), (102), (103) va (222), 2 - fazadan (002) va (200) reflekslarning integral maksimal intensivligi yarmining to'liq kengliklaridan foydalanildi. Olingan natijalarga ko'ra, BDUNN nanokristallitlari o'lchami ~1 nm atrofida kattalashdi (3.11-jadval).

Mikrozo'riqishlar va dislokatsiya zichligini aniqlash uchun rentgen diffraksiyasi tahlili qo'llanildi (3.11-jadval).

Namunadagi dislokatsiya zichligi (δ) (3.2) formuladan foydalanib aniqlandi [188, 189]. Dislokatsiya zichligi ma'lumki, kristall qattiq moddalardagi nuqsonlar o'lchovidir [190] va u nanokristallit o'lchami D ga teskari proporsionaldir:

$$\delta = \frac{15\beta \cos\theta}{4aD} \quad (3.2)$$

BDUNNlarda nurlanish natijasida mikrozo‘riqish va dislokatsiya zichligi kamayishi kuzatildi.

KDUNNlarda nanokristallit kattaligi mos ravishda $2,3 \times 10^{17}$ el/sm², $3,2 \times 10^{17}$ el/sm², $4,0 \times 10^{17}$ el/sm² va $5,1 \times 10^{17}$ el/sm² elektronlar flyuensi oshishi bilan kattalashdi va bu Sherrer tenglamasi (1.15) yordamida aniqlandi (3.11-jadval). Bunda Stoks tengligidan emas Sherrer tenglamasi orqali aniqlanishi sababi faqat bitta (002) refleks maksimal intensivligi yarmining to‘liq kengligini aniqlash imkonidan kelib chiqadi. Shu bilan bir qatorda, k shakl faktorini har bir nanonaycha zarrachasini havoda harakatlanadigan sferoid deb hisoblash orqali baholash mumkin [96]. Bunday holda, k zarrachaning tomonlari nisbati β (L/W, L - uzunlik va W - kenglik yoki diametr) ning funksiyasidir va u 2,71 ga teng [96].

Faqat birgina (002) refleks intensivligi mavjudligi uchun panjara mikrozo‘riqishini aniqlash imkoni bo‘lmadi.

3.2-formula yordamida dislokatsiyalar zichligi aniqlanib, KDUNNlarda ushbu qiymat $5,1 \times 10^{17}$ el/sm² elektronlar flyuensigacha nurlantirib borilganda biroz kamayishi kuzatildi.

3.11-jadval

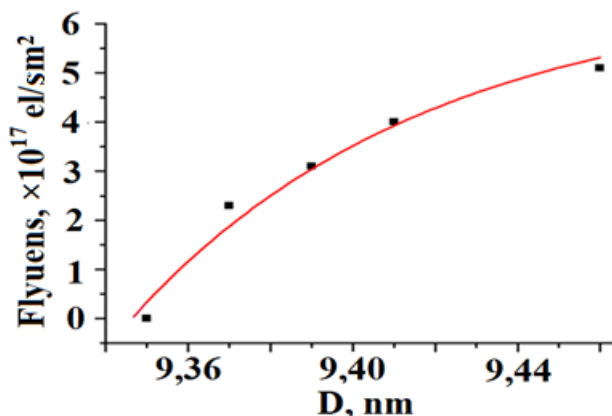
BDUNN va KDUNN ning nanokristallitlar o‘lchami va dislokatsiya zichliklari [123, 178].

Flyuens, el/sm ² , $\times 10^{17}$	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
$\sigma \times 10^{12}$, 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 , $\times 10^{-3}$	8,42± 0,02	8,11± 0,02	7,62± 0,01	-	-	-	-	-

Olingan natijalar yordamida KDUNN nanokristallit o‘lchamining elektronlar flyuensiga quyidagi eksponensial funksiya asosida bog‘liqligi aniqlandi [178]:

$$\Phi = \Phi_0 - \rho e^{-D/t} \quad (3.3)$$

bu yerda, Φ elektronlar flyuensi, Φ_0 qiymati $6,70(0,18)\times 10^{17}$ el/sm² ga teng, ρ va t eksperimental nuqtalarga o‘rnatilgan model parametrlari: $\rho=909,10(11,30)\times 10^{17}$ el/sm², $t=1,91(0,44)$ nm.



3.21-rasm. KDUNN nanokristallit o‘lchamining elektronlar flyuensiga bog‘liqligi: qora nuqtalar eksperimentdan olingan natijalar (3.3. formula)

[178]

Olingan natijalarga asoslanib BDUNN va KDUNNlarda elektronlar flyuensi natijasida paydo bo‘ladigan nuqsonlar mexanizmini qarab chiqamiz.

Elektron nurlanishining BDUNN strukturalariga ta’siri bo‘yicha olingan natijalar tahlili atomlarning siljishi va yuqori energiyali elektronlar ta’sirida nuqsonlarning paydo bo‘lishidan kelib chiqadigan panjara parametrlarining oshishini ko‘rsatdi.

Ushbu o‘zgarishlarning sababi yuqori energiyali elektronlar tomonidan “yaratilgan” BDUNN devorlaridagi vakansiyalarning mavjudligidir. Ko‘p sonli atomlar juda tez va yuqori haroratlarda chiqarilganda paydo bo‘lgan vakansiyalar beqaror ekanligi aniqlandi, bu sirtini qayta qurish va diametrini oshishiga olib keldi [125]. [125] mualliflari tomonidan elektronlar flyuensi natijasida UNNlarda paydo bo‘lgan vakansiyalar “zipper mexanizm” orqali qayta birlashishi aniqlangan.

Shunday qilib, bir devorli uglerodli nanonaychanning $1,54\times 10^{17}$ el/sm² gacha bo‘lgan elektronlar flyuensi bilan nurlanishi metallardan yarim o‘tkazuvchanlikka o‘tishni rag‘batlantiradi. Elektron nurlanishdan so‘ng D rejim intensivligining

oshishi amorf uglerod tarkibining ko'payishi bilan bog'liq deb taxmin qilish mumkin. Ammo shu bilan birga, Raman spektroskopiyasida intensivlikning kengligi $\sim 100 \text{ cm}^{-1}$ dan kam, shuningdek, kichik tarqalish burchaklaridagi rentgen diffraksiya naqshida amorf uglerodga xos keng tarqalgan diffuz refleks (halo) mavjud emas. Bularning barchasi nurlanish BDUNNda amorf uglerod hosil bo'lishiga yordam bermasligini, balki boshqa turdagi nuqsonlarning paydo bo'lishini (C=C bog'lanishining uzilishini) ko'rsatadi.

KDUNNlarni elektronlar bilan nurlantirish uglerod nanonaychasi devorlarida vakansiyalar paydo bo'lishiga yordam berdi va yuqori elektron flyuenslari bilan nurlantirish namunaning amorfizatsiyasini rag'batlantiradi.

KDUNNlar BDUNNlarga qaraganda nurlanishga barqarorroq ekanligi adabiyotlarda ko'rilgan [75].

3.11-jadvalga asosan dislokatsiya zichliklari BDUNN va KDUNN namunalari ikkisida ham nurlantirish natijasida kamaymoqda. Yuqorida tavsiflangan "zanjir mexanizmi" ni ko'rib chiqsak, 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 spiral shaklida harakatlanadi va nanonaycha uchi tomon harakatlanadi. Buni metall holatdan yarimo'tkazgich holatiga o'tish bilan ham izohlash mumkin.

3.3.2. (ZrTi)CN va (TiHfTa)CN nanoqoplamalar nanokristallitlari hamda dislokatsiya zichliklari

Nanoqoplamalardagi panjara parametrlari o'zgarishining sabablaridan biri bu nuqsonlar va siljishdir [150]. Yuqori energiyali elektronlar bilan nurlanish namunadagi mikrozo'riqish paydo bo'lishiga olib kelishi mumkinligini hisobga olsak, maksimal eksperimental reflekslar intensivligi yarmining to'liq kengligi (β) ni inobatga olib (1.19) ifodadan foydalanib nanokristallitlar qiymatini aniqlaymiz.

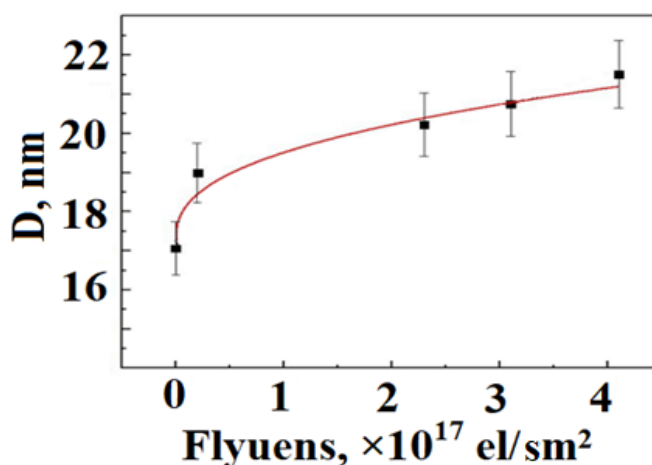
(ZrTi)CN uchun (111), (200), (220) va (222) intensivliklaridan foydalandik. Kub TiC fazasidan (111) refleks intensivligi qisman (ZrTi)CN fazaning (111) intensivligiga qo‘shiladi.

(1.19) ifodaga ko‘ra kristallit o‘lchamlari hisoblandi va kristallit o‘lchamlarining elektron nurlanish flyuensiga bog‘liqligi chizildi (3.22-rasm). Mikrozo‘riqishning qiymati mos ravishda nurlantirilmagan va $4,1 \times 10^{17}$ el/sm² flyuensda nurlangan namunalarda $1,02 \times 10^{-2}$ dan $0,83 \times 10^{-2}$ gacha kamaydi. Olingan natijalar 3.12-jadvalda keltirilgan.

Elektronlar bilan nurlantirilgan nanokompozit namuna nanokristalliti o‘lchamining elektronlar flyuensiga bog‘liqligi (3.4) ko‘rinishda ekanligi aniqlandi.

$$D = D_0 e^{a - \frac{b}{\Phi + c}} \quad (3.4)$$

bu yerda, D – nanokristallit o‘lchami, $D_0=1$ nm, Φ – elektronlar flyuens, 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‘zgarmas kattaliklardir.



3.22-rasm. (ZrTi)CN nanokompozit namuna nanokristalliti o‘lchamining elektronlar flyuensiga bog‘liqligi: qora nuqtalar eksperimentdan olingan natijalar (3.4-formula) [184]

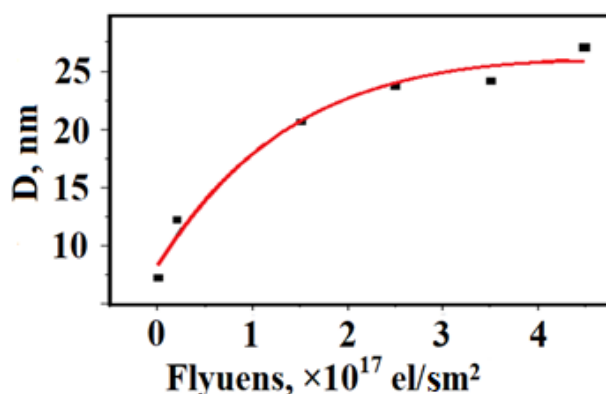
Ushbu bog‘liqlik [134] da keltirilgan natijaga o‘xshaydi, ammo [137] da Zr plyonkasi Kr ionlari tomonidan 500 kV energiya bilan 8×10^{15} ion/sm² flyuensda nurlantirilgan.

Hisob-kitoblar shuni ko‘rsatdiki, $4,1 \times 10^{17}$ el/sm² flyuens bilan nurlantirilganda dislokatsiya zichligi $0,34 \times 10^{12}$ sm⁻² dan $0,22 \times 10^{12}$ sm⁻² gacha kamaydi.

(TiHfTa)CN nanoqoplamasi kristallitlar o‘lchamini aniqlashda ham yuqoridagi usuldan foydalaniladi. (TiHfTa)CN rentgenogrammasidan (111), (200), (220), (311) va (420) reflekslaridan foydalanib Uilyamson-Xall diagrammasi chiziladi va nanokristallitlar o‘lchamini (1.20) ifodaga ko‘ra aniqlanadi. Olingan natijalar asosida (TiHfTa)CN nanokristalliti o‘lchamining elektronlar flyuensiga bog‘liqlik funksiyasi aniqlandi (3.5) va chizildi (3.23-rasm):

$$D = D_0 - \rho e^{-\Phi/t} \quad (3.5)$$

bu yerda, $D_0=26,82(1,68)$ nm, Φ – elektronlar flyuensi, ρ va t eksperimental nuqtalarga o‘rnatilgan model parametrlari: $\rho=18,4(1,8)$, $t= 1,35(0,42)$.



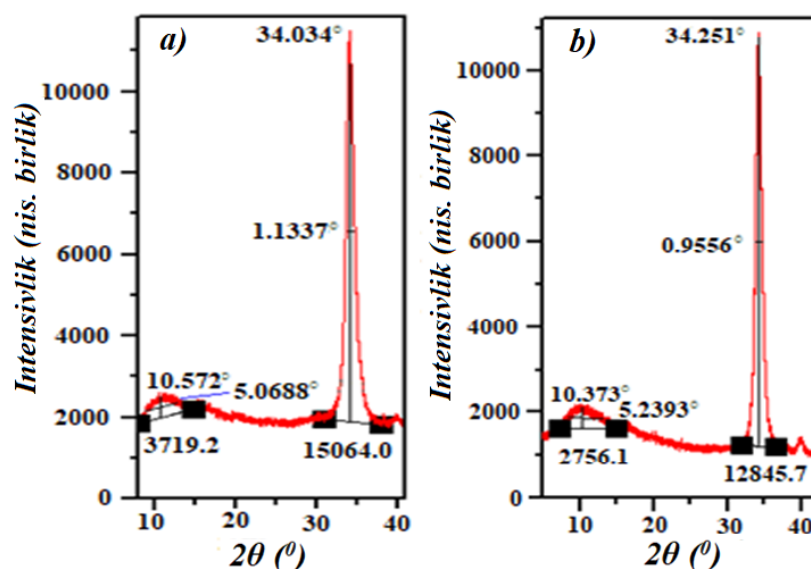
3.23-rasm. (TiHfTa)CN nanokompozit namuna nanokristalliti o‘lchamining elektronlar flyuensiga bog‘liqligi: qora nuqtalar eksperimentdan olingan natijalar (3.5. formula) [187]

Dislokatsiya zichligini (3.2) formula yordamida aniqlandi. Olingan natijalar 3.12-jadvalda keltirilgan.

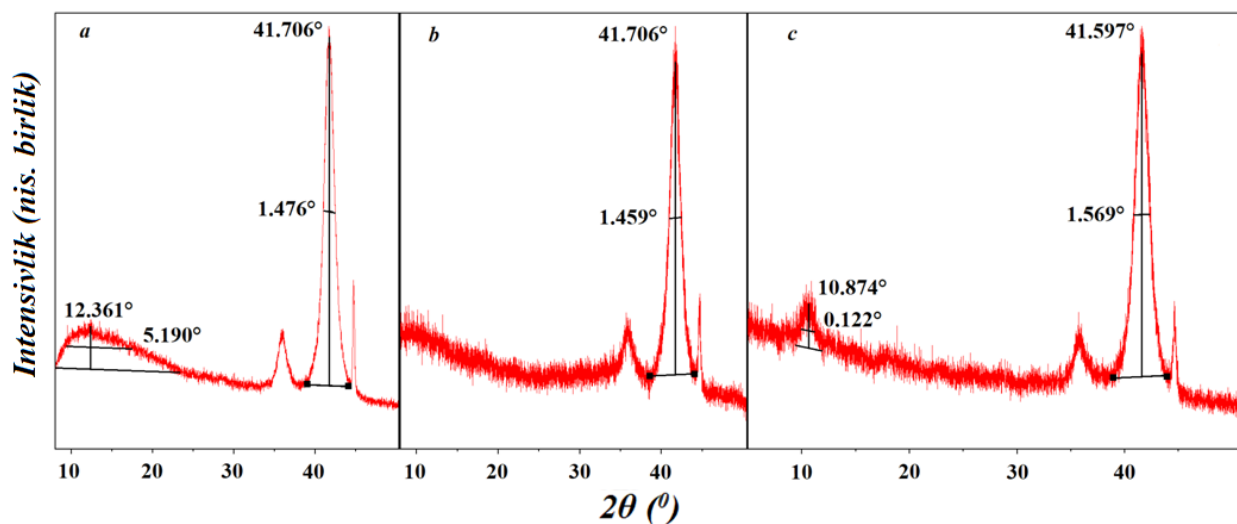
(ZrTi)CN va (TiHfTa)CN nanoqoplamalarining nanokristallitlar o'lchami, mikrozo'riqish va dislokatsiyalar qiymatlari [184, 187]

Namuna	Flyuens, el/sm^2	D, nm	$\varepsilon, \times 10^{-3}$	$\delta \times 10^{12}, \text{sm}^{-2}$
(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

Namunalarning kristalliligi elektronlar bilan nurlantirish natijasida ortadi, bu kristall refleks integral intensivligining kichik tarqalish burchaklarida yuzaga keladigan amorf holatning integral intensivligiga nisbatidan aniqlanishi mumkin. $4,1 \times 10^{17} \text{ el}/\text{sm}^2$ elektronlar flyuensi bilan nurlantirishdan so'ng, bu nisbatning qiymati (ZrTi)CNda 4,05 dan 4,66 gacha (3.24-rasm), (TiHfTa)CNda 2,04 dan 9,83 gacha (3.25-rasm) o'zgaradi.



3.24-rasm. (ZrTi)CNning nurlantirilmagan (a), va $4,1 \times 10^{17} \text{ el}/\text{sm}^2$ (b) flyuensda nurlantirilgandagi $2\theta=8-43^\circ$ oraliqdagi rentgenogrammalari



3.25-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 $2\theta=8-50^\circ$ oraliqdagi rentgenogrammalari [187]

Avvalroq (ZrTi)CNning tuzilishi, zarralarining kattaligi va yuza notekisligi o'rganilib, faqat kub tuzilishi shakllangan [191]. Unda, Sherrer formulasi bilan aniqlangan kristallit kattaligi tarkibiga qarab turlicha, 11,1 nm dan 28,6 nm gacha, yuza notekisligi 3,7 nm dan 5,6 nm gacha o'zgargan. Namuna tarkibidagi (ZrTi) metall tarkibining ko'payishi zarra o'lchamining va yuza notekisligining oshishiga olib keldi. Bizning tadqiqotlarimizda ko'p fazali holatning va [189] ishdagi bir fazali holatning shakllanishi o'rganilayotgan namunalarda metall bo'lmagan (CN) tarkibidagi farq bilan bog'liq. [191] ishda, biznikiga (23 %) taqqoslaganda, metall bo'lmaganlarning tarkibi yuqori (73 % gacha). ZrTiCNda faqatgina ZrC va TiC fazalari reflekslari topilgan [192].

Faqat shu fazalarning mavjudligi past kristallik va kislorod (10,2 %) borligi bilan bog'liq, ammo namunadagi azot va uglerod miqdori mos ravishda 25,0 % va 25,1 %. Yuza notekisligi, qoplama sharoitiga, aralashmalar mavjudligiga va (C+N)/(Zr+Ti) nisbatiga bog'liq. Metalloidlarning metallarga nisbatiga qarab zarra o'lchami 177 nm (taxminan 50/50 %) dan 128 nm (70/30 %) gacha o'zgarib turishi [193] da aniqlandi. O'rganilgan namunada kub fazasi bilan bir qatorda amorf faza ham mavjud ekanligi ko'rsatilgan [193]. Ushbu ish ma'lumotlarida, ehtimol [194] ishda bo'lgani kabi, metall va metalloid atomlarining joylashishida qisqa diapazon

shakllangan, chunki halolar rentgen sochilishining kichik burchaklarida mavjud (3.11-rasm).

[147] ish mualliflari tomonidan SiO₂/Si asosga yotqizilgan Ag/Fe ikkilik qatlamlari 20, 77 va 300 K da 300–750 keV Ar va Xe ionlari bilan termal aralashmaydigan tizimda ion nurlari ta'sirida qorishma va faza hosil bo'lishini o'rganish uchun nurlantirilgan. Tadqiqot natijalariga ko'ra, xona haroratida va 77 K temperaturada 4×10^{16} Ar/sm² bilan namuna nurlantirilganda kuchli qayta kristallanish va zarra o'sishi yuz berdi. Xona haroratida nurlantirilganda namuna yuzasi notekisligi 10 marta oshdi, 77 K da esa nurlanish 50 nm² bo'lgan plastinkasimon strukturaning ancha silliq yuzasini hosil qiladi. 300 K da nurlangan namunadagi tekshiruvlar kamroq teksturalangan sirtini aniqlagan [147].

Shuningdek, [147] ish mualliflari termal donalar vaqtinchalik diffuziya past haroratda eng ko'zga ko'ringan transport mexanizmi, xona haroratida esa termal faollashtirilgan nuqson migratsiyasi ham muhim ekanligini ta'kidlashadi. Ushbu mexanizmga ko'ra Ag plyonkasi ichida bir necha nm diametrli mahalliy termal zarralar hosil bo'ladi va qayta kristallanish va zarraning o'sishi zarra chegaralarini birlashtirish va keyinchalik qotib qolish orqali sodir bo'lishini taxmin qilishadi. Yupqa plyonkada zarra chegaralari asosan sirtga perpendikulyar bo'lganligi sababli, tajribada kuzatilganidek, bunday mexanizm bilan zarraning o'sishi lateral yo'nalishda afzal ko'riladi. Termal faollashtirilgan uzoq masofali nuqsonlar migratsiyasi mumkin bo'lishi bilanoq ~300 K nurlanishda bo'lgani kabi, donalar uch o'lchamda o'sib, sharsimon shaklga ega bo'lishi mumkin. Bu ta'sir, ehtimol, bitta va ketma-ket nurlangan namunalar uchun kuzatilgan turli notekislikni ham tushuntiradi. Qisman uch yo'nalishli qayta kristallanish namunani har bir nurlanish bosqichi o'rtasida 300 K ga qizdirish paytida nuqsonlarni tiklash natijasida yuzaga kelishi mumkin, bu nurlanish yo'nalishining kichik o'zgarishlariga qo'shimcha ravishda bo'lishi mumkin [147]. Past haroratda nurlantirish natijasida zarralar o'sishining turli mexanizmi, yuqorida ta'riflanganidek va boshqa mualliflar ham taklif qilganidek, termal donalar ichidagi diffuziyani o'z ichiga oladi [147, 195, 196]

(ZrTi)CN va (TiHfTa)CNdagi nanokristallitlar o'lchamlarining oshishi nurlanish ta'sirida chegaralarning qisqarishi tufayli ularning o'sishi va birlashishi bilan bog'liq. Nanokristallar o'lchamining o'sishi dislokatsiya mexanizmi bilan sodir bo'lmaydi, chunki nurlanish paytida (ZrTi)CN va (TiHfTa)CNdagi dislokatsiya zichligi pasayadi, nanokristallarning o'lchami oshadi va sirt notekisligi mos ravishda kamayadi hamda ortadi. Butun notekis sirt bo'ylab "zarrachalarni" biriktiruvchi normal o'sish mexanizmi ham mos kelmaydi, garchi (ZrTi)CN va (TiHfTa)CNdagi sirt notekisligi elektronlar flyuensining oshishi bilan boshqacha o'zgaradi. Ikki o'lchovli o'zaklanish mexanizmi (qalinligi – bitta atom qatlami) bo'yicha kristallitlarning o'sishi yoriqlar, qadamlar, dislokatsiyalar bilan qoplangan sirtida sodir bo'ladi va butun sirtni to'ldirish uchun kengayadi, so'ngra shakllangan qatlam yangi ikki o'lchovli o'zakni vujudga keltiradi, qatlamli o'sish sodir bo'ladi. Ushbu o'sish mexanizmi, ehtimol, (ZrTi)CN va (TiHfTa)CNga to'g'ri keladi, chunki dastlabki (ZrTi)CN sirt nuqsonlari va aralashmalarni (trigonal tuzilishga ega ikkinchi faza aralashmasi) o'z ichiga oladi, ular yuqori mikrozo'riqishni va nisbatan past dislokatsiya zichligini "hosil qiladi", shu bilan birga dastlabki (TiHfTa)CN uch o'lchamli yoki hajmiy nuqsonlarni o'z ichiga olgan (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 ortishi, dislokatsiyalar spiral shaklida harakat qilishi sirt notekisligining o'zgarishga olib keldi.

Uchinchi bob bo'yicha xulosalar

1. BDUNN namunasining rentgenostrukturaviy tahlillari uning ikki geksagonal strukturali fazadan iborat ekanligini ko'rsatdi: $P6/mmm$ va $P6_3/mc$, $1,54 \times 10^{17}$ el/sm² gacha bo'lgan nurlantirish flyuensi a va b panjara parametrlarining 4,7623 Å dan 4,9378 Å gacha oshishiga va c parametrlarining 3,9491

Å dan 3,9469 Å gacha pasayishiga, nanokristallitlar o'lchamining 4,06 nm dan 5,03 nm gacha o'sishiga, dislokatsiyalar zichligi 6,07 dan $3,95 \times 10^{12} \text{ sm}^{-2}$ ga pastlashiga va mikrozo'riqishning kamayishiga olib keldi. Raman tahlillariga ko'ra, nurlanish ta'sirida buzilishlar ro'y berganligi aniqlandi. Ushbu buzilishlar amorf holat ortishidan emas, balki C=C bog'larning uzilishidan kelib chiqishi aniqlandi, shuningdek naychanning nurlanish ta'sirida metal holatdan yarim o'tkazgich holatiga o'tishi aniqlandi.

2. KDUNNning rentgenostrukturaviy tahlillarida uning bir fazali geksagonal strukturadan iborat ekanligini aniqlandi. Namunani $5,1 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$ flyuensgacha nurlantirilish natijasiga ko'ra: $a=b$ panjara parametrlari 2,4398 Å dan 2,5504 Å gacha, c 6,6637 Å dan 6,9800 Å gacha oshdi; nanokristallit o'lchami 9.35 nm dan 9.46 nm ga oshdi; dislokatsiyalar zichligi 1,14 dan $1,11 \times 10^{12} \text{ sm}^{-2}$ miqdorga kamaydi. Raman tahlillariga ko'ra, KDUNN ichki diametri 2,05 dan 2,13 nm ga oshdi, shuningdek buzilishlar ro'y berayotganini ko'rsatdi.

3. (ZrTi)CN nanoqoplamasi rentgenostrukturaviy tahlillari namuna 2 fazadan iborat ekanligini ko'rsatdi: (ZrTi)CN – kubik ($Fm\bar{3}m$), TiC – trigonal ($R\bar{3}m$) (Fe – kubik ($Im\bar{3}m$), asos materiali). $4,1 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$ da TiC trigonal strukturadan kubik ($Fm\bar{3}m$) strukturaga o'zgarishi aniqlandi. (ZrTi)CN da panjara parametrlari oshishi kuzatildi. Nurlantirish flyuensi $4,1 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$ gacha bo'lgan nurlanish dozasida nanokristallitlar o'lchami 17,1 nm dan 21,6 nm ga kattalashdi, dislokatsiyalar zichligi 0,34 dan $0,22 \times 10^{12} \text{ sm}^{-2}$ ga va mikrozo'riqish $1,02 \times 10^{-2}$ dan $0,83 \times 10^{-2}$ ga kamaydi, sirt notekisligi 2,2 marta yaxshilandi.

4. (TiHfTa)CN nanoqoplamasi rentgenostrukturaviy tahlillari namuna 1 fazadan iborat ekanligini ko'rsatdi: (TiHfTa)CN – kub ($Fm\bar{3}m$) (Fe – kub ($Im\bar{3}m$), asos materiali). (TiHfTa)CNda panjara parametrlarining $3,5 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$ flyuensgacha nurlantirilganda oshib borishi kuzatildi, $4,5 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$ da esa panjara parametri dastlabki holatga qaytdi. $4,5 \times 10^{17} \text{ el/sm}^2$ gacha bo'lgan nurlanish flyuensida nanokristallitlar o'lchami 7,30 nm dan 27,34 nm ga kattalashdi, dislokatsiyalar zichligi 1,88 dan $0,13 \times 10^{12} \text{ sm}^{-2}$ ga kamaydi va mikrostress 5,38 dan $1,20 \times 10^{-4}$ ga kamaydi, sirt notekisligi 13,2 marta ordi.

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. BDUNN ni $1,54 \times 10^{17}$ 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 trigonalndan (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 yuza notekisligini 13,2 marta oshishiga, nanokristallitlar o'lchamlari 73% ga o'sishiga, 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)CN da uch o'lchovli yoki hajmiy nuqsonlar mavjud.

10. Tajriba natijalari (struktura, sirt notekisligi, nanokristallit o'lchami, nanonaycha diametri, mikrozo'riqish, dislokatsiya zichligi, elektronlar flyuensi ta'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.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Venkataraman A., Amadi E.V., Chen Y., Papadopoupolos C. Carbon Nanotube Assembly and Integration for Applications // *Nanoscale Research Letters*. - (AQSh), 2019. -Vol.14. –No.220. –P.1-47
2. Chen T. and Dai. L. Carbon nanomaterials for high-performance supercapacitors. *Materials Today*. –Elsevier (Netherlands), Volume 16, Numbers 7/8, 2013.
3. Arora B., Attri P. Carbon Nanotubes (CNTs): A Potential Nanomaterial for Water Purification. *Journal of Composites Science*. –Multidisciplinary Digital Publishing Institute (Switzerland), 2020, 4, 135; doi:10.3390/jcs4030135
4. Hirsch A. The era of carbon allotropes. *Nature Materials*. –Nature Publishing Group (UK), 2010. 9(11): p. 868-871.
5. Hirahara K., Suenaga K., Bandow S., Kato H., Okazaki T., Shinohara H., and Iijima S. One-Dimensional Metallofullerene Crystal Generated Inside Single-Walled Carbon Nanotubes // *Physical Review Letters*. –American Physical Society (USA), Vol. 85, num 25. –P. 2384-2387.
6. Aqel A., Kholoud M.M. Abou El-Nour, Reda A.A. Ammar, Al-Warthan A. Carbon nanotubes, science and technology part (I) structure, synthesis and characterization // *Arabian Journal of Chemistry*. –Elsevier (Netherlands), 2012. -Vol.5. –P.1–23.
7. Tilmaciu C.M., Morris M.C.. Carbon nanotube biosensors // *Frontiers in Chemistry*. –(Switzerland), 2015. -Vol.3 – P.0059.1-0059.21.
8. Yang F., Wang M., Zhang D., Yang J., Zheng M., and Li Y. Chirality pure carbon nanotubes: growth, sorting, and characterization. *Chemical Reviews*. – American Chemical Society (USA), 2020, 120, 5, 2693–2758.
9. Weisman R.B. and Bachilo S.M. Dependence of optical transition energies on structure for single-walled carbon nanotubes in aqueous suspension: an empirical katura plot // *Nano Letters*. –American Chemical Society (USA), Vol. 3, No. 9, 2003.

10. Maultzsch J.; Telg H.; Reich S. and Thomsen. Radial breathing mode of single-walled carbon nanotubes: Optical transition energies and chiral-index assignment // *Physical Review C*. –American Physical Society (USA), 2005. – Vol.72. –P. 205438.1- 205438.8
11. Jorio A.; Saito R.; Hafner J. H.; Lieber C. M.; Hunter M.; McClure T.; Dresselhaus G.; Dresselhaus M. S. Structural (n, m) determination of isolated single-wall carbon nanotubes by resonant Raman scattering // *Physical Review Letters* –American Physical Society (USA), 2001. –Vol.86. -No.6. –P.1118-1121.
12. Miyata Y, Mizuno K, and Kataura H. Purity and Defect Characterization of Single-Wall Carbon Nanotubes Using Raman Spectroscopy // *Journal of Nanomaterials*. –Hindawi (UK), 2011. –Vol.2011. -P.1-7.
13. Jorio A., Souza Filho A.G., Dresselhaus G., Dresselhaus M.S., et al. G-band Raman spectra of isolated single wall carbon nanotubes: diameter and chirality dependence // *Material Research Society Symposium Proceedings* –(USA), 2002. -Vol.706. –P. 187-192.
14. Saito R., Gruneis A., Samsonidze Ge.G., Brar V.W., et al. Double resonance Raman spectroscopy of single-wall carbon nanotubes // *New Journal of Physics*. –IOP Publishing Ltd. (UK), 2003. –No.5. –P.157.1–157.15.
15. Henrard L., Hernandez E., Bernier P., and Rubio A. Van der Waals interaction in nanotube bundles: consequences on vibrational modes // *Physical Review B*. –American Physical Society (USA), 1999. –Vol.60. – No.12. –P.R8521.1-R85215.
16. Costa S., Borowiak-Palen E., Kruszynska M., Bachmatiuk A., Kalenczuk R.J. Characterization of carbon nanotubes by Raman spectroscopy // *Material Science-Poland*. –Springer Nature (Switzerland), 2008. -Vol. 26. -No.2. – P.433-441.
17. Kürti J., Kresse G., and Kuzmany H. First-principles calculations of the radial breathing mode of single-wall carbon nanotubes // *Physical Review B*. – American Physical Society (USA), 1998. –Vol.58. – P. R8869-R8872.

18. Choi J.H.; Lee J.; Moon S.M.; Kim Y.T.; Park H.; Lee C.Y. A Low-Energy Electron Beam Does Not Damage Single-Walled Carbon Nanotubes and Graphene // *Physical Chemistry Letters* –American Chemical Society (USA), 2016. -Vol.7. –P. 4739–4743.
19. Kramberger C.; Pfeiffer R.; Kuzmany H.; Zólyomi V.; Kürti J. Assignment of chiral vectors in carbon nanotubes // *Physical Review B*. –American Physical Society (USA), 2003. –Vol.68. –P. 235404.1-5.
20. Rao A.M., Richter E., Bandow S., Chase B., Eklund P.C, Williams K.A., Fang S., Subbaswamy K.R. et al. Diameter-Selective Raman Scattering from Vibrational Modes in Carbon Nanotubes // *Science*. –American Association of the Advancement of Science (USA), 1997. –Vol. 275. –P. 187-191.
21. Dahl E.M. Single-Walled Carbon Nanotube Response to Neutron and Gamma Irradiation // Thesis submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. –P.116.
22. Jorio A. and Saito R. Raman spectroscopy for carbon nanotube applications // *Journal of Applied Physics*. –AIP Publishing LLC (USA), 2021. –Vol.129. –P. 021102.1-021102.27
23. Park J., Shin S.J. and Seong M.J. Effect of proton irradiation on single-walled carbon nanotubes studied using Raman spectroscopy // *Journal of the Korean Physical Society*. –Springer Nature (Switzerland), 2008. -Vol.53. -No.4. – P.2312-2315.
24. Dresselhaus M.A., Dresselhaus G., Satio R. and Jorio A. Raman spectroscopy of carbon nanotubes // *Physics Reports* –Elsevier (Netherlands), 2004. – Vol.409. –P.47-99
25. Bacsá R. R., Peigney A., Laurent C., Puech P., and Bacsá W. S. Chirality of internal metallic and semiconducting carbon nanotubes // *Physical Review B*. – American Physical Society (USA), 2002. –Vol. 65. –No.16. –P. 161404.1-161404.4

26. Jorio A., et al. Characterizing carbon nanotube samples with resonance Raman scattering // *New Journal of Physics*. – IOP Publishing Ltd. (United Kingdom), 2003. – Vol. 5. –No.1. – P.139.1-139.17
27. Tomsen Ch. and Reich S. Raman Scattering in Carbon Nanotubes // *Topics in Applied Physics*. –Springer Nature (Switzerland), 2007. - P.115-232.
28. Eatemadi A., Daraee H., Karimkhanloo H., Kouhi M. et al. Carbon nanotubes: properties, synthesis, purification, and medical applications // *Nanoscale Research Letters*. –Springer Nature (Switzerland), 2014. -Vol. 9. No. 393. –P.1-13.
29. Bucknum M.J. and Castro E.A. The carbon allotrope hexagonite and its potential synthesis from cold compression of carbon nanotubes // *Journal of Chemical Theory and Computation*. –American Chemical Society (USA), 2006. -Vol.2. –P.775-781.
30. Chew S.Y., et al. Flexible free-standing carbon nanotube films for model lithium-ion batteries // *Carbon*. –Elsevier (Netherlands), 2009.- Vol.47. – P.2976 – 2983.
31. Cao A, Xu C, Liang J, Wu D, Wei B. X-ray diffraction characterization on the alignment degree of carbon nanotubes // *Chemical Physics Letters*. –Elsevier (Netherlands), 2001. –Vol.344. -No.1. –P.13–17.
32. Göksu H., Cellat K., Şen F. Single-Walled Carbon Nanotube Supported PtNi Nanoparticles (PtNi@SWCNT) Catalyzed Oxidation of Benzyl Alcohols to the Benzaldehyde Derivatives in Oxygen Atmosphere // *Scientific Reports*. – Springer Nature (Switzerland), 2020. –Vol.10. –P. 10.9656.1-10.9656.11.
33. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии // -М.: Физ матлит. 2005, -С.416.
34. Гусев А.И., Ремпель А.Л. Нанокристаллические материалы // М.: Физ матлит. Монография. –(Москва), 2001. -С.224
35. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы // М.: Академия. –(Москва), 2005.–С.192

36. Симон Г., Тома М. Прикладная техника обработки поверхности металлических материалов // Челябинск: Metallurgy. –(Россия), 1991. – С.368.
37. Bunshah R.F. et al. Deposition technologies for films and coating //– Park Ridge, New Jersey (USA): Noyes Publikations, 1982. –P.489.
38. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. // -М.: Metallurgy, 1992. –С.198
39. Никитин М.М. Технология и оборудование вакуумного напыления // -М.: Metallurgy, 1992. –С.112
40. Валиев Р.З., Алнеспндров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией // -М.: Логос, 2000.-С.272.
41. Погребняк А.Д., Шпак А.П., Азаренков Н.А., Береснев В. М. Структура и свойства твёрдых и сверхтвёрдых нанокompозитных покрытий // Успехи физических наук. –Москва, 2009. -Том.179. –С.35–64
42. Lazzari R., Vast N., Besson J. M., Baroni S. and Dal Corso A. Atomic Structure and Vibrational Properties of Icosahedral B₄C Boron Carbide // Physical Review Letters –American Physical Society (USA), 1999. –Vol.83. – No.16. –P.3230-3233.
43. Beresnev V.M., Pogrebnyak A.D., Azarenkov N.A., et al. The possibility of formation of nanocrystalline Ti-Al-N coatings using // Progress in Physics of Metals. –(Ukraina), 2007. –Vol.8. –No.3. –P.171-246.
44. Левашов Е.А., Штанский Д.В. Многофункциональные наноструктурированные пленки // Успехи химии. – (Россия), 2007. – Т. 76. № 5. – С. 502-509.
45. Погребняк А.Д., Соболев О.В., Береснев В.М., Турбин П.В., Дуб С.Н., Кирик Г.В., Дмитренко А.Е. Особенности структурного состояния и механических свойств покрытий ZrN и Zr(Ti)–Si–N, полученных ионно-плазменными методами // Письма в ЖТФ. -(Россия), 2009. –Том.35. Вып.19. - С.103-110.

46. Холлек Х. Двойные и тройные карбидные и нитридные системы переходных металлов // Пер. с нем. Под ред. Левинского Ю. В. М.: Металлургия, 1988. 319с.
47. Gunter B., Kumpmann A. Ultrafine oxide powders prepared by inert gas evaporation // Nanostructured Materials. –Elsevier (Netherlands), 1992. – Vol.1. –No.1. –P.27-30.
48. Veprek S. Nesladek P., Niederhofer A., Glatz F., Jilck M., Sima M. Recent progress in the superhard nanocrystalline composites: towards their industrialization and under standing of the origin of the superhardness // Surface and Coatings Technology. –Elsevier (Netherlands), 1998. – Vol. 108-109. – P. 138-140.
49. Погребняк А.Д., Дробышевская А.А., Ильяшенко М.В., Кирик Г.В., и др. Триботехнические, физико-механические свойства и термическая стабильность нано- и микрокомпозитных покрытий на основе Ti-Al-N // ФІП ФІП PSE. –(Украина), 2010. -Том.8. -№1. –С.20-27.
50. Береснев В.М., Толоч В.Т., Гриценко В.И. Покрытия на основе тугоплавких соединений, осаждаемых из потоков металлической плазмы вакуумной дуги // Физическая инженерия поверхности. –(Украина), 2003. – Том. 1. -№ 3-4. – С. 237-257.
51. Береснев В.М. Факторы влияющие на формирование многокомпонентных покрытий на основе TiN // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. –(Украина), 2005. – № 4/2 (16). – С. 76-78.
52. Moskovskikh D. et al. Extremely hard and tough high entropy nitride ceramics. // Scientific Reports. –Springer Nature (Switzerland), 2020. –Vol.10. –No.1. –P. 19874(8).
53. Pogrebnyak A.D., Yakushchenko I.V., Bagdasaryan A.A., Bondar O.V., Krause-Rehberg R., Abadias G., Sobol O.V. Microstructure, physical and chemical properties of nanostructured (Ti–Hf–Zr–V–Nb) N coatings under different deposition conditions // Materials Chemistry and Physics. –Elsevier (Netherlands), 2014. –Vol.147. –No.3. –P.1079–1091.

54. Aouadi S.M. Structural and mechanical properties of TaZrN films: Experimental and ab initio studies. // Journal of Applied Physics. –AIP Publishing LLC (USA), 2006. -Vol.99. –No.5. -P.053507.1-053507.5
55. Yeh J.W., Chen S.K., Lin S.J., Gan J.Y., Chin T.S., Shun T.T., Chang S.Y. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes // Advanced Engineering Materials. – Wiley-VCH (Germany), 2004. –Vol.6. –No.5. – P.299–303.
56. Tong C.J., Chen Y.L., Yeh J.W., Lin S.J., Chen S.K., Shun T.T., Chang S.Y. Microstructure characterization of Al x CoCrCuFeNi high-entropy alloy system with multiprincipal elements // Metallurgical and Materials Transactions A. –Springer Nature (Switzerland), 2005. –Vol.36. –No.4. – P.881–893.
57. Погребняк А.Д., Шпак А.П., Азаренков Н.А., Береснев В.М. Структура и свойства твердых и сверхтвердых нанокompозитных покрытий // Успехи физических наук. –Москва, 2009. – Т. 179, № 1. – С. 35-64
58. Dolique V., Thomann A.L., Brault P., Tessier Y., Gillon P. Complex structure composition relationship in thin films of AlCoCrCuFeNi high entropy alloy // Materials Chemistry and Physics. –Elsevier (Netherlands), 2009. –Vol.117. No.1. - P.142–147.
59. Погребняк А.Д., Krause-Rehberg R., Купчишин А.И., Дробышевская А.А., и др. Влияние термического отжига на структуру дефектов и свойства наноструктурного покрытия Ti-Si-N, полученного катодным вакуумно-дуговым осаждением // Вопросы атомной науки и техники. –(Россия), 2013. –№ 2. –С. 134-139.
60. Pogrebnyak A.D., Bondar O.V., Borba S.O., Abadias G., et al. Nanostructured multielement (TiHfZrNbVTa)N coatings before and after implantation of N+ ions (10^{18} sm⁻²): Their structure and mechanical properties // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. –Elsevier (Netherlands), 2016. –Vol.385. –P.74-83.

61. Bagdasaryan A.A., Pshyk A.V., Coy L.E., Konarski P., et al. A new type of (TiZrNbTaHf)N/MoN nanocomposite coating: microstructure and properties depending on energy of incident ions // *Composites Part B: Engineering*. – Elsevier (Netherlands), 2018. –Vol.146. –P.132-144.
62. Сергеев В.П., Федорищева М.В., Воронов А.В., Сергеев О.В., и др. Трибомеханические свойства и структура нанокompозитных покрытий $Ti_{1-x}Al_xN$ // - Известия Томского политехнического университета. 2006. - Т. 309. № 2. -С.149-153.
63. Chhowalla M., Amaratunga G.A.J. Thin films of fullerene-like MoS₂ nanoparticles with ultra-low friction and wear // *Nature*. –Springer Nature (Switzerland), 2000. –Vol.407. –P.164-167.
64. Deacon R.F, Goodman J.F. Lubrication by lamellar solid // *Proceeding of the Royal Society A*. –The Royal Society (UK), 1958. –Vol.243. –No.1235. –P. 464–482 (1958)
65. Hilton M.R., Fleischauer P.D. Applications of solid lubricant films in spacecraft // *Surface and Coatings Technology*. –Elsevier (Netherlands), 1992. –Vol.54–55. –P. 435–441.
66. Rowe G.W. Some observations on the frictional behaviour of boron nitride and of graphite // *Wear*. –Elsevier (Netherlands), 1960. –Vol.3. –P. 274–285.
67. Pino A.O., Pladellorens J., Colom J.F. Method of measure of roughness of paper based in the analysis of the texture of speckle pattern // *Speckle 2010: Optical Metrology*. SPIE (USA) –Vol.7387. 73871W
68. Go´ral A., Lityn´ska-Dobrzyn´ska L., and Kot M. Effect of Surface Roughness and Structure Features on Tribological Properties of Electrodeposited Nanocrystalline Ni and Ni/Al₂O₃ Coatings // *Journal of Materials Engineering and Performance*. –Springer Nature (Switzerland), 2017. –Vol.26. –No.5. –P. 2118-2128.
69. Farooq S.A., Raina A., Mohan S., Singh R.A., et.al. Nanostructured Coatings: Review on Processing Techniques, Corrosion Behaviour and Tribological

- Performance // *Nanomaterials*. –MDPI (Switzerland) 2022. –Vol.12. –No8. - pp.12, 1323-1359 (2-37).
70. Aliofkhaezrai M. Anti-abrasive Nanocoatings. Current and future application. Edited by Mahmood Aliofkhaezrai // Woodhead Publishing, –Elsevier (Netherlands), 2015. p. 581.
71. Марахтанов М.К., Клименко Г.К., Чжо В.Н.. Исследование характеристик шероховатости покрытия, нанесенного методом плазменного напыления // *Известия высших учебных заведений*, 2014. № 2, сс.72-76.
72. Freemantle M. *Chemistry in action* // Masmillan Education publ. –Springer Nature (Switzerland), 1987. 882 p.
73. Тешабоев А., Зайнобидшов С., Мусаев Э.А. Яримутказгичлар ва ярим-утказгичли асбоблар технологияси: (Укув кўлланма). Т.: “УАЖБНТ” Маркази, 2005, 392 б.
74. Sonthalia R., Behara P., Kumaresan T., Thakre S., Sonthalia R. et al. Review on alumina trihydrate precipitation mechanisms and effect of Bayer impurities on hydrate particle growth rate // *International Journal of Mineral Processing*. – Elsevier (Netherlands), 2013. –Vol.125. –P. 137–148.
75. Parker R.L. Modeling crystal growth rates from solution // *Journal of Crystal Growth*. –Elsevier (Netherlands), 1974. –Vol.22. –No.4. –P.335-338.
76. Frank F.C. The influence of dislocations on crystal growth // *Discussions of the Faraday Society*. –Royal Society of Chemistry (UK), 1949. –Vol.5, -P.48-54.
77. Burton W.K., Cabrera N., Frank F.C., The growth of crystals and the equilibrium structure of their surfaces // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. –The Royal Society (UK), 1951. –Vol.243. –No.866. –P. 299–358.
78. Amelinckx S., Bernaerts D., Zhang X.B., van Tendeloo G., van Landuyt J.A structure model and growth mechanism for multishell carbon nanotubes // *Science*. –American Association for the Advancement of Science (USA), 1995. –V.267. –No.5212. –P. 1334-1338.

79. Еецкий А.В., Смирнов Б.М. Фуллерены и структуры углерода // Успехи физических наук. –(Россия), 1995. –Т.165. №9. –С. 977-1009.
80. Покропивный А.В., Покропивный В.В. Дислокационный механизм формирования нанотрубок. Письма в ЖТФ, 2003, том 29, вып 12.
81. Patterson A. The Scherrer Formula for X-Ray Particle Size Determination // Physical Review. –American Physical Society (USA), 1939. –Vol.56. –No.10. –P. 978–982.
82. Kalital A., Karmakar S. Variation of Microstrain and Band gap of ZnO nanoparticle Thin Film Prepared by wet Chemical Method // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – (Spain), 2017. –Vol.6. –No.4. –P.5395-5401.
83. Williamson G., and Hall W. X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram. Acta Metallurgica. –Elsevier (Netherlands), 1953. –Vol.1. –No.1. –P. 22–31.
84. Izumi F., Ikeda T. Implementation of the Williamson–Hall and Halder–Wagner Methods into RIETAN-FP // Annual Report of the Advanced Ceramics Research Center of Nagoya Institute of Technology. – (Japan), 2014. -Vol.3. – P.33-38.
85. Flygare M., Svensson K. Quantifying crystallinity in carbon nanotubes and its influence on mechanical behavior // Materials Today Communications. – Elsevier (Netherlands), 2019. –Vol.18. –P. 39–45.
86. Tuinstra F. and Koenig J.L. Raman Spectrum of Graphite // The Journal of Chemical Physics. AIP Publishing LLC (USA), 1970. –Vol.53. –No.3. – P.1126–1130.
87. Cançado L.G., Takai K., Enoki T., Endo M., Kim Y.A., Mizusaki H., Jorio A., Coelho L.N., Magalhães-Paniago, R., and Pimenta, M.A. General equation for the determination of the crystallite size L_a of nanographite by Raman spectroscopy // Applied Physics Letters. AIP Publishing LLC (USA), 2006. – Vol.88. –No.16. –P.163106(3).

88. Lucchese M., Stavale F., Ferreira E.M., Vilani C., Moutinho M., Capaz R.B., Achete C., and Jorio A. Quantifying ion-induced defects and Raman relaxation length in grapheme // *Carbon*. –Elsevier (Netherlands), 2010. –Vol.48. –No.5. –P.1592–1597.
89. Behler K., Osswald S., Ye H., Dimovski S., and Gogotsi Y. Effect of Thermal Treatment on the Structure of Multi-walled Carbon Nanotubes // *Journal of Nanoparticle Research*. –Springer Nature (Switzerland), 2006. –Vol.8. –No.5. –P.615–625.
90. Rao A.M., Jorio A., Pimenta M.A., Dantas M.S.S., Saito R., Dresselhaus G., and Dresselhaus M.S. Polarized Raman Study of Aligned Multiwalled Carbon Nanotubes. *Physical Review Letters*. American Physical Society (USA), 2000. –Vol.84. –No.8. –P.1820– 1823.
91. Puech P., Flahaut E., Bassil A., Juffmann T., Beuneu F., and Bacsa W.S. Raman bands of double-wall carbon nanotubes: comparison with single- and triple-wall carbon nanotubes, and influence of annealing and electron irradiation // *Journal of Raman Spectroscopy*. –Wiley-VCH (Germany), 2007. –Vol.38. –No.6. –P.714– 720.
92. Osswald S., Havel M., and Gogotsi Y. Monitoring oxidation of multiwalled carbon nanotubes by Raman spectroscopy // *Journal of Raman Spectroscopy*. –Wiley-VCH (Germany), -Vol.38. –No.6. –P.728–736.
93. Mallet-Ladeira P., Puech P., Toulouse C., Cazayous M., Ratel-Ramond N., Weisbecker P., Ge´rard L.V., Monthieux M. A Raman study to obtain crystallite size of carbon materials: A better alternative to the Tuinstra–Koenig law // *Carbon*. –Elsevier (Netherlands), 2014. –Vol.80. –P.629-639.
94. Ritter U., Scharff P., Siegmund C., Dmytrenko O.P., et al. Radiation damage to multi-walled carbon nanotubes and their Raman vibrational modes // *Carbon*. –Elsevier (Netherlands), 2006. –Vol.44. –P.2694-2700.
95. Tan P.H., An L., Liu L.Q., Guo Z.X., Czerw R., Carrol D.L., et al. Probing the phonon dispersion relations of graphite from the double-resonance process of Stokes and anti Stokes Raman scatterings in multiwalled carbon nanotubes //

- Physical Review B. American Physical Society (USA), 2002. –Vol.66. – P.245410.1–245410.8.
96. Dharamvir K., Jeet K., Du Ch., Pan N. and Jindal V.K. Structural modifications of multiwalled carbon nanotubes by swift heavy ions irradiation // Journal of Nano Research. –Trans. Tech. Publications Ltd. (Switzerland), 2010. -Vol.10. –P.1-9.
97. Jung M.J., Park M.S., and Lee Y.S. Effects of e-beam irradiation on the chemical, physical, and electrochemical properties of activated carbons for electric double-layer capacitors // Journal of Nanomaterials. –Hindawi (UK), 2015. –P.1-8.
98. Maria C.E., Nitilaksha H., Xinyi L., et al. Effect of electron beam and gamma rays on carbon nanotube yarn structure // Material Research. –Springer Nature (Switzerland), 2017. –Vol.20. –No.2. –P.386-392.
99. Banhart F. Irradiation of carbon nanotubes with a focused electron beam in the electron microscope // Journal of Materials Science. –Springer Nature (Switzerland), 2006. –Vol. 41. –P.4505–4511.
100. Li B., Fang Y., Ding K., Qian G., et al. Effect of electron beam irradiation on multi-walled carbon nanotubes // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. –Elsevier (Netherlands), 2014. Vol.24. –P.764-769.
101. Mico C., Milas M., Seo J.W., Couteau E., et al. Effect of electron irradiation on the electrical properties of fibers of aligned single-walled carbon nanotubes // Applied Physics Letters. AIP Publishing LLC (USA), 2003. -Vol.83. –No.22. –P.4622.1-4622.5
102. Smith B.W., Luzzi D.E. Electron irradiation effects in single wall carbon nanotubes // Journal of Applied Physics. AIP Publishing LLC (USA), 2001. – Vol.90. –P.3509–3515.
103. Vázquez E., Prato M. Carbon nanotubes and microwaves: interactions, responses, and applications // ACS Nano. –American Chemical Society Publications (USA), 2009. –Vol.3. –No.12. –P.3819–3824.

104. Kim B.H., Lee D.H., Yang K.S., Lee B.C., Kim Y.A., Endo M. Electron beam irradiation-enhanced wettability of carbon fibers // ACS Applied Materials and Interfaces. –American Chemical Society Publications (USA), 2011. –Vol.3. –P.119–123.
105. Duchamp M., Meunier R., Smajda R., Mionic M., Magrez A., et al. Reinforcing multiwall carbon nanotubes by electron beam irradiation // Journal of Applied Physics. AIP Publishing LLC (USA), 2010. –Vol.108, - P.084314.1–084314.6.
106. Filleter T., Espinosa H.D. Multi-scale mechanical improvement produced in carbon nanotube fibers by irradiation cross-linking. Carbon. –Elsevier (Netherlands), 2013. –Vol.56. –P.1–11.
107. Williams T.S., Orloff N.D., Baker J.S., et al. Trade-off between the mechanical strength and microwave electrical properties of functionalized and irradiated carbon nanotube sheets // ACS Applied materials and Interfaces. American Chemical Society Publications (USA), 2016. –Vol.8. –No.14. – P.9327-9334.
108. Krashennnikov A.V., Nordlund K. Irradiation effects in carbon nanotubes // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. –Elsevier (Netherlands), 2003. –Vol.216. –P.355-366.
109. Tada K., Yasuda M., Mitsueda T., Honda R., Kawata H., Hirai Y. Molecular dynamics study of electron irradiation effects on mechanical properties of carbon nanotubes // Microelectronic Engineering. – Elsevier (Netherlands), 2013. –Vol.107. –P.50-53.
110. Teweldebrhan D. and Balandin A.A. Modification of graphene properties due to electron-beam irradiation // Applied Physics Letters. AIP Publishing LLC (USA), 2009. –Vol.94. –No.1. –P.013101.1-013101.10.
111. Zhu W.Z., Miser D.E., Chan W.G., Hajaligol M.R. Characterization of multiwalled carbon nanotubes prepared by carbon arc cathode deposit // Materials Chemistry and Physics. –Elsevier (Netherlands), 2003. –Vol.82. – No.3. –P.638-647.

112. Rols S., Almairac R., Henrard L., Anglaret E., Sauvajol J. Diffraction by finite-size crystalline bundles of single wall nanotubes // *European Physical Journal B*. –Springer Nature (Switzerland), 1999. –Vol.10. –No.2. –P.263–270.
113. Kuzmany H., Plank W., Hulman M., Kramberger Ch., et al. Determination of BDUNN diameters from the Raman response of the radial breathing mode // *European Physical Journal B*. –Springer Nature (Switzerland), 2001. –Vol.22. –P.307-320.
114. Solra F. Electrical properties of pristine and electron irradiated carbon nanotube yarns at small length scales // *Modern Chemistry and Applications*. – Walsh Medical Media (UK), 2014. –Vol.2. –No.1 –P.1-116.
115. Qiu A. and Bahr D.F. Modification of the mechanical properties of carbon nanotube arrays using electron irradiation induced oxidation // *Meccanica*. – Springer Nature (Switzerland), 2014. –Vol.50. –P.575–583.
116. Banhart F. Irradiation effects in carbon nanostructures // *Reports on Progress in Physics*. –IOP Publishing Ltd. (UK), 1999. –Vol.62. –No.8. –P.1181-1221.
117. Salvetat J.P., Bonard J.M., Thomson N.H., Kulik A.J., et al. Mechanical properties of carbon nanotubes // *Applied Physics A*. AIP Publishing LLC (USA), 1999. –Vol.69. –P.255-260.
118. Kiang C.H., Goddard W.A., Beyers R., Bethune D.S. Structural modification of single-layer carbon nanotubes with an electron beam // *The Journal of Physical Chemistry*. American Chemical Society Publications (USA), 1996. – Vol.100. –No.9. –P.3749-3752.
119. Smith B.W. and Luzzi D.E. Electron irradiation effects in single wall carbon nanotubes // *Journal of Applied Physics*. AIP Publishing LLC (USA), 2012. – Vol.90. –P.3509-3015.
120. Yang J.Q., Li X.J., Liu Ch.M., Ma G.L. and Gao F. Electron irradiation-induced change of structure and damage mechanisms in multi-walled carbon nanotubes // *Chinese Physics B*. –IOP Publishing Ltd. (UK), 2015. –Vol.24. – No.11 –P.116103.1-116103.5.

121. Banhart F., Li J.X. and Krasheninnikov A.V. Carbon nanotube under electron irradiation: Stability of the tubes and their action as pipes for atom transport // Journal of Physical Review B. –American Physical Society (USA), 2005. – Vol.71. –P.241408.1-241408.4.
122. Stahl J. Defect Characterization in High-Purity Silicon after γ - and Hadron Irradiation // Ph.D. thesis, University of Hamburg, DESY-THESIS-2004-028 (July 20004).
123. Yuldashova I.I., Tashmetov M.Yu. Single-walled carbon nanotube structure and radiation defects under the high energy electron beam // «Узбекский физический журнал» (Uzbekistan), 2021. –Vol.23. –No.2. –P.33–39.
124. Datsyuk V., et al. Chemical oxidation of multiwalled carbon nanotubes // Carbon. –Elsevier (Netherlands), 2008. –Vol.46. –P.833–840.
125. Yoom M., Han S., Kim G., Lee S.B. et al. Zipper mechanism of nanotube Fusion: Theory and Experiment // Physical Review Letters –American Physical Society (USA), 2004. –Vol.92. –No.7. –P.075504.1-31.
126. Раков Э.Г. Нанотрубки и фуллерены: Учебн. Пособие // – М.: Университетская книга, Логос, 2006. – 376 с.
127. Stone A.J., Wales, D.J. Theoretical studies of icosahedral C_{60} and some related structures // Chemical Physics Letters. –Elsevier (Netherlands), 1986. –Vol.28. –No.5–6. –P.501–503.
128. Brayfindley E., Irace E.E., Castro C., Karney W.L. Stone–Wales Rearrangements in Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: A Computational Study // The Journal of Organic Chemistry. American Chemical Society Publications (USA), 2015. –Vol.80. –No.8. –P.3825–3831.
129. Zhang K., Stocks G.M., Zhong J. Melting and premelting of carbon nanotubes // Nanotechnology. –IOP Publishing Ltd. (UK), 2007. –Vol.18. –No.28. – Pp.5.
130. Zhou L.G., Shi S.Q. Formation energy of Stone–Wales defects in carbon nanotubes // Applied Physics Letters. AIP Publishing LLC (USA), 2003. - Vol.83. –No.6. –P.1222-1225.

131. Lusk M.T., and Carr L.D. Nanoengineering Defect Structures on Graphene // Physical Review Letters –American Physical Society (USA), 2008. – Vol.100. –No.17. –P.175503.
132. Adda Y., Beyeler M., Brebec G. Radiation effects on solid state diffusion // Thin Solid Films. –Elsevier (Netherlands), 1975. –Vol.25. –No.1. –P.107–156.
133. Grudnitsky V.V., Smolyakova M.Yu., Nemchenko U.S., Beresnev V.M., Pogrebnjak A.D., Sobol' O.V., Kolesnikov D.A., Turbin P.V., Kaverin M.V. Physico-mechanical and tribological properties of nanocomposite coatings Zr-Ti-Si-N, Ti-Hf-Si-N // Problems of Atomic Science and Technology. – (Ukraine), 2011. –Vol.6. –P.179-183.
134. Комаров Ф.Ф., Константинов С.В., Стрельницкий В.Е., Пилько В.В. Влияние облучения ионами гелия на структуру, фазовую стабильность и микротвердость наноструктурированных покрытий TiN, TiAlN, TiAlYN // Журнал технической физики. – (Россия), 2016. –Том.86. –Вып.5. – С.57-63.
135. Андриевский Р.А. Влияние облучения на свойства наноматериалов // Физика металлов и металловедение. –(Россия), 2010. -Т. 110. -№ 3. -С. 243–254.
136. Pogrebnjak A.D., Shpak A.P., Beresnev V.M., Kolesnikov D.A., Kunitsky Yu.A., Sobol O.V., Uglov V.V., Komarov F.F., Shpylenko A.P., Demyanenko A.A., Baidak V.S., Grudnitskii V.V. Effect of Thermal Annealing in Vacuum and Air on Nanograin Sizes in Hard and Superhard Coatings Zr-Ti-Si-N // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – American Scientific Publishers (USA), 2012. –Vol. 12, –No.12. – P.9213-9219.
137. Kaoumi D., Motta A.T., and Birtcher R.C. A thermal spike model of grain growth under irradiation // Journal of Applied Physics. AIP Publishing LLC (USA), 2008. –Vol.104. –P.0735525.

138. Liu W.B., Zhang C., Ji Y.Z., Yang Z.G., Zang H., Shen T.L., and Chen L.Q. Irradiation-induced grain growth in nanocrystalline reduced activation ferrite/martensite steel // Applied Physics Letters. AIP Publishing LLC (USA), 2014. –Vol.105. –No.12. –P.121905.1-121905.4
139. Zhang H., Yao Z., Daymond M.R., Kirk M.A. Cavity morphology in a Ni based superalloy under heavy ion irradiation with hot pre-injected helium. II // Journal of Applied Physics. AIP Publishing LLC (USA), 2014. –Vol.115. –P.103509.1-103509.8
140. Ruffino F., Grimaldi M.G., Bongiorno C., Giannazzo F., Roccaforte F., et al. Normal and abnormal grain growth in nanostructured gold film // Journal of Applied Physics. AIP Publishing LLC (USA), 2009. –Vol.105. –P.054311.1-054311.6
141. Wang Y.B., Ho J.C., Liao X.Z., Li H.Q., Ringer S.P., and Zhu Y.T. Mechanism of grain growth during severe plastic deformation of a nanocrystalline Ni–Fe alloy // Applied Physics Letters. AIP Publishing LLC (USA), 2009. –Vol.94. –No.1. –P.011908.1-011908.3
142. Lu L., Tao N.R., Wang L.B., Ding B.Z., and Lu K. Grain growth and strain release in nanocrystalline copper // Journal of Applied Physics. AIP Publishing LLC (USA), 2001. –Vol.89. –No.11. –P.6408–6414.
143. Wang, P., Thompson, D.A., and Smeltzer, W.W. Implantation and Grain Growth in Ni Thin Films Induced by Bi and Ag Ions // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. –Elsevier (Netherlands), 1986. –Vol.16. –No.2-3. –P. 288–292.
144. Atwater, H.A., Thompson, C.V., and Smith, H.I. Ion-bombardment-enhanced Grain Growth in Germanium, Silicon, and Gold Thin Films // Journal of Applied Physics. AIP Publishing LLC (USA), 1988. –Vol.64. –P.2337.
145. Liu J.C., Li J., and Mayer J.W. Temperature Effect on Ion-irradiation-induced Grain Growth in Cu Thin Films // Journal of Applied Physics. AIP Publishing LLC (USA), 1990. –Vol.67. –No.5. –P.2354–2358.

146. Sun J., Bolse W., Lieb K.P., and Traverse A. Xenon ion induced atomic transport through aluminum-nitride interfaces // *Materials Science and Engineering A*. –Elsevier (Netherlands), 1995. –Vol.196. –No.1-2. –P.229–236.
147. Crespo-Sosa A., Schaaf P., Bolse W., Lieb K.P., Gimbel M., Geyer U., and Tosello C. Irradiation effects in Ag-Fe bilayers: Ion-beam mixing, recrystallization, and surface roughening // *Physical Review B*. –American Physical Society (USA), 1996. –Vol.53, -No.22. –P.14795-14805.
148. Юров В.М., Вертягина Е.Н., Гученко С.А., Хуанбай Е. Влияние ионного облучения на свойства наноструктурных покрытий Zn–Al и Fe–Al // *Современные наукоемкие технологии*. –(Россия), 2011. — № 5. — С. 63–68.
149. Xu H., Hu J., Ma Ch., Chai L. and Guo N. Influence of Electron Beam Irradiation on Surface Roughness of Commercially AISI 5140 Steel // *Materials Transactions*, –(Japan) 2017. –Vol.58. –No.11. –P.1519-1923.
150. Badzian A. The X-Ray Diffraction Method for Study of Growth Defects in CVD Diamond Single Crystals // *Advances in materials*. – Science Publishing Group (USA), 2018. –Vol. 7. –No.4. –P.89-104.
151. Mathevula L.E. Deep space radiations-like effects on VO₂ smart nano-coatings for heat management in small satellites // Submitted in accordance with requirements for the degree of Master of Science in the subject Physics at the University of South Africa. January 2014, p.90.
152. Axmedova G., Mamatqulov O.B., Xolbayev I. Atom fizikasi. O‘quv qo‘llanma // *O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta maxsus ta’lim vazirligi*. – (Toshkent: Istiqlol), 2013. –B.416.
153. Xidirov I. Qattiq jism fizikasi // *O‘quv qo‘llanma*. –(Toshkent), 2019. –B.388.
154. <https://qsstudy.com/chemistry/explain-braggs-spectrometer-method>
155. <https://scientificsentence.net/Equations/Quantum/index.php?key=yes&Integer=X-Rays>
156. www.malvernpanalytical.com/empyrean

157. Urabe H., Tominaga Y., Kubota K. Experimental evidence of collective vibrations in DNA double helix Raman spectroscopy // Journal of Chemical Physics. AIP Publishing LLC (USA), 1983. –Vol.78. –No.10. –P.5937–5939.
158. Kukura P., Mc Camant D.W., Mathies R.A. Femtosecond Stimulated Raman Spectroscopy // Annual Review of Physical Chemistry. – Annual Reviews (USA), 2007. – Vol.58. –No.1. –P.461–488.
159. Hammes G.G. Spectroscopy for the biological sciences // Wiley 2005. ISBN9780471733546. OCLC 850776164. –P.184
160. https://en.wikipedia.org/wiki/Raman_spectroscopy#/media/File:Raman_energy_levels.svg
161. Elliott A.B.S., Horvath R., Gordon K.C. Vibrational spectroscopy as a probe of molecule-based devices // Chemical Society Reviews. –Royal Society of Chemistry (UK), 2012. –Vol.41. No.5. –P.1929–1946.
162. Mc Creery R.L. Raman spectroscopy for chemical analysis. // –Wiley (USA), 2000. ISBN0471231878. OCLC5846398. –P.448.
163. [https://en.wikipedia.org/wiki/Raman_spectroscopy#/media/File:SetupRaman_Spectroscopy_adapted_from_Thomas_Schmid_and_Petra_Dariz_in_Heritage_2\(2\)_2019_1662-1683.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Raman_spectroscopy#/media/File:SetupRaman_Spectroscopy_adapted_from_Thomas_Schmid_and_Petra_Dariz_in_Heritage_2(2)_2019_1662-1683.png)
164. InVia Raman Renishaw manual. 2012 Renishaw LTD.
165. Stokes D.J. Principles and Practice of Variable Pressure Environmental Scanning Electron Microscopy (*VP-ESEM*) // Chichester: Wiley (USA), 2008. ISBN 978-0470758748. –P.234
166. Msmullan D. Scanning electron microscopy 1928–1965 // Scanning. – Hindawi (UK), 2006. -Vol.17. No.3. –P.175–185.
167. Msmullan D. Von Ardenne and the scanning electron microscope // Royal Microscopical Society. –(UK), 1988. -Vol.23. –P.283–288.
168. Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П., Джой Д., Фиори Ч., Лифшин Э. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: В 2-х книгах // Книга 1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 303 с.

169. https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_force_microscopy#/media/File:Atomic_force_microscope_block_diagram.svg
170. Nonnenmacher M., O'Boyle M.P. and Wickramasinghe H.K. Kelvin probe force microscopy // Applied Physics Letters. –AIP Publishing LLC (USA), 1991. –Vol.58. –No.25. –P.2921-2923.
171. Albrecht T.R., Grutter P., Horne H.K., and Rugar D. Frequency modulation detection using high-q cantilevers for enhanced force microscope sensitivity // Journal of Applied Physics. –AIP Publishing LLC (USA), 1991. –Vol.69. – No.2. –P.668–673.
172. Ташметов М.Ю., Исмаатов Н., Саидов Р.П., Махкамов Ш. Комплекс радиационной обработки на базе ускорителя электронов «Электроника У003» // Препринт ИЯФ АН РУз. – (Ташкент), 2016. - № Р-9-714. –С.28.
173. Холматов Р.Р., Исмаатов Н.Б., Ибрагимова И.И., Ташметов М.Ю., Саидов Р., Абдульманов Р.Г. Определение ток пучка и пространственного распределения плотности потока электронов ускорителя «Электроника У003» // «Физика фанининг бугунги ривожиди истеъдодли ёшларнинг ўрни»: Республика илмий-амалий конференцияси 27-28 апрель 2012. - Ташкент, 2012. – С.334-337.
174. Исмаатов Н.Б. Разработка технологий обработки медицинских, полимерных изделий и сырья фармацевтических препаратов на базе радиационно-технологического комплекса // Диссертация на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по техническим наукам. – Ташкент, ИЯФ АН РУз, 2018. -143с.
175. Hewat A., David W.I.F., Eijck L. Van. Hugo Rietveld (1932–2016) // Journal of Applied Crystallography, –Wiley-VCH (Germany), 2016. -Vol.49. -No.4 – P.1394–1395.
176. Кржижановская М.Г., Фирсова В.А., Бубнова Р.С. Применение метода Ритвельда для решения задач порошковой дифрактометрии // Учебное пособие. Санкт-Петербургский университет, 2016. – С.67.

177. Tomsen C. and Reich S. Raman Scattering in Carbon Nanotubes // Topics in Applied Physics. –Springer Nature (Switzerland), 2007, –Vol.108. –P.115-232.
178. Yuldashova I.I., Tashmetov M.Y. The influence of electron beams to structure parameters of multi walled carbon nanotube // Physica B: Condensed Matter. –Elsevier (Netherlands), 2019. –Vol.571. –P.280–284.
179. Jorio A. and Saito R. Raman spectroscopy for carbon nanotube application // Journal of Applied Physics. –AIP Publishing LLC (USA), 2021, –Vol.129. –P.021102.1-021102.27
180. Osswald S., Flahaut E., Ye H. Gogotsi Y. Elimination of D-band in Raman spectra of double-wall carbon nanotubes by oxidation. // Chemical Physics Letters. –Elsevier (Netherlands), 2005. –Vol.402. –P.422–427.
181. Theodore M., Hosur M., Thomas J. and Jeelani S. Influence of functionalization on properties of SWCNN–epoxy nanocomposites // Materials Science and Engineering A. –Elsevier (Netherlands), 2011. –Vol.528. –P.1192–1200.
182. Boutroy N., Pernel Y., Rius J.M., et al. Hydrogenated amorphous carbon film coating of PET bottles for gas diffusion barriers // Diamond and Related Materials. –Elsevier (Netherlands), 2006. –Vol.5. –No.4–8. –P.921–927.
183. Tan P., Zhang S.L., Yue K.T., et al. Comparative Raman study of carbon nanotubes prepared by D.C. arc discharge and catalytic methods // Journal of Raman Spectroscopy. –Wiley (USA), 1997. –Vol.28. –No.5. –P.369–372.
184. 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.8. –P.2150111.
185. 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. Namangan 2021. –P.84-86.
186. Young R.A. The Rietveld Method // New York: Oxford University Press Inc. 1996. –P.298.
 187. Tashmetov M.Yu., Yuldashova I.I., Nazarov X.T. Elektronlar bilan nurlantirilgan (TiHfTa)CN nanokompozitining strukturasi va kristallitlar o‘lchami // Preprint O‘zRes FA YFI. –Toshkent: O‘zRes FA YFI, 2022. –№ P-9-725. –18 b.
 188. Theivasanthi Th. and Alagar M. Titanium dioxide (TiO₂) Nanoparticles - XRD Analyses – An Insight // Chemical Physics. –Elsevier (Netherlands), 2013; JOURNAL CITATION: arXiv:1307.1091.
 189. Venkateswarlu K., Sandhyarani M., Nellaippan T.A., and Rameshbabu N. Estimation of Crystallite Size, Lattice Strain and Dislocation Density of Nanocrystalline Carbonate Substituted Hydroxyapatite by X-ray Peak Variance Analysis // Procedia Materials Science. –Elsevier (Netherlands), 2014. -Vol.5. –P. 212 – 221.
 190. Gomathi M., Rajkumar P.V., Prakasam A. Study of dislocation density (defects such as Ag vacancies and interstitials) of silver nanoparticles, green-synthesized using *Barleria cristata* leaf extract and the impact of defects on the antibacterial activity // Results in Physics. –Elsevier (Netherlands), 2018. –Vol.10. –P.858–864.
 191. Braic M., Balaceanu M., Vladescu A., Zoita C.N., Braic V. Study of (Zr,Ti)CN, (Zr,Hf)CN and (Zr,Nb)CN films prepared by reactive magnetron sputtering // Thin Solid Films. –Elsevier (Netherlands), 2011. –Vol.519. – No.12. –P.4092–4096.
 192. Chu C.L., Yu F.D., Lin P.H., Yin L.H., Pu Y.P. and Chu P.K. Microstructure and properties of ZrTiC(N) composite films on NiTi alloy // Surfase Engineering. – (), 2014. -Vol.30. –No.11. –P.860-865.
 193. Braic V., Braic M., Balaceanu M., Vladescu A., Zoita C.N., Titorencu I., Jinga V. (Zr, Ti) CN coatings as potential candidates for biomedical

- applications // *Surface and Coatings Technology*. –Elsevier (Netherlands), 2011. –Vol.206. - No.4. –P.604–609.
194. Khvatinskaya D.Ya., Tashmetov M.Yu., Em V.T. Short-range order in Ti-Ta-C alloys // *Neorganicheskie Materialy*. – (Moscow), 1997. –Vol. 33. –No.3. – P.320-323.
195. Liu J.C., Mayer J.W. Ion irradiation induced grain growth in Ni polycrystalline thin films // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. –Elsevier (Netherlands), 1987. –Vol.19-20. –No.2. –P.538–542.
196. Alexander D.E., Was G.S. Thermal-spike treatment of ion-induced grain growth: Theory and experimental comparison // *Physical Review B*, – American Physical Society (USA), 1993. –Vol.47. –No.6. –P.2983–2994.
197. Козлова, О. Г. Рост и морфология кристаллов // под ред. Н. В. Белова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. – 357 с.
198. Liua X.Y., Maiwa K., Tsukamoto K. Heterogeneous two-dimensional nucleation and growth kinetics // *The Journal of Chemical Physics*, –AIP Publishing LLC (USA), 1997. –Vol. 106, No. 5, pp.1870-1879.
199. Martins P.M., Rocha F. Characterization of crystal growth using a spiral nucleation model // *Surface Science* –Elsevier (Netherlands), 2007. –Vol. 601, pp.3400–3408.

SHARTLI BELGILAR, O'LCHOV BIRLIKLARI, SIMVOL VA TERMINLAR RO'YXATI

eV – elektron volt;	XRD – rentgen difraktometriya;
elektron/sm ² – elektronlar flyuensi;	θ – Bregg burchagi;
ion/sm ² – ionlar flyuensi;	RBM – radial nafas olish rejimi;
ph/sm ² – protonlar flyuensi;	d_t – nanonaycha diametri;
nc/sm ² – neytronlar flyuensi;	K – Kelvin;
Å – angestrem;	V – volt;
nm – nanometer;	A – amper;
UNN – uglerodli nanonaycha;	Vt – vatt;
BDUNN – bir devorli uglerodli nanonaycha;	rad – radian;
IDUNN – ikki devorli uglerodli nanonaycha;	min – minut;
KDUNN – ko‘p devorli uglerodli nanonaycha;	λ_0 – to‘lqin uzunligi;
k – o‘lchamsiz shakl faktori;	$\tilde{\nu}$ – chastota;
β – yarim balandlikning to‘liq kengligi;	D – nanokristallitlar o‘lchami;
SEM – skanerlovchi elektron mikroskop;	ϵ – mikrozo‘riqish;
	δ – dislokatsiyalar zichligi
	EDS – energiyaviy dispersiya spektri;
	AKM – atom kuch mikroskop;