

**AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI**

*Əlyazması hüququnda*

**3C-SiC NANOKRİSTALINDA NEYTRON SELİNİN  
TƏSİRİ İLƏ BAŞ VERƏN RADİOAKTİV ÇEVİRİLMƏLƏR  
VƏ ONLARIN ELEKTRON PROSESLƏRİNƏ TƏSİRİ**

İxtisas: 2225.01. Radiasiya materialşünaslığı

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Elçin Məmmədəli oğlu Hüseynov**

Elmlər doktoru elmi dərəcəsi  
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

**AVTOREFERATI**

**Bakı – 2021**

Dissertasiya işi Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Radiasiya Problemləri İnstitutunda yerinə yetirilmişdir.

Rəsmi opponetlər: fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor  
**Oqtay Bahadır oğlu Tağıyev**

fizika elmləri doktoru, professor  
**Adil Polad oğlu Abdullayev**

fizika elmləri doktoru, professor  
**Mirteymur Mirkazım oğlu Mirabutahbov**

fizika elmləri doktoru, dosent  
**Nüşabə Nübarək qızı Hacıyeva**

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının AMEA Radiasiya Problemləri İnstitutu nəzdində fəaliyyət göstərən BED 1.21 Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının sədri:

AMEA-nın müxbir üzvi,  
fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor  
**Oqtay Əbil oğlu Səmədov**

Dissertasiya şurasının elmi katibi:

fizika üzrə fəlsəfə doktoru  
**Müslüm Əhməd oğlu Məmmədov**

Elmi seminarın sədri:

fizika elmləri doktoru, dosent  
**Mətanət Əhməd qızı Mehrabova**

## İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

**Mövzunun aktuallığı.** Son zamanlar mikro və nano elektronikada yeni materialların alınması və ya mövcud materialların yenidən işlənməsi dünya tədqiqatçılarının diqqət mərkəzindədir. SiC fiziki və kimyəvi xassələrinə görə elektronikada geniş tətbiq oluna bilən mükəmməl materialdır. Yüksək temperatura davamlılığı, qüsursuz strukturu, mexaniki davamlılığı, aşağı oksidləşmə qabiliyyəti SiC – in tətbiq potensialını artırır. Heyrətamiz mexaniki və funksional xassələrinin kombinasiyası SiC – in müasir mikro və nano elektronikada yarımkeçirici kimi geniş tətbiqinin əsasıdır. Silisium karbidi təşkil edən Si və C atomları müxtəlif modifikasiyalarda formalaşaraq 200 – dən artıq politip yaradır. Mükəmməl mexaniki və kimyəvi davamlılığının əsas səbəbi mövcud politiplərin əksəriyyətində atomlararası məsafənin az olmasıdır. Əlavə olaraq, silisium karbid, politipindən asılı olaraq (2,4eV – 3,2eV) geniş qadağan olunmuş zolaq eninə malik yarımkeçiricidir. SiC fərqli politiplərdə amorf, polikristallik və ya monokristallik hallarda formalaşa bilər. Silisium karbidin politipləri içərisində ən geniş tətbiq olunanları kubik (3C-SiC) və heksaqonal (4H-SiC və 6H-SiC) modifikasiyalı birləşmələridir. Multifunksional xassələrə malik olan nanokristallik 3C-SiC nanoelektronik qurğularda geniş istifadə imkanına malikdir. Məhz bu səbəbdən təqdim olunan işdə bütün eksperimentlərdə kubik modifikasiyalı nano 3C-SiC (həmçinin  $\beta$ -SiC kimi də tanınır) hissəciklərindən istifadə olunmuşdur.

Materiallar nano ölçülərdə çox böyük xüsusi səth sahəsinə (Specific Surface Area - SSA) malik olduqları üçün fərqli fiziki xüsusiyyətlərə malik olurlar. Nano ölçülərdə digər materiallarda olduğu kimi, silisium karbidin də özünəməxsus funksional və yeni fərqli fiziki xassələri mövcuddur. Nanomateriallarda xüsusi səth sahəsinin böyük olması səthdə baş verən fiziki proseslərdə və xüsusən də elektrofiziki proseslərdə kəskin fərqi yaranmasına səbəb ola bilər.

Hal – hazırda dünyada ən aktual problemlərdən biri, nano ölçülərdə materialların fiziki xassələrinin idarə edilməsi və ya dəyişdirilməsindən ibarətdir. Bu istiqamətdə tədqiqatçılar tərəfindən

müxtəlif yanaşmalar olsa da, neytron seli ilə silisium karbid nanokristallarında mümkün dəyişikliyin yaranması öyrənilməmişdir. Bu yanaşmada, təqdim olunan dissertasiyanın məzmunu nanokristallik 3C-SiC hissəciklərini neytron seli ilə aşqarlamaqdan ibarətdir. Belə ki, nanomateriallar çox kiçik ölçülü və həssas olduğundan onların aşqarlanması üçün neytron selindən istifadə mükəmməl vasitədir. Neytron seli ilə materialların aşqarlanması günümüzə qədər dünyanın ən dəqiq və həssas aşqarlanma üsulu hesab edilir. İşdə əsas məqsədlərdən biri mikro və nanoelektronikada çox geniş tətbiq sahəsinə malik nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin fiziki xassələrini neytron seli ilə idarə etmək və ya mümkün dəyişikliklər yaratmaqdır. Neytronlarla modifikasiya olunmuş nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində yeni və fərqli tip əlavə aşqar elementlər yarana bilər. Təbii halda nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində mövcud silisiumun 92.23% - i  $^{28}\text{Si}$ , 4.67% -  $^{29}\text{Si}$  və 3.1% - i  $^{30}\text{Si}$  izotopunun payına düşür. Sadalanan silisium izotoplarının hər üçü stabil izotopdur və heç bir radioaktiv çevrilməyə məruz qalmır. Lakin, neytronla şüalanma zamanı,  $^{30}\text{Si}$  izotopu bir neytron zəbt edərək  $^{31}\text{Si}$  radioaktiv izotopuna çevrilir.  $^{31}\text{Si}$  izotopu isə 157.36 dəq yarımparçalanma müddətinə malik  $\beta$  aktiv izotopdur.  $\beta$  parçalanma nəticəsində  $^{31}\text{Si}$  izotopu  $^{31}\text{P}$  izotopuna çevrilir və  $^{31}\text{P}$  izotopu 3C-SiC nanomaterialında n-tip aşqar yaradır.

Neytronlarla şüalanma müddətinə mütənasib olaraq  $^{31}\text{P}$  izotopunun konsentrasiyasının artması və ya azaldılması nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin fiziki xassələrinin dəyişməsinə səbəb olur. Qeyd edək ki, çox aşağı ehtimalla ikinci nüvə reaksiyası baş verə bilər.  $^{31}\text{P}$  izotopu bir neytron zəbt edərək  $^{32}\text{P}$  izotopuna çevrilə bilər.  $^{32}\text{P}$  izotopu isə 14 gün yarımparçalanma müddətinə malik  $\beta$  aktiv izotopdur ki, bu da stabil  $^{32}\text{S}$  izotopuna çevrilir. Bunu qeyd etmək önəmlidir ki,  $^{32}\text{S}$  izotopunun yaranma ehtimalı çox aşağıdır və miqdarı birbaşa  $^{31}\text{P}$  izotopunun konsentrasiyasından asılıdır. Anoloji yanaşma ilə nanokristallik 3C-SiC hissəciklərini  $^{14}\text{N}$  izotopları ilə də aşqarlamaq olar. Lakin bu proses bir qədər mürəkkəbdir və aşağı effektivliyə malikdir. Bu səbəbdən, təqdim olunan işdə nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin sadəcə  $^{31}\text{P}$  izotopları ilə aşqarlanması və fiziki xassələrinin idarə edilməsi

proseslərinə baxılmışdır.

Dissertasiya işində aparılan bütün təcrübələr AMEA – nın Radiasiya Problemləri İnstitutu və Sloveniyanın Jozef Stefan İnstitutunun müxtəlif mərkəzləri və laboratoriyalarında yerinə yetirilmişdir. Neytron mənbə kimi Jozef Stefan İnstitutunun “Reaktor Mərkəzində” TRIGA Mark II yüngül su tipli tədqiqat nüvə reaktoru istifadə edilmişdir.

**Dissertasiya işinin məqsədi** – Neytron selinin təsiri ilə 3C-SiC nanokristallarının fiziki xassələrini məqsədyönlü dəyişmək, müxtəlif spektroskopik yanaşmalarla baş verən dəyişiklikləri araşdırmaq, nanomaterial daxilində mümkün nüvə çevrilmələrini öyrənmək, neytron transmutasiya üsulu ilə nanokristalı aşqaralamaq və aşqarlanmış nanokristalın fiziki xüsusiyyətlərinin dəyişmə mexanizmlərinin təyininəndən ibarətdir.

**Bu məqsədə nail olmaq üçün aşağıdakı məsələlərin həlli qarşıya qoyulmuşdur:**

- Neytron selinin təsiri altında nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində mümkün radioaktiv çevrilmələr və yeni izotopların  $k_0$ -INAA metodu ilə öyrənilməsi
- 3C-SiC nanokristallarının quruluşuna neytron selinin təsirinə SAED, EDP və rentgenfaza üsulu ilə tədqiqi
- Nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin ölçü və səth morfologiyasının HRTEM, TEM, FESEM və SEM üsulları ilə analizi
- Neytron seli ilə 3C-SiC nanokristallarının qarşılıqlı təsirinə ümumi halda modelləşdirilməsi və effektiv neytron enerjisinin öyrənilməsi
- 3C-SiC nanokristallarında radiasiya səbəbindən keçiriciliyin (RIC) araşdırılması
- 3C-SiC nanokristallarının elektrik keçiriciliyi, onun temperatur və tezlik asılılıqlarına neytron çevrilmələrinə təsirinə öyrənilməsi
- Nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində defektmələgəlmə və yaranmış yeni aşqar elementlərin konsentrasiyasının EPR üsulu ilə araşdırılması
- 3C-SiC nanokristallarının dielektrik xüsusiyyətlərinə neytron selinin təsir müddətinə funksiyası kimi tədqiqi

- Neytronlarla aşqarlanmanın impedans spektroskopiyası ilə araşdırılması və 3C-SiC nanokristallarının impedans spektrlərinin qarşılıqlı təhlili

- 3C-SiC nanokristallarının termik parametrlərində neytronlarla şüalanma effektlərinin tədqiqi

**Tədqiqat obyektı** olaraq  $120 \text{ m}^2/\text{q}$  xüsusi səth sahəsinə,  $18 \text{ nm}$  ölçülü hissəciklərə və  $0.03 \text{ q}/\text{sm}^3$  (həqiqi sıxlıq  $3.216 \text{ q}/\text{sm}^3$ ) sıxlığa malik kubik modifikasiyalı nanokristallik silisium karbid (3C-SiC) hissəcikləri istifadə edilmişdir.

**Tədqiqat metodları:** Tədqiqat işində məqsədə nail olmaq üçün fərqli yanaşmalarla bir neçə tədqiqat metodu və üsullarından istifadə edilmişdir. Tədqiqat işində neytron mənbə kimi TRIGA Mark II tipli tədqiqat nüvə reaktorundan və şüalandırma zamanı standart üsullardan istifadə edilmişdir. Nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində mümkün radioaktiv çevrilmələr və yeni izotopların təyin edilməsi məqsədilə  $k_0$ -INAA metodundan istifadə edilmişdir. Neytron seli ilə şüalandırmadan öncə 3C-SiC nanokristallarının neytronlarla qarşılıqlı təsirinə kompüter modelləşdirilməsi aparılmışdır. 3C-SiC nanokristallarının strukturunu, radiasiya defektlərini, digər ionlaşdırıcı şüalanma effektlərini öyrənmək üçün HRTEM, TEM, FESEM, SAED, EDP və SEM metodları tətbiq edilmişdir. Eyni zamanda nanomaterialın termik xassələrini öyrənmək üçün DSC, DTA, TGA və TG üsulları istifadə olunmuşdur. Həmçinin 3C-SiC nanokristallarının elektrik və dielektrik xassələrinin öyrənilməsi üçün impedans spektroskopiyası üsulu tətbiq edilmişdir. 3C-SiC nanokristallarının volt – amper (V – A) xarakteristikaları standart üsulla öyrənilmişdir. SiC nanokristalları daxilində yaranan defekt və paramaqnit mərkəzlərin öyrənilməsi məqsədilə EPR spektrometrindən istifadə olunmuşdur.

**İşin elmi yenilikləri aşağıdakılardan ibarətdir:** Tədqiqat olunan dissertasiya işində ilk dəfə olaraq:

- 3C-SiC nanokristallarında neytron çevrilmələri tapılmış və nanokristallik 3C-SiC hissəcikləri daxilində neytron transmutasiyası üsulu ilə n – tip aşqarlar alınmışdır

- Neytron seli ilə şüalanma nəticəsində nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində maksimum 70-80 nm tərtibində aqloremasiyanın



- olması HRTEM, TEM, FESEM və SEM analizləri ilə göstərilmişdir
- Neytron şüalanmadan sonra nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin səthində qalınlığı təqribən 3nm olan amorf təbəqə müəyyən edilmişdir
  - HRTEM analizləri ilə 3C-SiC hissəciklərinin nanokristallik təbiəti təsdiqlənmiş və neytronlarla şüalanmadan sonra nanomaterialda yaranan defektlər və ya klasterlər “ləkələr” kimi müəyyən edilmişdir
  - EDP, SAED və rentgenstruktur analizlərindən nanokristallik 3C-SiC polipinin qəfəs parametrləri (1 1 1), (2 0 0), (2 2 0), (3 1 1), (2 2 2),  $a=b=c=4,377565$  və  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$  kimi təyin olunmuşdur
  - Kompüter modelləşməsi ilə  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$  və  $^{30}\text{Si}$  izotoplarının udulma spektrlərində müşahidə olunan rezonans hallarının minimal enerjisi uyğun olaraq  $5 \cdot 10^{-2}$  MeV,  $10^{-2}$  MeV və  $10^{-3}$  MeV kimi tapılmışdır
  - Neytron seli ilə şüalanma zamanı 3C-SiC nanokristallarında RIC keçiriciliyi müəyyən olunmuşdur
  - Neytronlarla n – tip aşqarlanma nəticəsində 3C-SiC nanokristallarında elektrik keçiriciliyinin ədədi qiymətinin  $7.5 \times 10^4$  S/m-ə qədər və ya təqribən 5.5 dəfə artması göstərilmişdir
  - İmpedans spektroskopiyasından tezliyin 0.1MHz, 1MHz və 2.5MHz qiymətlərinə uyğun olaraq  $T_{MS} = 250\text{K}$ ,  $325\text{K}$  və  $370\text{K}$  temperaturalarda 3C-SiC nanokristallarında metal-yarımkeçirici keçidi tapılmışdır
  - 3C-SiC nanokristallarının müqavimətinin neytronlarla şüalanmadan sonra təqribən 4 MΩ-dan 1 MΩ-a qədər azalması göstərilmişdir
  - Neytronlarla şüalanmadan sonra g – faktorun fərqli qiymətlərində paramaqnit mərkəzlərin ümumi sayının  $1.5 \times 10^{20}$  mərkəz/q – dan  $2.7 \times 10^{20}$  mərkəz/q – a qədər (təqribən iki dəfə) artması göstərilmişdir
  - 3C-SiC nanokristallarının neytronlarla şüalanma müddətinin artması nəticəsində sərbəst elektronlara uyğun mərkəzlərin, başqa sözlə n – tip aşqarların konsentrasiyasının təqribən  $0.7 \times 10^{16}$  qədər olması müəyyən edilmişdir
  - 3C-SiC nanokristallarında Debay temperaturunun

nanomateriallar üçün xarakterik olaraq 1200K – dən 800K - ə qədər azalması göstərilmişdir

- Neytron seli ilə modifikasiya olunmuş nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin xüsusi istilik tutumu, istilik axını, oksidləşmə reaksiya sürəti, aktivləşmə enerjisi, Gibbs enerjisi entalpiya və entropiyası müəyyən edilmişdir

#### **İşin praktiki əhəmiyyəti:**

Dissertasiya işində alınmış əsas elmi nəticələrə uyğun olaraq demək olar ki, nanokristallik 3C-SiC hissəcikləri neytron seli ilə kristallik struktura təsir etmədən n – tip aşqarlanaraq müxtəlif mühitlərdə mükəmməl material kimi nanoelektronikada tətbiq oluna bilər. Eyni zamanda dissertasiyada göstərilmişdir ki, neytron seli ilə modifikasiya olunaraq 3C-SiC nanokristallarının bəzi fiziki xüsusiyyətləri idarə oluna bilər ki, bu da həmin materialın elektronikada tətbiq imkanlarını artırır. Ümumi yanaşmada nanomaterialların fiziki xassələrinin idarə edilməsi çox mürəkkəb və önəmli məsələdir. Aparılan təcrübələr göstərmişdir ki, neytron selinin təsir müddəti ilə nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində yaranan aşqarların konsentrasiyasını idarə etmək olar. Yeni yaranmış aşqar elementlərin konsentrasiyasının dəyişməsi, birbaşa nanomaterialın fiziki xassələrinin dəyişməsinə səbəb olur. Dissertasiya işindən alınan nəticələr, radiasiya materialşünaslığı, nüvə fizikası, nanostruktur və yarımkeçiricilər fizikası sahələrinin kombinasiyası çərçivəsində multidissiplinar şəkildə tətbiq edilə bilər. İşdə, neytron seli ilə modifikasiya olunaraq fərqli xüsusiyyətlərə malik yeni tip nanokristallik 3C-SiC materialı alınmışdır. Alınmış yeni material ilə mikroelektronika əsaslı avadanlıqların nanohissələrinin və ya nanoelektronika qurğularının faydalı iş əmsalının və ya istismar müddətinin uzadılması mümkündür. Eyni zamanda alınmış yeni və mükəmməl xüsusiyyətlərə malik nanomaterial iqtisadi cəhətdən daha əlverişlidir. Digər tərəfdən, nanomaterialın fiziki xassələrinin idarə olunması digər alternativ materialların bu materiallarla əvəz olunmasına imkan verəcək. Ümumi yanaşmada, neytron transmutasiyası nəticəsində alınmış yeni xüsusiyyətli 3C-SiC nanokristalları mikroelektronika, nanoelektronika, mikroelektromexaniki sistemlər (MEMS),



nanoelektromexaniki sistemlər (NEMS) və ionlaşdırıcı mühitlər (peyk (fəza) texnologiyalarında, nüvə texnologiyalarında və s.) kimi bir sıra sahələrdə geniş tətbiq potensialına malikdir.

**Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:**

- Nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində mümkün nüvə çevrilmələri
- Neytron selinin 3C-SiC nanokristallarında yaratdığı struktur dəyişiklikləri
- 3C-SiC nanokristallarında qarşılıqlı təsir zamanı effektiv neytron enerjisinin qiymətləndirilməsi
- Nanokristallik 3C-SiC hissəciklərin səth morfologiyası, materialın nanokristallik təbiəti, aqloremasiya və amorflaşma dərəcəsi
- Neytron seli ilə 3C-SiC nanokristallarının fərqli konsentrasiyalarda n – tip aşqarlanması
- 3C-SiC nanokristallarında radiasiya səbəbindən keçiricilik (RIC)
- 3C-SiC nanokristallarının elektrik və dielektrik xassələrində neytronlarla çevrilmə effektləri
- Neytron selinin təsiri altında nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində defektəmələgəlmə prosesləri
- Neytron selinin təsiri altında 3C-SiC nanokristallarında relaksasiya müddəti və metal-yarımkəçirici keçidi
- Neytronlarla şüalanmanın 3C-SiC nanokristallarının termik parametrlərinə təsiri

**İşin aprobasiyası:**

Dissertasiya işinin ayrı-ayrı nəticələri bir neçə beynəlxalq və ölkədaxili konfranslarda məruzə olunaraq müzakirə edilmişdir. İşdə alınmış nəticələr beynəlxalq, ölkədaxili və digər konfranslarda aşağıda qeyd olunan məruzələrlə müxtəlif illərdə müzakirə edilmişdir.

- XXVII International Materials Research Congress, F2. Advances in functional semiconducting materials - IMRC 2018, 2879-2880, August 19-24, 2018, Cancun, Mexico
- Ümummilli lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 95-ci ildönümünə həsr olunmuş Gənc Tədqiqatçıların II Beynəlxalq Elmi

- Konfransı, 67-69, 27-28 Aprel 2018, Bakı, Azərbaycan
- DPG-Frühjahrstagung und EPS-CMD27, Technische Universität Berlin, Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V., 137/188, O 81.17, 11 - 16 March 2018, Berlin, Germany
  - 27th International Conference Nuclear Energy for New Europe, 95-96/148, September 10 – 13, 2018, Portoroz, Slovenia
  - 2nd International congress on semiconductor materials and devices, 120/121, 28-30 Aug, 2018 Ardahan-Turkey
  - VIII International Conference, Semipalatinsk Test Site: Legacy and Prospects for Scientific and Technical Potential Development, 161-162/174, 11–13 Sep 2018, Kurchatov, Republic of Kazakhstan
  - International scientific conference of students and young scientists "Lomonosov-2018", Moscow, 2018, p. 34.14.1-3
  - XXI Simposio Chileno de Física Antofagasta, SOCHIFI, Area H: Materia Condensada Fis. Estado Solido, Chile, 2018,p.SPH04.1-2
  - 11th International Conference «Nuclear and radiation physics» 374/450, September 12-15, 2017, Almaty, Republic of Kazakhstan
  - 26th International Conference Nuclear Energy for New Europe 302-55/197, September 4-7, 2017, Slovenia
  - I International scientific conference of young researchers, Baku Engineering University, May 05-06, 2017, Baku, Azerbaijan
  - 25th International Conference Nuclear Energy for New Europe, 602, 42-43, Sep 5-8, 2016, Slovenia

#### **Nəşrlər:**

Dissertasiya işinin əsas mahiyyəti dünyanın nüfuzlu jurnallarında nəşr edilmiş 12 məqalə və 7 tezisdə, həmçinin ölkədaxili nəşr edilmiş 11 məqalə və 5 tezisdə öz əksini tapmışdır. Dissertasiya işinin əsas nəticələri 23 məqalə və 12 tezis olmaqla ümumilikdə 35 elmi əsərdə dərc edilmişdir.

#### **Dissertasiya işinin quruluşu və həcmi.**

Dissertasiya işi girişdən, yeddi fəsildən, nəticədən və ədəbiyyat siyahısından ibarətdir. Təqdim olunan dissertasiya işində 122 şəkildən, 7 cədvəldən və ümumilikdə 397210 işarədən istifadə edilmişdir.

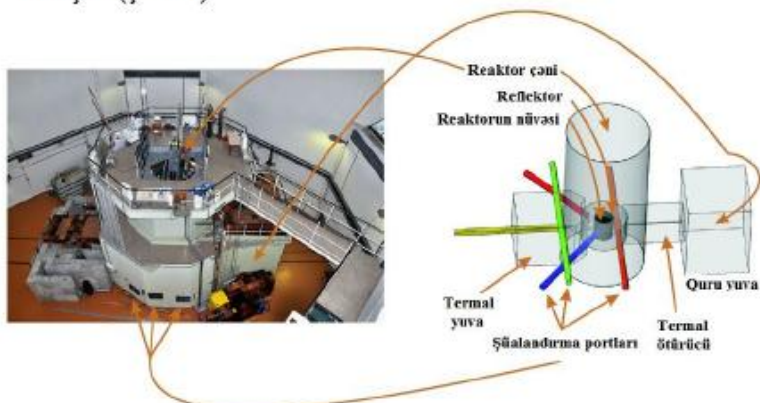
## İŞİN QISA MƏZMUNU

Giriş hissəsində dissertasiya işinin mövzusunun aktuallığı, hansı yeniliklərə malik olması, praktiki əhəmiyyəti və həmçinin, müdafiə olunacaq işin əsas müddəaları əsaslandırılmışdır.

Birinci fəsilə nanokristallik SiC hissəciklərinin bəzi fiziki xassələri, müxtəlif politiplərin özünəməxsus xüsusiyyətləri, nano ölçülərdə kristallik materialların alınma texnologiyaları və silisium karbid birləşmələrinin ionlaşdırıcı mühitdə tətbiq imkanları haqqında dərc olunmuş elmi ədəbiyyatların icmalı verilmişdir. Digər nanomateriallara oxşar olaraq silisium karbidin də nano ölçülərdə fiziki xassələrinin makro ölçülərlə müqayisədə bir qədər fərqli olması araşdırılmışdır. Eyni zamanda, bu fəsilə ümumi yanaşmada silisium karbidin müxtəlif politipləri içərisində daha geniş yayılanları və heyətamiz tətbiq imkanlarına malik olanları haqqında ümumiləşdirici məlumat verilmişdir. Həmçinin, dissertasiyada tədqiqat obyektii olaraq seçilmiş 3C-SiC politipi də daxil olmaqla bir neçə politipin kristallik fəza quruluşu müqayisəli analiz edilmişdir. Müxtəlif politiplərdə atomların düzülüşü, nano ölçülərdə mümkün qaçılmaz defektlər və digər krsitallik xüsusiyyətlər ədəbiyyatlarda məlum yanaşmalara uyğun şərh edilmişdir. Digər tərəfdən, nano ölçülərdə hissəcik səthinin mümkün modifikasiyaları və nanohissəcik səthində gedən bəzi proseslər ətraflı izah edilmişdir. Ümumi yanaşmada silisium karbidin ionlaşdırıcı mühitlərdə tətbiq imkanları və ionlaşdırıcı şüalanma effektləri analiz edilmişdir. Müxtəlif temperaturlarda kosmik fəzada, nüvə reaktorlarında və eləcə də digər ionlaşdırıcı mühitlərdə istifadəsi zamanı silisium karbiddə radiasiya səbəbindən mümkün mexaniki dəyişikliklər ədəbiyyatlarda olan məlumatlarla izah edilmişdir. Bu fəslin sonunda, ədəbiyyat xülasəsində aparılan müzakirələrin nəticələrinə uyğun olaraq dissertasiya işinin mövzusu əsaslandırılmışdır.

İkinci fəsilə nanokristallik SiC hissəciklərinin neytron seli ilə modifikasiya olunma üsulları, HRTEM, TEM, FESEM, SEM, SAED, EDP, EPR, elektrik və dielektrik xassələrinin öyrənilmə metodikaları və qurğuları nəzərdən keçirilmişdir. Təcrübələrdə neytron mənbəsi kimi istifadə olunan Jozef Stefan İnstitutunun (JSI)

TRİGA Mark II tipli tədqiqat nüvə reaktorunun strukturu və şüalandırılma metodikaları şərh edilmişdir. Təcrübələr aparılan reaktorun maksimal gücü 250kVt – dir və nüvəsi diametri 2 m və hündürlüyü 6.25 m olan alüminium silindir çən daxilində yerləşir. Neytron mənbə kimi istifadə olunan TRİGA Mark II tipli tədqiqat nüvə reaktorunun nüvəsi dairəvi konfigurasiyaya malikdir. Belə ki, reaktor nüvəsi mərkəzdən başlayaraq cəmi altı konsentrik halqalardan təşkil olunmuşdur. Ümumilikdə JSİ TRİGA Mark II reaktorunun daxilində 91 mümkün vəziyyət mövcuddur ki, bu da neytron mənbəsinin yerləşdirilməsi, idarə çubuqları, şüalandırma kanalları və sair müxtəlif məqsədlər üçün istifadə edilir. Təcrübələr aparılan mərkəzi kanalda (kanal A1) tam güc rejimində neytron selinin sıxlığı  $2 \times 10^{13}$  n/sm<sup>2</sup>san kimidir. Ümumi yanaşmada reaktorun fotoşəkili və bəzi hissələrinin sxematik təsviri şəkildə verilmişdir (Şəkil 1).



Şəkil 1. JSİ TRİGA Mark II reaktorunun üstədən fotoşəkili və sxematik təsviri.

Neytron selinin təsiri nəticəsində nanomaterialın aktivliyi təqribən 3GBq - ə qədər artmışdır ki, bunu da yaradan səbəblər araşdırılmışdır. 3C-SiC nanokristallarının təmizlik dərəcəsi və qatışıq elementlərinin tərkibini öyrənmək məqsədi ilə aparılan  $k_0$  əsaslı instrumental neytron aktivləşmə analizləri ( $k_0$ -INAA) metodikası bu



fəsilə ətraflı izah edilmişdir.

Tədqiq olunan dissertasiya işində bütün nümunələr mərkəzi kanalda neytron seli ilə şüalandırılmışdır. JSİ TRİGA Mark II reaktorunun mərkəzi kanalı (Central Channel - CC) alüminium boru ilə əhatə olunmuşdur. Qeyd etmək yerinə düşərdi ki, mərkəzi kanalda tam güc rejmində mövcud neytron selinin parametrləri termal neytronlar üçün  $5.107 \times 10^{12}$  n/sm<sup>2</sup>san ( $1 \pm 0.0008$ ,  $E_n < 625$ eV), epitermal neytronlar üçün  $6.502 \times 10^{12}$  n/sm<sup>2</sup>san ( $1 \pm 0.0008$ ,  $E_n \sim 625$ eV  $\div 0.1$ MeV), sürətli neytronlar üçün  $7.585 \times 10^{12}$  n/sm<sup>2</sup>san ( $1 \pm 0.0007$ ,  $E_n > 0.1$  MeV) və nəhayət bütün neytronlar üçün mərkəzi kanalda sel sıxlığı  $1.920 \times 10^{13}$  n/sm<sup>2</sup>san ( $1 \pm 0.0005$ ) kimidir. Digər şüalandırma kanalları da, mərkəzi kanal ətrafında F15, F19, F22, F24 və F26 nömrələri ilə yerləşdirilmişdir. Bundan əlavə D8, E10 və E11 vəziyyətarində üçbucaq şüalandırma kanalı yerləşdirilmişdir. Belə ki, üçbucaq şüalandırma kanalı ölçüləri nisbətən böyük olan materialları şüalandırmaq üçün nəzərdə tutulmuşdur. Bunlardan əlavə reaktor daxilində neytron selinin sıxlığını mütəmadi öyrənmək və nəzarətdə saxlanmaq məqsədilə daxili diametri 8mm ilə 10mm aralığında dəyişən bir neçə ölçü yuvaları mövcuddur. Belə ki, neytron selinin sıxlığı və enerjisi mütəmadi olaraq ölçülür və nəzarətdə saxlanılır. JSİ TRİGA Mark II reaktorunun nüvəsini ətrafı qrafit reflektor ilə əhatə edilmişdir. Qrafit reflektor üzərində tangensial və radial şüa borusu üçün iki hissədə yuva mövcuddur. Hər iki şüa borusu qarşı qarşıya olmaqla “termal yuva” və “termal quru yuva” kimi iki şüalandırma hissəsinə xidmət edir. Qeyd edək ki, hər iki boruda yalnız termal neytronlar mövcud olur və fiziki ölçüləri daha böyük olan obyektlərin şüalandırılması üçün nəzərdə tutulmuşdur.

Qeyd etmək lazımdır ki, neytron seli ilə şüalandırma təhlükəsizlik məqsədilə avtomatik ötürmə sisteminin köməyi ilə aparılmışdır. Məlumdur ki, neytron seli ilə modifikasiya olunan zaman nümunənin tipindən asılı olaraq müəyyən aktivliyə malik olur və onun yaxınlığında işləmək və ya şüalanmış nümunə ilə dərhal sonra təmasda olmaq sağlamlıq üçün təhlükəlidir. Nümunə ilə, şüalanmadan dərhal sonra təmasda olmamaq məqsədilə avtomatik şüalandırma robotlarından istifadə olunur. Belə ki, şüalandırılacaq

nümunə avtomatik ötürmə robotunun yuvasına yerləşdirilir və uzaqdan idarə edilərk reaktor kanalına endirilir. Şüalanma müddəti tamamlandıqdan sonra nümunələr sözügedən robotun köməkliyi ilə, rektorun kanalından uzaqlaşdırılır və aktivliyi daima nəzarətdə saxlanılır. 3C-SiC nanokristalları şüalanmadan sonra xüsusi plastik qablarda yerləşdirilmişdir. Aktivlik yalnız yol verilən həddən aşağı olduqdan sonra onlara yaxınlaşmaq olar və onları isti sahədən (hot area) harasa daşmaq olar, bir şərtlə ki, isti ərazini tərk etməyəsən. Ümumiyyətlə nümunə üzərində hər hansı digər təcrübənin aparılması məqsədilə onun isti ərazidən çıxarılması üçün aktivliyinin yol verilən həddən aşağı olmasından əmin olunmalıdır. Bütün bu tip ölçmələr və spektroskopik analizlər isti ərazi daxilində aparılır və aktivlik azaldıqdan sonra nümunələrin digər təcrübələrin aparılması üçün başqa laboratoriyalara daşınmasına icazə verilir.

Bu fəsilə, 3C-SiC nanokristallarının ölçü və səth morfolojiyasının HRTEM, TEM, FESEM və SEM üsulları ilə analizləri aparılmışdır. Eyni zamanda 3C-SiC nanokristallarının quruluşuna neytron selinin təsiri SAED, EDP və rentgenfaza üsulu ilə tədqiq olunmuşdur. Neytron seli ilə şüalanmadan öncə və sonra nümunələrin TEM, SAED və EDP analizləri "TEM, Jeol JEM-2010F" cihazında effektiv gərginliyin 200 kV qiymətində aparılmışdır. Cihazın quruluşu və tədqiqatın aparılma ardıcılığı bu fəsilə ətraflı şərh edilmişdir. TEM qurğusunda analizlər zamanı nümunə mis-karbon ilə üzlənib vakuüm quruducusunda qurudulduqdan sonra yüksək vakuüm altında aparılmışdır. Həmçinin nisbətən böyük ölçülərdə (təqribən 200nm) aqloremasiyanın öyrənilməsi məqsədi ilə nümunələrin ilkin və neytron selinin təsirinə məruz qaldıqdan sonra sahə emmissiyalı SEM şəkilləri "FE-SEM, Jeol JSM-7600" cihazında effektiv gərginliyin 7 – 10 kV və iş məsafəsinin 8mm (working distance - WD) qiymətində çəkilmişdir. TEM tədqiqatlarından fərqli olaraq SEM analizləri birbaşa nümunə üzərində üzlənmə olmadan və ətraf mühitin təsirini minimuma endirmək məqsədilə vakuümə aparılmışdır.

Tədqiq olunan dissertasiyada işində nanokristallıq 3C-SiC hissəciklərinin termik parametrləri "Perkin Elmer" STA 6000 cihazında tədqiq edilmişdir. "Perkin Elmer" STA 6000 cihazında işçi



oblast 290K-1273K, termik işləmə sürəti 5 K/dəq, 10K/dəq, 15K/dəq və 20K/dəq, PolyScience analizatoru və “digital temperature controller” soyuducu sistemidir. İşdə “Pyris Manger” proqram təminatından istifadə olunaraq kinetik parametrlər təyin olunmuşdur. Təcrübələr aparılan “Perkin Elmer” STA 6000 cihazı eyni zamanda həm kütlə dəyişməsinə, həm də, sistemdə baş verən istilik mübadiləsinə ölçməyə imkan verir. Belə ki, bu cihazda asanlıqla eyni zamanda nümunənin DSC, DTA, TGA və TG kimi parametrlərini öyrənmək mümkündür. “Perkin Elmer” STA 6000 cihazı müasir temperastur sensoru və kütlə qeydedicisi ilə təchiz olunmuşdur və bu təcrübələrdə nəticələrin mükəmməl olmasına imkan yaratmışdır. Təcrübələr zamanı yanma məhsullarının sistemdən xaric edilməsi və kondensasiya prosesinin qarşısının alınması məqsədi ilə arqon təsirsiz qazından istifadə edilmiş və sistemə 20ml/dəq sürət ilə verilmişdir.

Bu fəsilə, neytronlarla aşqarlanmanın impedans spektroskopiyası ilə araşdırılması və 3C-SiC nanokristallarının impedans spektrlərinin qarşılıqlı təhlili məqsədilə impedans spektroskopiyaya üsulu ətraflı şərh edilmişdir. Şüalanmadan öncə və sonra nümunələrin səthinə xüsusi şəraitdə püskürmə üsulu ilə qızıl kontaktlar vurulub və onun keyfiyyəti yoxlanılıb. Sonra platin altlıq və üstlükədən istifadə edilərək nümunələrin elektrik və dielektrik xüsusiyyətləri “Novocontrol Alpha High Resolution Dielectric Analyzer” cihazında dəyişən sahə üçün (~1V) temperaturun 100 – 400 K intervalında və tezliyin 0.1Hz – 2.5MHz aralığında öyrənilmişdir. Ölçmələr zamanı temperaturun hər hansı dərəcədə saxlanma dəqiqliyi  $10^{-2}$ K kimi olmuşdur və bu dəqiqlik körpü metodu ilə əldə edilmişdir (Pt100 resistor). Digər tərəfdən, 3C-SiC nanokristallarının volt – amper (V – A) xarakteristikaları “Keithley 238 High Current Source Measurement Unit” cihazında ölçülmüşdür. Bu halda, bütün təcrübələr otaq temperaturunda gərginliyin -100V - +100V aralığında və 5V addımla aparılmışdır. Təcrübələrdə histerik ölçmələr aparılmışdır (gərginliyin -100V qiymətindən +100 qiymətinə qədər və əksinə). Təcrübələr zamanı altlıq olaraq mis lövhədən istifadə edilmiş və üst tərəfdən kontakt tipi fərqli vəziyyətlərdə idarə edilmişdir. Bütün təcrübələrdə hər nümunə üçün

bir neçə fərqli kontakt vəziyyətlərində ən azı 3 dəfə təkrar ölçmələr aparılmışdır.

Bu fəsildə, EPR qurğusu, təqdiat metodu və təcrübələrin aparılma ardıcılığı ətraflı izah edilmişdir. EPR təcrübələri zamanı hazırlanmış nümunələr hər biri təqribən 50 µl (1.5mg) olmaqla hündürlüyü 5mm, iç diametri 2,5mm olan silindir formalı yüksək təmizliyə malik kvars boruculara doldurulmuşdur. Qeyd edək ki, kənar effektləri minimuma endirmək məqsədilə, təcrübələrdə istifadə olunan nümunələr kvars borulara doldurulmadan öncə müxtəlif müddətlərdə neytron seli ilə şüalandırılmışdır. Neytron seli ilə şüalanmadan öncə və sonra nümunələrin EPR analizləri "Bruker ELEXSYS E500 EPR spectrometer with high-Q resonator" cihazında aparılmışdır (500 - 5500G genişlikdə, mərkəzi sahənin 3300G qiymətində (Full sweep analysis, sweep = 500 G to 5500 G at center field of 3300 G = 0.33 T)).

Üçüncü fəsil neytronlarla şüalandırılmış nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin  $k_0$ INAA, HRTEM, TEM, SAED, EDP, FESEM, SEM analizləri və quruluş xüsusiyyətlərinin tədqiqinə həsr olunmuşdur. Neytron selinin təsiri altında nano SiC – də əmələ gələn qatışıq elementlərin radioizotopları zamanın funksiyası kimi öyrənilib. Neytronla şüalanma nəticəsində nümunələrin aktivliyini kəskin artıran izotopların identifikasiyası aparılıb. Lazer metodu ilə sintez olunmuş nano 3C-SiC hissəciklərinin təmizlik dərəcəsi  $k_0$  əsaslı instrumental neytron aktivləşmə analizi (The  $k_0$ -based Instrumental Neutron Activation Analysis ( $k_0$ -INAA)) metodu ilə müəyyən edilmişdir. Şüalanmadan sonra aparılan aktivlik analizləri nəticəsində nano SiC – də mövcud olan qarışıq element tərkibi müvafiq elementlərin radionuklidləri ilə müəyyən edilmişdir.  $k_0$ -INAA metodu ilə qarışıq radioizotoplarının faizlə miqdarları təyin edilmişdir. Çox yaşama müddətinə malik radionuklidlər iyirmi gün (təqribən 500 saat) müddətində analiz edilmişdir. Burada ümumilikdə 8 tip radionuklid müşahidə olunmuşdur ki, onların da yarımparçalanma dövrləri 12.7 saatdan 8.6E8 saata qədər dəyişir. Burada mövcud radionuklidlərin ilkin aktivlikləri 0.3 kBq – dən 163MBq - ə qədər dəyişir. Analizlər nəticəsində məlum olmuşdur ki, nisbətən çox yaşama müddətinə malik radionuklidləri ilkin

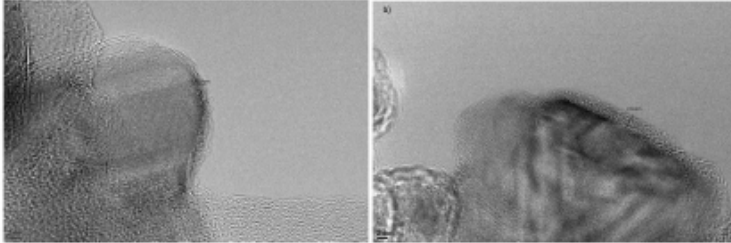
aktivliklərinə əsasən iki fərqli qrupa ayırmaq olar. Birinci qrupa aktivlikləri təqribən 0.35kBq - ə qədər olan radionuklidlər daxildir. Burada müşahidə olunan radionuklidlərin yarımparçalanma müddətləri ardıcıl olaraq 1023 saat ( $^{181}\text{Hf}$ ), 1077 saat ( $^{59}\text{Fe}$ ), 7508 saat ( $^{54}\text{Mn}$ ),  $5.8 \cdot 10^8$  saat ( $^{93}\text{Zr}$ ),  $6.7 \cdot 10^8$  saat ( $^{59}\text{Ni}$ ) və  $8.6 \cdot 10^8$  saat ( $^{41}\text{Ca}$ ) kimidir. Təqribən iyirmi gün sonra bütün radionuklidlərin aktivliyi demək olar ki, 0.35kBq – dən az olmuşdur. Çox yaşama müddətinə malik, digər qrupa daxil olan radionuklidlərin sayı ikidir. Bu radionuklidlərin ilkin aktivlikləri maksimum təqribən 163 MBq – dir. Bu qrupda müşahidə olunan radionuklidlər uyğun olaraq  $^{64}\text{Cu}$  12.7 saat və  $^{24}\text{Na}$  15 saat kimi yarımparçalanma müddətinə malikdirlər. Bu radionuklidlərin yarımparçalanma müddətlərinin nisbətən az olmasının nəticəsidir ki, iyirmi gün sonra hər iki radionuklidin aktivliyi sifirə qədər azalmışdır.

Az yaşama müddətinə malik digər radionuklidlərin ilkin aktivliyi təqribən 54MBq-ə qədərdir. Burada iki növ  $^{52}\text{V}$  və  $^{27}\text{Mg}$  radionuklidlər müşahidə olunmuşdur ki, onların da yarımparçalanma müddətləri uyğun olaraq  $^{52}\text{V}$  üçün 0.062 saat və  $^{27}\text{Mg}$  üçün isə 0.16 saatdır. Təcrübi analizlərdən məlum olmuşdur ki, 5 saat vaxt keçdikdən sonra hər iki radionuklidlərin aktivlikləri təqribən sifirə qədər azalır. Az yaşama müddətinə malik olan digər qrup radionuklidlərin ilkin aktivliyi təqribən 3GBq-ə qədər olub. İlkin yanaşmada ehtimal olunub ki, yüksək aktivliyin əsas mənbəyi  $^{38}\text{Cl}$  izotopudur. Müşahidə olunan yüksək aktivlikli  $^{38}\text{Cl}$  izotopunun yarımparçalanma müddəti 0.62 saatdır və ölçmələrin aparıldığı beş saatin sonunda  $^{38}\text{Cl}$  izotopunun aktivliyi təqribən 11.5kBq-ə qədər azalmışdır. Bu qrupa daxil olan  $^{28}\text{Al}$  izotopunun isə ilkin aktivliyi 1.4GBq və yarımparçalanma müddəti isə 0.037 saatdır (ölçmələrin aparıldığı 5 saatin sonunda  $^{28}\text{Al}$  izotopunun aktivliyi təqribən sifirə qədər azalmışdır). Qeyd edək ki, analizlərdən məlum olmuşdur ki, digərlərindən dəfələrlə çox aktivliyə malik  $^{38}\text{Cl}$  izotopu qarışıqın əsas hissəsini təşkil edir.

Ümumiyyətlə neytron selinin təsiri nəticəsində yaranmış qarışıq radioizotoplarının faiz ilə miqdarları, onlara əsasən ilkin izotoplar və bu izotopların yaranmasında zəbt olunan neytronların sayı işdə ətraflı təsvir edilmişdir. Eyni zamanda nəzərə almaq

lazımdır ki, tədqiqat işində qeyd edilən Al və Mg izotoplarının konsentrasiyası çox az ehtimalla mümkün  $^{28}\text{Si}(n, p) \rightarrow 28\text{Al}$  və  $^{30}\text{Si}(n, \alpha) \rightarrow 27\text{Mg}$  reaksiyaları nəticəsində göstərilən qiymətdən bir qədər az ola bilər. Lakin bu tip reaksiyaların baş verməsi üçün prosesdə iştirak edən neytronların enerjisi minimum təqribən 4 MeV – dən çox olmalıdır. Təcrübələr aparılan reaktorda neytronların enerjisi ortalama təqribən 1MeV ətrafında dəyişir, amma enerjisi 4 MeV – dən çox olan neytronların mövcudluğu qaçılmazdır. Beləliklə, Al və Mg konsentrasiyası mümkün göstərilən nüvə reaksiyaları səbəbindən uyğun olaraq 0.015% və 0.0083%-dan az ola bilər.

Neytronla şüalanmadan öncə və sonra nanomaterial SEM və TEM cihazları ilə analiz edilmişdir. Nanohissəciklərin aqloremasiyası şüalanmadan öncə və sonra müqayisəli öyrənilmişdir. SEM analizləri ilə təcrübələrdə istifadə olunan nanohissəciklərin ölçüləri araşdırılmışdır. Nanohissəcik səthinin amorflaşması TEM qurğusunda analiz edilmişdir. TEM qurğusunda nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində neytron şüalanmanın defekt və digər effektləri öyrənilmişdir. SAED və EDP analizləri ilə neytron şüalanmanın nanomaterialın kristallik strukturuna təsiri araşdırılmışdır. TEM analizlərindən məlum olmuşdur ki, neytron seli ilə şüalanmış nümunə ilkin nümunə ilə müqayisədə daha çox aqloremasiyaya uğrayır. Şəkil 2 – də daha çox böyütmədə şüalanmadan öncə və sonra müqayisəli TEM təsvirləri verilmişdir.

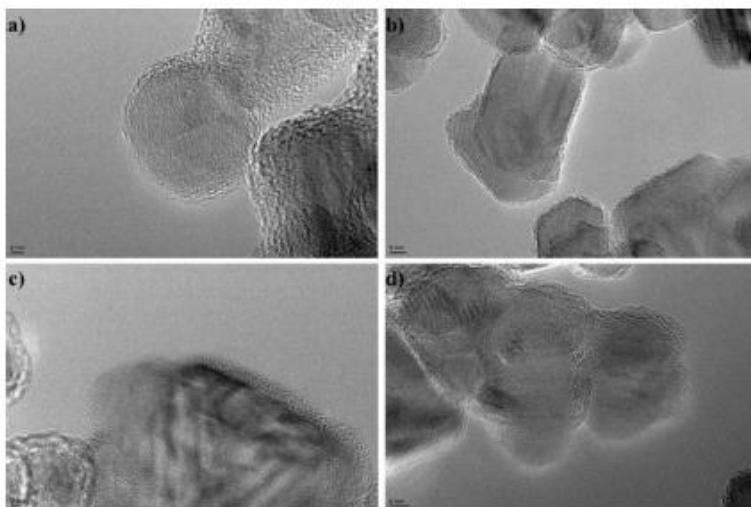


Şəkil 2. Nanokristallik SiC hissəciklərinin neytron şüalanmadan öncə (a) və sonra (b) çox böyütmədə TEM təsvirləri (şüalanmadan sonra səthin 3nm tərtibində amorflaşma).



Şekildən görüldüyü kimi neytron seli ilə şüalanma zamanı nanohissəciklərin səthində qalınlığı təqribən 3nm olan amorf təbəqə yaranır. Ehtimal olunur ki, bu amorf təbəqə (3nm qalınlıqda) ya neytronların təsiri nəticəsində səthdə olan bir neçə qəfəs atomlarının yerdəyişməsi ya da səthdə olan bəzi atomların oksidləşməsi ola bilər.

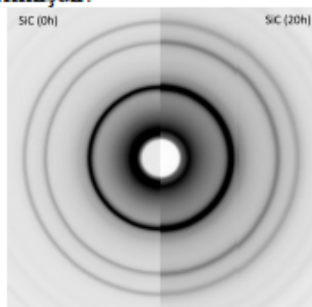
Əlavə olaraq, müqayisəli analizlərdən məlum olur ki, şüalanmadan sonra nümunələr üzərində “ləkələrin” sayı (şüalanmadan öncəki nümunələrlə müqayisədə) artır (Şəkil 3). TEM cihazında yüksək həssaslıqla çox böyütmədə (HRTEM - 2nm indeks ilə) kristallik qəfəsdə mövcud atomlar müşahidə olunur və materialın nanokristallik təbiətli olması təsdiqlənmişdir (Şəkil 2 və Şəkil 3 a, c). Qəfəs atomları müşahidə olunan böyütmələrdə kristalda neytron selinin təsiri nəticəsində yaranması ehtimal olunan “ləkələrin” artması daha aşkar nəzərə çarpır (Şəkil 3 c). Neytron seli ilə şüalandırılmış nanomaterialda yaranan defektlər və ya klasterlər HRTEM təsvirlərində müşahidə olunan “ləkələrlə” izah edilmişdir.



Şəkil 3. Nanokristallik SiC hissəciklərinin neytron şüalanmadan öncə (a və b) və sonra (c və d) HRTEM təsvirləri.

Hər iki difraksiya mənzərəsi (Şəkil 4) mərkəzi fırlanma (rotational average (RA)) ilə analiz edilmişdir, hansı ki, intensivliyin həssaslıq dərəcəsini artırır. Neytron seli ilə şüalanmadan öncə və sonra hər iki difraksiya mənzərəsi birlikdə müqayisəli nəzərdən keçirilmişdir (Şəkil 4). EDP təsvirləri "Gatan's Digital Micrograph" proqramının köməyi ilə analiz edilmişdir.

Nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin ( $h k l$ ) parametrləri rentgen struktur analizləri ilə müəyyən edilmişdir. Təcrübələr aparılan nümunə daxilində silisium karbidin digər modifikasiyalı politiplərinin mövcudluğu araşdırılmışdır. Qəfəs parametrlərinə uyğun  $2\theta$  bucaqları müəyyən edilmişdir. Təcrübələrdən nanokristallik 3C-SiC hissəcikləri üçün qəfəs sabitləri və qəfəs bucaqları qiymətləndirilmişdir.

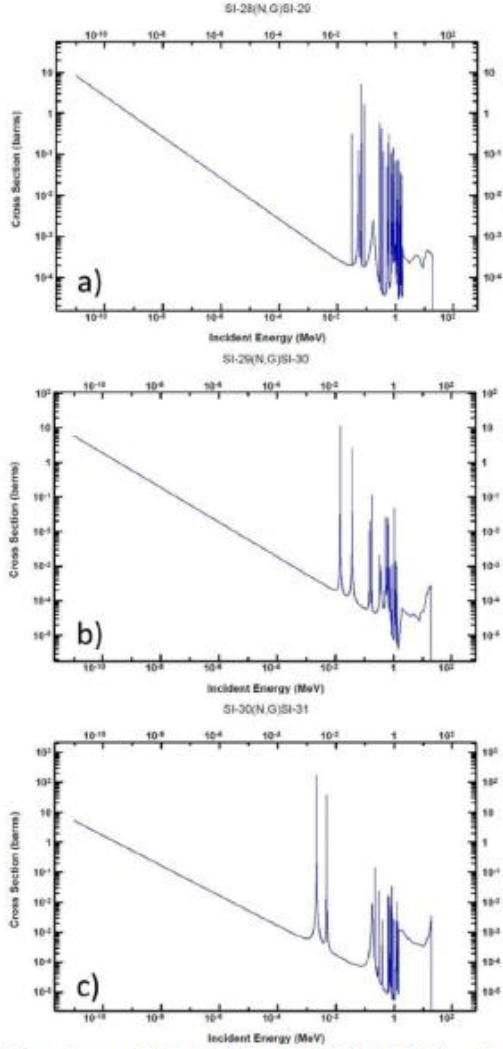


**Şəkil 4.** Nanokristallik SiC hissəciklərinin neytron şüalanmadan öncə (0h) və sonra (20h) müqayisəli EDP analizləri

Dördüncü fəsildə neytron selinin nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində zəbt olunması, səpilməsi və defekt hallarının yaranması kompüter modelləşməsi ilə nəzərdən keçirilmiş və dissertasiya işinin məqsədinə uyğun optimal neytron enerjisi qiymətləndirilmişdir. Neytron selinin nanokristallik 3C-SiC hissəcikləri ilə qarşılıqlı təsirin ümumi xarakteristikalarının modelləşdirilməsi ətraflı şərh edilmişdir. Fərqli enerjilərdə neytronların nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində udulması kompüter modelləşməsi ilə öyrənilmişdir. Neytronların nanomaterialda udulması 3C-SiC hissəciklərini təşkil edən silisium



və karbon atomları üçün ayrı-ayrılıqda tədqiq edilmişdir. Silisium və karbon atomlarının fərqli tip izotoplarında udulmanın effektiv en kəsiyi fərqli olduğundan hər bir stabil izotop üçün modelləşmə ayrı – ayrılıqda aparılmışdır. Eyni zamanda silisium və karbon atomları üçün neytron zəbtinin effektiv en kəsiyi spektrləri qarşılıqlı öyrənilmişdir. Silisiumun stabil izotoplarında ( $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$  və  $^{30}\text{Si}$ ) rezonans hal enerjisinin təqribən 0.1MeV ətrafında baş verir (Şəkil 5 b və c). Neytron selinin udulma spektrlərindən görüldüyü kimi, silisiumun stabil izotoplarının kütlə ədədinin artması ilə, udulma spektrində müşahidə olunan rezonans hallar enerjisinin azalması istiqamətində sürüşür. Başqa sözlə, əgər  $^{28}\text{Si}$  izotopunda udulma spektrində müşahidə olunan rezonans halın minimal enerjisi təqribən  $5 \cdot 10^{-2}$  MeV qiymətinə uyğun gəlirsə,  $^{29}\text{Si}$  və  $^{30}\text{Si}$  izotoplarında bu qiymət uyğun olaraq  $10^{-2}$  MeV və  $10^{-3}$  MeV kimidir. Bu isə onu göstərir ki, silisium izotopunun kütlə ədədinin artması ilə daha aşağı enerjilərdə rezonans halların baş verməsi mümkündür. Qeyd edək ki, digər stabil silisium izotoplarından fərqli olaraq  $^{30}\text{Si}$  izotopunda baş verən udulma spektri rezonansı çox böyük praktik əhəmiyyətə malikdir. Belə ki, neytron transmutasiya hadisəsinin baş verməsi üçün  $^{30}\text{Si}$  izotopu həlledicidir.  $^{30}\text{Si}$  izotopunda neytronlar zəbt olunaraq  $^{31}\text{Si}$  izotopuna çevrilməsi və sonradan  $\beta$ -parçalana ilə  $^{31}\text{P}$  izotopuna çərilməsi, nanokriostallik 3C-SiC hissəciklərinin fiziki xassələrində köklü dəyişikliklərə səbəb olur. Belə ki,  $^{31}\text{P}$  izotopu nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində n-tip aşqar olur və onun konsentrasiyası elektronika sistemlərində çox mühüm praktiki əhəmiyyətə malikdir. Digər tərəfdən təqdim olunan nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində neytronlarla qarşılıqlı təsir nəticəsində karbon atomlarında da neytron zəbtinin araşdırılması çox mühümdür. Neytron selinin  $^{12}\text{C}$  izotopları ilə qarşılıqlı təsiri zamanı demək olar ki, neytron enerjisinin 20MeV qiymətinə qədər rezonans hal müşahidə olunmur. Lakin  $^{13}\text{C}$  izotopunda enerjinin təqribən  $10^{-1}$ MeV qiyməti ətrafında rezonans hal müşahidə olunur. Bu isə onu deməyə əsas verir ki, nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində 0.1MeV enerjili neytronların zəbti nəticəsində  $^{14}\text{C}$  izotoplarının konsentrasiyası arta bilər.  $^{14}\text{C}$  izotopu isə  $\beta$ -aktiv izotop olub, müəyyən vaxt keçdikdən sonra  $^{14}\text{N}$  izotopuna çevrilir.



Şəkil 5. Neytron selinin silisium fərqli stabil izotoplarında zəbtinin effektiv en kəsiyi spektrləri.

Lakin,  $^{13}\text{C}$  izotopunun konsentrasiyasının az olması və digər proseslərlə müqayisədə  $^{14}\text{C}$  izotopununun alınma ehtimalının aşağı olması, aparılan eksperimentlərdə bu proseslər nəzərə alınmaması ilə nəticələnir. Belə ki, aparılan müqayisəli analizlərdən məlum olmuşdur ki, Si izotopları üçün neytron zəbtinin effektiv en kəsiyi C atomları ilə müqayisədə təqribən  $10^3$  dəfə çoxdur.

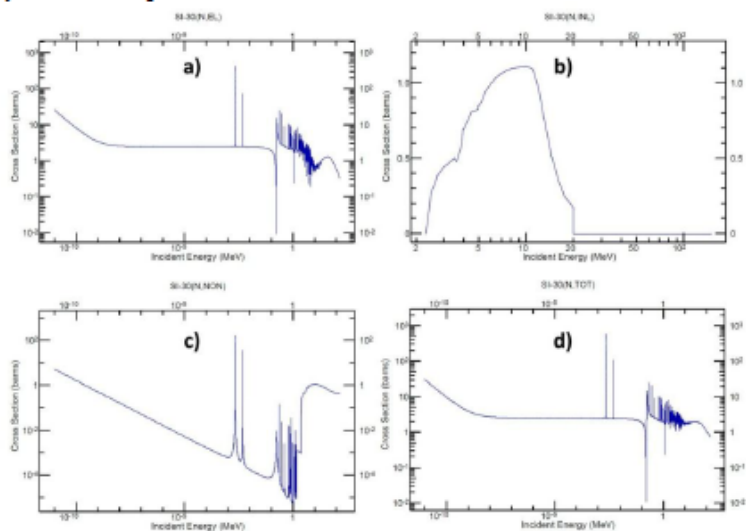
Eyni zamanda müxtəlif enerjili neytronların nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində yaratdığı  $(n, p)$  və  $(n, \alpha)$  çevrilmələri tədqiq edilmişdir. Neytron selinin təsiri altında mümkün  $(n, p)$  və  $(n, \alpha)$  çevrilmələri 3C-SiC nanohissəciklərini təşkil edən silisium və karbon atomları üçün ayrı-ayrılıqda öyrənilmişdir. Silisium və karbon atomlarının fərqli tip izotoplarında  $(n, p)$  və  $(n, \alpha)$  çevrilmənin mümkün ehtimalının effektiv en kəsiyi müxtəlifdir və bu səbəbdən hər bir stabil izotop ayrı – ayrılıqda nəzərdən keçirilmişdir. Silisium və karbon atomları üçün  $(n, p)$  və  $(n, \alpha)$  çevrilmələrinin effektiv en kəsiqlərinin spektrləri qarşılıqlı öyrənilmişdir. Si izotopları  $(n, p)$  çevrilmələri zamanı uyğun Al izotoplarına çevrilir.  $^{28}\text{Si}$  izotopu üçün  $^{28}\text{Si}(n,p)^{28}\text{Al}$  çevrilməsi enerjinin müəyyən intervalında intensiv olur. Lakin enerjinin minimum sərhəd qiyməti mövcuddur ki, bundan kiçik enerjilərdə  $(n, p)$  çevrilməsi baş vermir. Enerjinin bu qiyməti  $Q$  – faktoru ilə xarakterizə edilir.  $Q$  – faktorunun qiyməti nüvə çevrilməsinin tipindən asılı olaraq geniş aralıqda dəyişir. Digər tərəfdən  $Q$  – faktoru nüvə qarşılıqlı təsirinə növündən asılı olaraq pozitiv ( $Q>0$ , bu zaman çevrilmə exotermik olur) və neqativ ( $Q<0$ , bu zaman çevrilmə endotermik olur) qiymətlər ala bilər. Xüsusi halda əgər nüvə qarşılıqlı təsirini elastik olarsa, bu zaman  $Q$  – faktor sıfıra bərabər olur.  $(n, p)$  və  $(n, \alpha)$  çevrilmələri zamanı düşən neytronların enerjisindən istifadə olunur ki, bu zaman da proses endotermik olur ( $Q<0$ ). Başqa sözlə  $(n, p)$  və  $(n, \alpha)$  çevrilmələri zamanı xaricdən enerji udulur (baxılan halda düşən neytronların enerjisi). Bu yanaşma ilə çox az xəta ilə deyə bilərik ki,  $(n, p)$  və  $(n, \alpha)$  çevrilmələrinin baş verməsi üçün düşən neytronlardan tələb olunan minimal enerjisi  $Q$  – faktor qiymətinin moduluna bərabərdir.  $^{28}\text{Si}$  izotoplarında  $(n, p)$  çevrilmələrinin baş verməsi üçün düşən neytronların enerjisinin minimal qiyməti 3.86MeV olub, neytronların enerjisinin təqribən 20MeV qiymətinə qədər intensiv olur. Rezonans

hal isə enerjinin təqribən 8MeV-15MeV intervalında mövcuddur.  $^{29}\text{Si}$  izotoplarında isə  $^{29}\text{Si}(n,p)^{29}\text{Al}$  çevrilmələrinin baş verməsi üçün düşən neytronların minimal enerjisi 2.9MeV ətrafında qiymətləndirilmişdir.  $^{29}\text{Si}$  izotopları üçün rezonans hal enerjinin təqribən 10MeV qiyməti ətrafında mövcuddur.  $^{30}\text{Si}$  izotoplarında  $^{30}\text{Si}(n,p)^{30}\text{Al}$  çevrilmələri minimal 7.75MeV enerjiyə malik neytronlarla baş verə bilər.  $^{30}\text{Si}(n,p)^{30}\text{Al}$  çevrilmələrində rezonans hal enerjinin təqribən 8MeV-20MeV aralıqlarındadır. Digər tərəfdən, Si izotopları (n,  $\alpha$ ) çevrilmələrində uyğun Mg izotoplarına da çevrilə bilər. Si izotoplarında Mg çevrilmələrinin baş verməsi üçün düşən neytronların minimal enerjisi 2.65MeV ətrafında və proseslərin rezonans hal enerjinin 10MeV kimi qiymətləndirilir. Anoloji hesablamalar neytron selinin nanokristallik 3C-SiC hissəciklərindən səpilməsi halı üçün də aparılmışdır. Eyni zamanda hər bir stabil izotop üçün elastik, qeyri – elastik, elastik olmayan səpilmələr və ümumi effektiv en kəsiyi nəzərdən keçirilmidir.

Silisiyumun digər stabil izotoplarından fəqli olaraq  $^{30}\text{Si}$  izotopunda neytron selinin elastik və elastik olmayan səpilmələrinin effektiv en kəsikləri ədədi qiymətcə böyükdür (Şəkil 6a və c). Lakin, qeyri – elastik səpilmənin effektiv en kəsiyi digər stabil izotoplara uyğundur və aşağı ehtimallı prosesdir (Şəkil 6b). Ümumi effektiv en kəsiyinin qiyməti isə əsasən elastik və elastik olmayan səpilmələrinin effektiv en kəsirlərinin ədədi qiymətlərinə uyğundur. Bu isə o deməkdir ki,  $^{30}\text{Si}$  izotopunda da elastik və elastik olmayan səpilmələr dominantlıq təşkil edir. Məhz elastik olmayan səpilmələrin nəticəsidir ki, neytron seli ilə nanokristallik 3C-SiC hissəcikləri  $^{31}\text{P}$  izotopları ilə aşqarlanır və fiziki xassələri inkişaf etdirilir.

Qeyd etmək yerinə düşərdi ki, nanokristallik 3C-SiC hissəciklərini təşkil edən  $^{12}\text{C}$  izotopundan kiçik enerjili neytronlar üçün səpilmələrin effektiv en kəsikləri aşağı ehtimallı proseslərdir. Məhz bu səbəbdən  $^{12}\text{C}$  izotopu üçün nisbətən böyük enerjili neytronlar üçün səpilmələrin effektiv en kəsikləri nəzərdən keçirilmişdir. Belə ki, neytronların enerjisinin 20MeV - ə qədər qiymətlərində  $^{12}\text{C}$  izotopu üçün elastik, qeyri – elastik, elastik olmayan səpilmə və ümumi effektiv en kəsiyini fərqli xarakterə malikdir. Digər izotoplarda olduğu kimi  $^{12}\text{C}$  izotopunda da elastik

səpilmənin effektiv en kəsiyi ədədi qiyməti böyükdür və bu hal daha çox ehtimallı prosesdir.



Şəkil 6. Neytron selinin  $^{30}\text{Si}$  izotopu üçün elastik (a), qeyri – elastik (b), elastik olmayan (c) səpilmə və ümumi (d) effektiv en kəsiyi spektrləri.

Digər tərəfdən, qeyri – elastik və elastik olmayan səpilmələrin effektiv en kəsiklərinin ədədi qiymətləri çox kiçikdir və aşağı ehtimallı proseslərdir. Ümumi effektiv en kəsiyinin ədədi qiyməti elastik səpilmənin ədədi qiymətinə daha çox uyğundur. Lakin, elastik səpilmənin effektiv en kəsiyi ilə ümumi effektiv en kəsiyi arasında fərq mövcuddur ki, bu da prosesin əsasən elastik səpilmədən ibarət olduğunu deməyi nisbətən inkar edir. Buna baxmayaraq prosesin böyük bir hissəsi elastik səpilmənin payına düşür deyə bilərik. Həmçinin, aşağı kütlə payına malik olmasına baxmayaraq  $^{13}\text{C}$  izotopu üçün də effektiv en kəsiyi modelləşdirilmişdir. Neytron selinin  $^{13}\text{C}$  izotopu üçün effektiv en kəsiklərini nəzərdən keçirdikdə məlum olur ki, bu halda elastik səpilmə üstünlük təşkil edir. Qeyri – elastik və elastik olmayan səpilmələrin effektiv en kəsiklərinin ədədi



qiymətləri çox kiçikdir və ehtimallı çox az olan proseslərdir. Ümumi effektiv en kəsiyi isə demək olar ki, elastik səpilmənin effektiv en kəsiyinə tam oxşardır. Bu isə onu deməyə əsas verir ki, bu halda prosesin böyük əkəsriyyəti elastik səpilmə ilə baş verir. Digər tərəfdən, nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində neytron selinin təsiri ilə yaranan fərqli təbiətli defektlər kompüter modelləşməsi ilə öyrənilmişdir. Xüsusi proqramların köməyi ilə nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin fəza quruluşu araşdırılmış və neytronlarla mümkün defekt halları tədqiq edilmişdir. Eyni zamanda, defektlərin yaranması üçün neytronların daha çox ehtimallı enerjiləri hesablanmışdır. Qəfəs atomlarında neytron selinin təsiri ilə yaranan Si və C boşluqlarının mümkün ehtimalı qiymətləndirilmişdir. Neytronların enerjisinin 5MeV ətrafında nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində nöqtəvi defektlərin daha çox ehtimallı olması tapılmışdır.

SiC nanohissəcikləri kubik modifikasiyaya malik Si və C atomlarından ibarətdir ki, neytron selinin qəfəs atomlarına təsiri zamanı bəzi atomlarda yüksək enerji təpilməsi (high energy recoils, primary knock-on atoms – PKA) müşahidə oluna bilər. PKA atomları ilə digər qonşu atomlar arasında enerji mübadiləsi zamanı nöqtəvi defektlər və ya klasterlər əmələ gəlir ki, bunlar da fundamental defektlərin əsasını təşkil edir. Neytron seli ilə şüalanma zamanı nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində mümkün PKA yaranmasını nəzərdən keçirək. Məlumdur ki, PKA dedikdə neytronlarla şüalanma zamanı neytronun birbaşa qarşılıqlı təsirdə olduğu ilk atom nəzərdə tutulur. Bu halda düşən neytronların və hədəf atomun kristal qəfəsdə saxlanma enerjisindən asılı olaraq PKA bir və ya bir neçə atomu qəfəsdən çıxara bilər. Müəyyən mənada PKA hallarının yaranması Frenkel cütlərinin yaranmasına ekvivalentdir. Belə ki, bir prosesdə qəfəsi tərk edən atomlardan ilki PKA adlanır, digərləri isə ilkin atom da daxil olmaqla Frenkel cütləri yarada bilər. PKA hallarından bir neçə Frenkel cütünün yaranması üçün düşən neytronun enerjisi qəfəs atomunun enerjisinin tam misillərindən böyük olmalıdır. Başqa sözlə, əgər qəfəs atomlarının sərhəd enerjisi  $E$  olarsa, PKA – dan bir neçə Frenkel cütünün yaranması üçün neytronun minimal enerjisi  $2E$ ,  $3E$  və s. böyük olmalıdır.



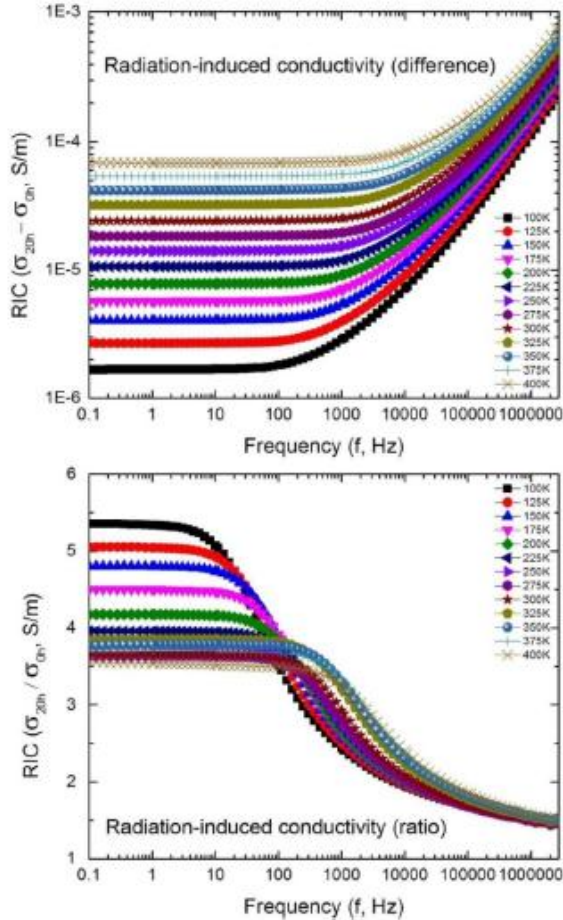
Neytron seli ilə şüalanma zamanı nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində Si və C atomları vasitəsi ilə mümkün boşluqların yaranması yalnız o hallarda mümkün ola bilər ki, nüvə çevrilmələri olamadan düşən neytronun enerjisi kristal qəfəsdən uyğun izotopu çıxarmağa kifayət etsin. Belə ki, əgər prosesdə hər hansı (n,p), (n, $\alpha$ ) və s. kimi nüvə çevrilmələri baş verərsə, bu zaman uyğun boşluqların yaranma ehtimalı sıfıra qədər azalar. Ümumi yanışmada adətən neytronlarla şüalanma zamanı defektlərin yaranması üçün (n, $\gamma$ ) və ya (n,n') nüvə reaksiyalarından hər hansı birinin baş verməsi zəruridir. Bu tip nüvə reaksiyalarının baş vermə ehtimalı birbaşa hər bir nüvə üçün xarakterik olan effektiv en kəsiyi ilə xarakterizə olunur. Belə ki, nanokristallik 3C-SiC hissəciklərini təşkil edən Si və C atomlarının fərqli stabil izotoplarında (təbii tərkib Si üçün 92.23%  $^{28}\text{Si}$ , 4.67%  $^{29}\text{Si}$  və 3.1%  $^{30}\text{Si}$ , C üçün 98.93%  $^{12}\text{C}$  və 1.07%  $^{13}\text{C}$ ) effektiv en kəsiyi fərqli olduğu üçün hər bir stabil izotop üçün (n, $\gamma$ ) və (n,n') nüvə reaksiyaları ayrılıqda analiz edilmişdir.

Məlumdur ki, neytronlarla şüalanma zamanı kaskad hallarının yaranması nəzəriyyəsi, müəyyən enerjiyə malik neytronun hər hansı bir atomla qarşılıqlı təsirdə olaraq həmin izotopu həyəcanlandırması və həyəcanlanmış izotopun qonşu atomları həyəcanlandıraraq enerjini ətrafa ötürməsi kimi izah olunur. Qeyd edək ki, neytronlara şüalanma zamanı 3C-SiC nanokristallarında kaskad hallarının yaranması sadəcə (n, $\gamma$ ) və (n,n') nüvə reaksiyaları ilə deyil, ümumiyyətlə neytronlarla Si və C atomlarının qarşılıqlı təsiri nəticəsində yarana bilər. Həmçinin nöqtəvi və ya digər tip defektlərin yaranması halı da, sadəcə (n, $\gamma$ ) və (n,n') nüvə reaksiyaları ilə deyil, ümumiyyətlə neytronların atomlarla istənilən növ qarşılıqlı təsiri nəticəsində yarana bilər.

Beşinci fəsilə neytron selinin nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin elektrik xassələrinə təsiri və şüalanma nəticəsində meydana gələn yeni effektlər ətrafı şərh edilmişdir. İlk olaraq, hissəcik ölçüləri 18 nm olan kubik modifikasiyalı silisium karbid (3C-SiC) nanomaterialı neytron seli ilə fərqli müddətlərdə şüalandırılmışdır. Elektrik keçiriciliyinin tezlik asılılıqları və neytron selinin təsiri işdə müqayisəli şərh olunmuşdur. İlk halda və müxtəlif müddətlərdə neytronlarla şüalandırılmış 3C-SiC

nanohissəciklərin elektrik keçiriciliyinin tezlik asılılıqları 100K - 400K temperatur aralığında nəzərdən keçirilib. Hər bir temperaturda xarici sahə tezliyinin 0.1Hz – 2.5MHz aralığında fərqli qiymətlərdə ölçmələr aparılmışdır. Neytronlarla şüalanma zamanı 3C-SiC nanomaterialında radiasiya səbəbindən keçiricilik (radiation-induced conductivity – RIC) müşahidə olunmuşdur və bu keçiricilik tezliyin funksiyası kimi tədqiq edilmişdir. Elektrik keçiriciliyinin həqiqi və xəyali hissələrinin qarşılıqlı asılılıqlarından keçiriciliyin tipi müəyyənləşdirilmişdir. Eyni zamanda, neytron seli ilə şüalanmış nano 3C-SiC – in elektrik keçiriciliyinə temperatur və düşən neytronların miqdarının müxtəlif tezlik oblastunda təsiri tədqiq olunub. Müəyyən edilib ki, neytronların birbaşa, yaxud da aktivləşmə məhsullarının buraxdıqları şüaların təsiri altında əlavə elektroaktiv defektlər əmələ gəlir. Belə ki, neytron selinin  $6,7 \times 10^{17} \div 2,7 \times 10^{18} \text{ n/sm}^2$  san intervalında dəyişməsi nano 3C-SiC – in elektrik keçiriciliyini artırır. Elektrik keçiriciliyinin ədədi qiymətinin artmasında əsas səbəb kimi neytron çevrilmələri nəticəsində nanomaterial daxilində yaranmış yeni  $^{31}\text{P}$  izotopları göstərilmişdir. Neytron seli ilə şüalanmadan öncə və sonra Arenius yanaşması ilə nümunələrin aktivləşmə enerjiləri tezliyin iki müxtəlif sabit qiymətləri üçün hesablanmışdır. Alınmış nəticələri izah edən mexanizim irəli sürülüb.

Neytron seli ilə 20 saat şüalanma zamanı nano 3C-SiC – də yaranan əlavə radiasiya səbəbindən keçiricilik (radiation-induced conductivity RIC) fərqli temperaturlarda 0.1Hz – 2.5MHz tezlik intervalında hesablanmışdır (Şəkil 7). RIC keçiriciliyi 20 saat şüalanmış nümunə üçün  $\sigma_{0h} - \sigma_{20h}$  (fərq) və  $\sigma_{20h}/\sigma_{0h}$  (nisbət) yanaşmaları ilə hesablanmışdır. Hansı ki, burada  $\sigma_{0h}$  – şüalanmadan öncəki və  $\sigma_{20h}$  – 20 saat şüalanmış nano 3C-SiC – in elektrik keçiriciliyinin eksperimental qiymətləridir. RIC (fərq) keçiriciliyinin tezlik asılılığından məlum olmuşdur ki,  $f < 1\text{kHz}$  tezlik oblastunda radiasiya effektləri tezlikdən asılı deyil (Şəkil 7a). Lakin, tezliyin  $f > 1\text{kHz}$  oblastında RIC (fərq) keçiriciliyi tezlikdən düz mütənəsis asılı olaraq artır. Digər tərəfdən, RIC (fərq) keçiriciliyi temperaturdan asılı olaraq artır.



Şəkil 7. 3C-SiC nanomaterialının RIC (fərq, a) və RIC (nisbət, b) keçiriciliyinin fərqli temperaturlarda tezlik asılılıqları

Temperaturun 100K qiymətində RIC (fərq) keçiriciliyi  $2 \times 10^{-6}$  S/m olursa, 400K temperaturda RIC (fərq) artaraq  $8 \times 10^{-5}$  S/m olur. Qeyd edək ki, bu fərq yüksək tezliklər oblastında daha az qiymət alır.

Ümumi yanaşmada təcrübələrdə məlum olmuşdur ki, neytron selinin təsiri nəticəsində nümunələrdə yaranan RIC (fərq) keçiriciliyinin maksimum qiyməti təqribən  $7.5 \times 10^{-4}$  S/m olur. RIC (fərq) keçiriciliyi ən böyük qiymətini temperatur və tezliyin maksimum qiymətində alır. Buradan belə nəticəyə gəlmək olar ki, neytron seli nanomaterialda yüksək tezlik və temperaturlarda daha çox yükdaşıyıcılar yaradır. Yuxarı tezliklərdə nisbi keçiricilik daha az müşahidə olunur (Şəkil 7b). Nisbi keçiricilik aşağı tezliklərdə tezlikdən asılı deyil (RIC fərqi uyğun olaraq). Nisbi keçiriciliyin tezlik asılılıqlarından məlum olmuşdur ki, tezliyin maksimum qiymətində RIC (nisbi) minimum qiymətini alır (1.5 dəfə artım). Nisbi keçiricilikdə maksimum artım aşağı tezliklər oblastında 100K temperaturda müşahidə olunmuşdur (5.5 dəfə artım).

Bütün temperaturlarda aparılan ölçmələr nəticəsində məlum olmuşdur ki, 3C-SiC nanomaterialının elektrik keçiriciliyi kiçik tezliklərdə demək olar ki, tezlikdən asılı deyil. Lakin kiçik tezlik oblastlarında neytron şüalanmanın təsiri nəticəsində nanomaterial daxilində yaranan əlavə yükdaşıyıcılar, neytron effektlərinin daha aşkar müşahidə olunmasına səbəb olur. Belə ki, neytronlarla şüalanma nəticəsində lokal hallarda mövcud yükdaşıyıcıların və ya elektronların keçiricilikdə aktiv iştirakı mümkündür. Bu isə 3C-SiC – in elektrik keçiriciliyinin ədədi qiymətinin artmasına səbəb olur. Digər tərəfdən böyük tezliklər oblastında xarici elektrik sahəsinin təsiri neytron effektlərini üstələyir. Bunun nəticəsində böyük tezliklərdə neytron effektləri az, elektrik sahəsinin tezlik effektləri isə çox müşahidə olunur. Həmçinin temperaturun artması ilə stabil oblastın keçiriciliyin artması istiqamətində sürüşməsi müşahidə olunmuşdur. Bunun isə əsas səbəbi temperaturun təsiri ilə keçiriciliyin ədədi qiymətinin artmasıdır. Belə ki, nisbətən yüksək temperaturlarda, temperatur effektləri uyğun tezlik effektlərini üstələyir.

Alınmış təcrübə nəticələrindən nano 3C-SiC – in elektrik aktivləşmə enerjisi şüalanmadan öncə və sonra Arrhenius yanaşması ilə hesablanmışdır. Elektrik keçiriciliyinin natural loqarifmasının  $1000/T$  – dən asılılıq qrafikində meyl bucağının tangensi birbaşa aktivləşmə enerjisini ifadə edir. Hesablamalar iki tezlik üçün

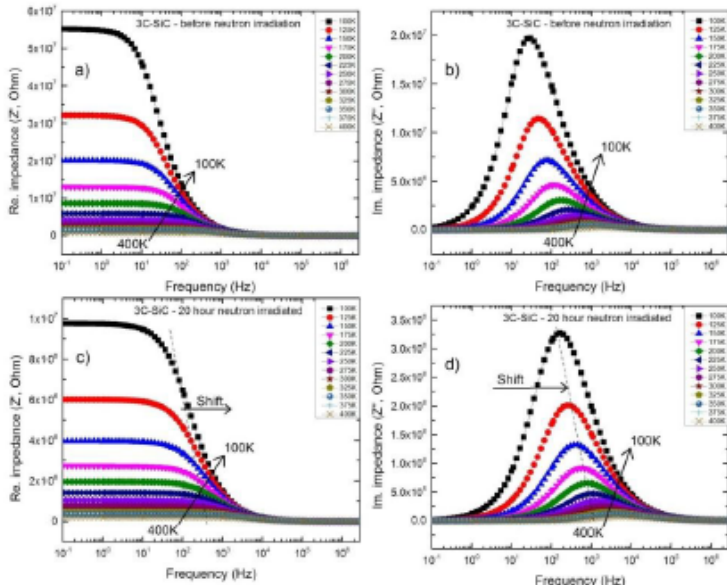
aparılmışdır (0.1Hz və 2.5MHz). Temperturun artması ( $T_{p1} < T_{p2}$ ) ilə aktivləşmə enerjisində artma müşahidə olunmuşdur. Aparılmış hesablamalara uyğun alınmış aktivləşmə enerjisinin ədədi qiymətləri işdə ətraflı şərh edilmişdir. Məlum olmuşdur ki, bütün hallarda şüalanma müddətinin artması ilə aktivləşmə enerjisinin ədədi qiyməti azalır. Bunu isə şüalanma nəticəsində nümunə daxilində yaranan əlavə yükdaşıyıcılar və ya aşqar elementlərin konsentrasiyasının artması ilə izah etmək olar. Həmçinin, tezliyin artması ilə aktivləşmə enerjisində azalma müşahidə olunmuşdur. Bunun da səbəbi, daha dərin səviyyələrdə olan yükdaşıyıcıların nisbətən yüksək tezliklərdə keçiricilikdə aktiv iştirakıdır.

Əlavə olaraq, bu fəsildə nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin impedans spektrləri neytronlarla şüalanmadan öncə və sonra müqayisəli analiz edilmişdir. Neytronlarla şüalanma zamanı nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin impedans spektrlərində müşahidə olunan rezonans hallar və sürüşmələr fərqli yanşmalarla izah edilmişdir. Nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin impedansının həqiqi və xəyali hissələrinin qarşılıqlı asılılıqlarından relaksasiya müddətləri hesablanmışdır. Hesablanmış relaksasiya müddətləri neytronlarla şüalanma vaxtının funksiyası kimi analiz edilmişdir. Neytron çevrilmələri (neutron transmutation) nəticəsində nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində yaranan  $^{31}\text{P}$  izotoplarının impedans spektrlərinə və relaksasiya müddətlərinə təsiri təhlil edilmişdir. Əlavə olaraq, TEM və SEM metodları ilə öyrənilmiş nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin amorflaşması və ya aqlomerasiyasının polyarlaşma dərəcəsinə və relaksasiya müddətinə təsiri araşdırılmışdır. Eyni zamanda bu fəsildə ilkin halda və müxtəlif müddətlərdə kəsilməz olaraq neytron selinin təsirinə məruz qalmış kubik modifikasiyalı nano silisium karbidin (3C-SiC) impedans spektrləri temperaturun funksiyası kimi öyrənilmişdir. Nümunənin impedans spektrləri tezliyin 0.1Hz – 2.5MHz və temperaturun 100K – 400K aralıklarında tədqiq olunmuşdur. Nümunələrin impedans spektrlərinin temperatur asılılıqları şüalanmadan öncə və sonra müqayisəli tədqiq edilmişdir. Kompleks impedans spektroskopiyasından keçiriciliyin təbiəti və metal – yarımkəçirici keçid temperaturu müəyyən edilmişdir. Neytron selinin təsir



müddətinin artması ilə polyarlaşmanın artması müşahidə olunmuşdur. Təcrübələrdə müşahidə olunmuş bütün effektlərin mexanizmləri verilmişdir.

Temperaturun müxtəlif qiymətlərində şüalanmadan öncə və sonra ümumi halda impedans spektrlərini nəzərdən keçirilmişdir (Şəkil 8).



**Şəkil 8. Nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin neytron şüalanmadan öncə və sonra impedans spektrləri.**

Şəkildən görüldüyü kimi, şüalanmadan əvvəl və sonra nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin impedansının həqiqi və xəyali hissələrində xüsusi hallar mövcuddur. İmpedansın həqiqi hissəsinin tezlik asılılığından görüldüyü kimi, temperaturun və tezliyin artması ilə impedansın ədədi qiyməti azalır (Şəkil 8a, c). Bu isə temperatur və tezliyin təsiri ilə digər fiziki parametrlərin dəyişməsinə səbəb olur. Həmçinin, tezliyin müəyyən qiymətində sıçrayışlı keçid mövcuddur ki, bunu da həmin tezlikdə mövcud relaksor hal kimi



qiymətləndirmək olar. Analoji sıçrayışlı hal nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin impedansının xəyali hissələrində də müşahidə olunur (Şəkil 8b, d). Digər tərəfdən, şüalanmadan sonra impedans spektrlərində tezliyin artması istiqamətində sürüşmələr (təqribən bir tərtib, 10 dəfə) müşahidə edilmişdir (Şəkil 8c, d). Eyni zamanda, neytronlarla şüalanma nəticəsində nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin impedansının ədədi qiyməti təqribən 5.5 dəfəyə qədər azalır. Neytronlarla şüalanma nəticəsində impedans spektrlərində müşahidə olunan azalmalar və sürüşmələrin səbəbi şüalanma nəticəsində nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində yaranan aşqar elementlər və ya əlavə yükdaşıyıcılar ilə izah olunur.

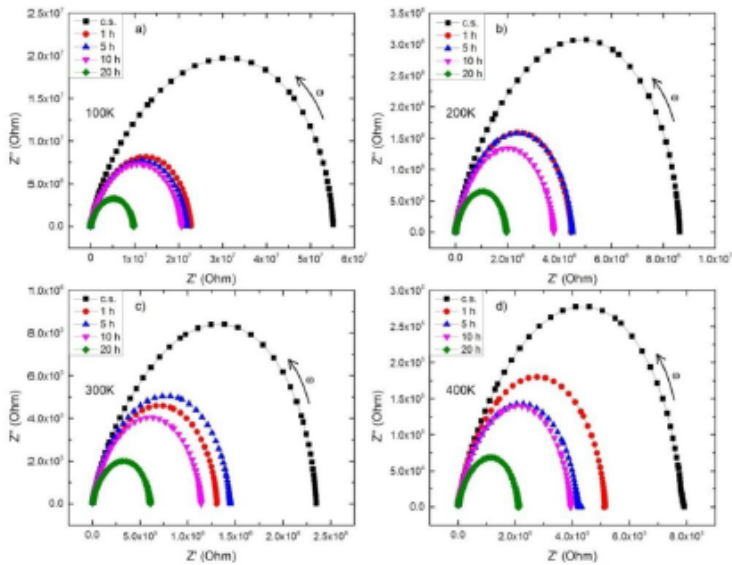
Neytronlarla şüalanmadan öncə və sonra fərqli sabit temperaturalarda impedansın həqiqi və xəyali hissələrinin qarşılıqlı asılılıqlarından şüalanma effektləri aşkar görünür (Şəkil 9). Neytron selinin təsiri ilə nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin impedansının bütün temperaturlarda azalması müşahidə olunur. Bu işə, nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin digər fiziki xassələrinə birbaşa təsir edir. Təcrübi nəticələrdən alınmış bu tip ayrılırları izah etmək üçün uyğun yollardan biri Cole – Cole yanaşmasıdır.

Təcrübələrdən alınmış nəticələri ümumi şəkildə aşağıdakı Cole – Cole münasibəti ifadə etmək olar:

$$Z' = R_{\infty} + \frac{R_0 - R_{\infty}}{1 + (i\omega\tau)^{-h}}$$

burada  $R_0$ - $R_{\infty}$  fəza sabiti adlanan həd,  $R_0$  və  $R_{\infty}$  isə uyğun olaraq tezliyin aşağı və yuxarı qiymətlərində müqavimət,  $h$  – relaksasiya vaxtının paylanması xarakterizə edən parametrdir. Monodispersiv relaksasiya zamanı  $h = 0$  və  $0 < h < 1$  sistemdə relaksasiya müddətinin paylanması göstərir.  $h$  parametri Cole – Cole dioqramında qövstün yalnız yuxarıda qalan hissəsi ilə mərkəzi yerindən təyin oluna bilər. Şəkil 9 – dən görünündüyü kimi relaksasiya spektrinin polidispersivliyi şüalanma müddətinin artması ilə artır. Alınmış bu nəticələr qəbulolunandır və bu onu göstərir ki, proses bir relaksasiya müddəti ilə çox yaxşı izah oluna bilər. Cole – Cole dioqramlarına uyğun nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin

müxtəlif sabit temperaturlarda relaksasiya müddətləri hesablanmışdır.



Şəkil 9. Nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin müxtəlif sabit temperaturlarda (100K, 200K, 300K və 400K) impedansının həqiqi və xəyali hissələrinin neytronlarla şüalanmadan öncə və sonra müqayisəli qarşılıqlı asılılıqları.

Orta tezliklər oblastında impedansın temperatur asılılıqları fərqli xarakterə malikdir. Tezliyin 1kHz qiymətində  $f(Z')=f(T)$  asılılıqlarında demək olar ki, xəttilik müşahidə olunur. Eyni zamanda neytron şüalanmasının təsir müddətinin və temperaturun artması ilə  $Z'$ -in ədədi qiyməti azalır. Tezliyin nisbətən böyük 0.1MHz qiymətində, təqribən 250K temperatura qədər temperaturun artması ilə impedansın həqiqi hissəsinin ədədi qiyməti artır. 250K-400K aralığında isə  $f(Z')=f(T)$  asılılıqlarında xarakterik azalma müşahidə olunur. Analoji hal nisbətən yüksək tezliklər oblastında da müşahidə olunur. 3C-SiC nanokristalları qadağan olunmuş zolağının eni 2.2eV olan yarımkəçirici olduğu üçün tezliyin artması impedans

spektrlərində dəyişikliyə səbəb olur. Ola bilsin ki, tezliyin nisbətən böyük qiymətlərində 3C-SiC nanokristallarında elektron keçiricilik üstünlük təşkil edir (metallik keçid). Məhz bu səbəbdən, tezliyin 0.1MHz, 1MHz və 2.5MHz qiymətlərində temperaturun uyğun olaraq 250K, 325K və 370K qiymətlərinə qədər impedansın ədədi qiyməti metallik materiallara xas olan xarakterə malik olur. Belə ki, temperaturun artması ilə 0.1MHz, 1MHz və 2.5MHz tezliklərdə impedansın həqiqi hissəsinin ədədi qiyməti artır. Digər tərəfdən, temperaturun müəyyən qiymətindən sonra yarımkeçiricilərə uyğun olaraq temperaturun artması ilə impedans azalır. Bunu isə belə izah etmək olar ki, temperaturun müəyyən qiymətinə qədər yükdaşıyıcılar metallik təbiətlidir.

Temperaturun 250K, 325K və 370K qiymətlərindən sonra yarımkeçiricilərə xas xarakteristika müşahidə olunur. Temperaturun 250K, 325K və 370K qiymətləri 3C-SiC nanokristalları üçün metal-yarımkeçirici keçid (metal–semiconductor transition –  $T_{MS}$ ) temperaturudu kimi qiymətləndirilmişdir. Beləliklə, tezliyin 0.1MHz, 1MHz və 2.5MHz qiymətlərinə uyğun olaraq  $T_{MS} = 250K, 325K$  və 370K temperaturalarda 3C-SiC nanokristallarında metal-yarımkeçirici keçidi müşahidə olurlar. Eyni zamanda, neytron şüalanmanın təsir müddətinin artması ilə,  $T_{MS}$  – in ədədi qiyməti temperaturun azalması istiqamətində sürüşür. Bunu isə, neytron çevrilmələri, rabitə sürüşməsi (dangling bonds), defekt və ya əlavə yükdaşıyıcıların yaranması ilə izah etmək olar.

Digər tərəfdən bu fəsilə 3C-SiC nanokristallarının  $V - A$  xarakteristikası (-100V) – (+100V) gərginlik aralığında 5V addım ilə neytron seli ilə şüalanmadan öncə və sonra müqayisəli nəzərdən keçirilmişdir. Neytron selinin təsir müddətinin artması ilə nanomaterialın  $V - A$  xarakteristikasında bucaq sürüşməsi müşahidə olunmuşdur. Eyni zamanda məlum olmuşdur ki, neytronlarla şüalanmadan sonra 3C-SiC nanokristallarının müqaviməti təqribən 4 M $\Omega$ -dan 1 M $\Omega$ -a qədər azalmışdır. Əlavə olaraq, Fowler–Nordheim asılılıqlarından məlum olmuşdur ki, 3C-SiC nanokristallarında baş verən proseslər birbaşa tunnel hadisəsinə əsaslanır və sahə emmissiyası müşahidə olunmur. Fowler–Nordheim asılılıqlarından 3C-SiC nanokristallarında şüalanmadan öncə və sonra termal aktivliyin bütün

aralıqlarda dominant olması tapılmışdır.

Aparılan tədqiqatlardan məlum olmuşdur ki, nümunənin şüalanmadan öncə V – A xarakteristikası xətti və gərginlik oxuna nəzərən kiçik bucaq altında meyillidir (slope) və bu hal ilkin nümunənin nisbətən böyük müqavimətə malik olmasını göstərir. Eyni zamanda, xəttin gərginlik və cərəyan oxlarının sıfır nöqtələrinə nəzərən simmetrik olması nümunələrin kifayət qədər təmiz olmasının göstəricisidir. Lakin, neytron selinin təsir müddətinin artması ilə nanomaterialın V – A xarakteristikasında bucaq dəyişməsi (slope) müşahidə olunur. Belə ki, 3C-SiC nanokristallarının neytronlarla şüalanmadan öncə və sonra V – A xarakteristikasında müşahidə olunan əyrilərin gərginlik oxu ilə əmələ gətirdiyi bucaq, neytronlarla şüalanmadan sonra kəskin artır. Digər tərəfdən məlumdur ki, bu bucağın kotangensi birbaşa nümunənin müqavimətini xarakterizə edir:  $\text{ctg}\alpha = R$ . Neytron seli ilə şüalanmadan sonra əyrilərin gərginlik oxu ilə əmələ gətirdiyi bucağın artması nümunənin müqavimətinin azalmasına səbəb olur. Beləliklə, neytron selinin təsiri ilə nümunələrin elektrik keçiriciliyi artır ki, bu da digər təcrübələrdə təstiq edilmişdir. Əvvəlki təcrübələrə oxşar olaraq, bu artımı neytronlarla çevrilmələr, rabitə sürüşməsi (dangling bonds), defekt və ya əlavə yükdaşıyıcıların yaranması ilə izah etmək olar. Neytron selinin təsiri ilə cərəyan – müqavimət və gərginlik – müqavimət asılılıqlarında da sürüşmələr müşahidə olunmuşdur.

**Altıncı fəsil**də neytron selinin nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin dielektrik və paramaqnit xassələrinə təsiri ətraflı şərhlə edilmişdir. 3C-SiC nanokristallarının dielektirik xüsusiyyətləri tezliyin 0.1Hz – 2.5MHz və temperaturun 100-400K aralıqlarında nəzərdən keçirilmişdir. İlkin halda və neytron selinin təsirinə məruz qalmış nanomaterialın dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissələrinin tezlik asılılıqları müqayisəli analiz edilmişdir. Analizlər nəticəsində məlum olmuşdur ki, neytron selinin təsiri ilə nano SiC-in dielektrik nüfuzluğu ümumi tendensiyada artır. Neytron selinin təsiri nəticəsində nanokristallik 3C-SiC – də əlavə aşqar elementlərin yaranması məlum olmuşdur. 3C-SiC nanomaterialında yaranmış yeni aşqar elementlərin konsentrasiyasının artması dielektrik polyarlaşmaya birbaşa təsir edir. Əlavə olaraq, 3C-SiC

nanohissəciklərinin aralıq səthdə (nanoparticles interfaces) polyarlaşması dispersiya hallarının yaranmasına səbəb olur. Nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində ionik polyarlaşmanın dominant olması tapılmışdır. Təcrübələrdən alınmış nəticələrdə müşahidə olunan piklərin və digər effektlərin mexanizmi verilmişdir. Əlavə olaraq, ilkin halda və müxtəlif müddətlərdə kəsilməz olaraq neytron selinin təsirinə məruz qalmış kubik modifikasiyalı nano silisium karbidin (3C-SiC) dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissələrinin temperatur asılılıqları bu fəsildə ətraflı şərh edilmişdir. Nümunələrin dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissələrinin temperatur asılılıqları şüalanmadan öncə və sonra tədqiq edilmişdir. Radiasiya effektləri şüalanmamış nümunələrin müqayisəli analizləri ilə öyrənilmişdir. Neytron selinin təsir müddətinin artması ilə polyarlaşmanın artması müşahidə olunmuşdur. Aşağı və yuxarı temperaturalarda iki dispersiya rejimi (dispersion regimes) müşahidə olunur. Aşağı tezliklərdə müşahidə olunan dispersiya hallarını polyarlaşma yanaşmasına (polarization phenomena) əsasən səth yükləri və ya nonohissəciklərin aralıq səthində (nanoparticles interfaces) polyarlaşması ilə izah etmək olar. Yuxarı tezlikləri isə, yükdaşıyıcıların yürüklüyündən asılı relaksasiya müddəti (relaxation process associated with the charge carriers' mobility) izah edir. Tədqiqat işində dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissələri bir koordinat sistemində nəzərdən keçirilmişdir. Aşağı tezliklər oblastında dielektrik itki faktoru dominantlıq (the dielectric loss factor ( $\epsilon''$ ) is dominated) təşkil edir. Nisbətən yuxarı tezliklər oblastında dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsi dominant olur. Ümumi yanaşmada, ionik yükdaşıyıcılar mövcud olan materiallarda bu tip asılılıq tipikdir. Sıçrayışlı keçiricilik və ya yükdaşıyıcıların tələlərdə toplanması halları bu tip asılılıqlarda qəbul olunandır. Təcrübələr aparılan tezliklər oblastında bütün hallarda dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissələrinin ayrılması kəşifdir. Əyrilərin kəşifmə nöqtələri temperatur və şüalanmanın təsirindən tezliyin artması istiqamətində sürüşür. Bu isə onu deməyə əsas verir ki, temperatur və şüalanma nəticəsində ionik polyarlaşma dərəcəsi artır. Digər tərəfdən şüalanma nəticəsində nümunə daxilində yaranan əlavə aşqar elementlər də mövcud sürüşməyə səbəb ola bilər. Kəşifmə



nöqtəsindən yuxarı tezliklər oblastında Jonscherin “universal dielektrik izahı” (Jonscher’s “universal dielectric response”) izlənilir. Yüksək tezliklərdə dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissələrinin ədədi qiymətlərində kəskin dəyişikliklər müşahidə olunmuşdur. Eyni zamanda, bu tezliklərdə dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissələri demək olar ki, xətti xarakter daşıyır. Yüksək tezliklərdə dielektrik nüfuzluğunun xəyali hissələri də həqiqi hissələrdə olduğu kimi demək olar ki, xətti xarakter daşıyır. 0.5MHz – 2.5MHz tezlik aralıqlarında dielektrik nüfuzluğunun xəyali hissələrində neytronla şüalanmanın təsir effektləri açıq aşkar müşahidə olunur. Digər tərəfdən yüksək tezliklər oblastında dielektrik nüfuzluğunun ədədi qiyməti kəskin azalır. Tezliyin artmasına mütənəsib olaraq dielektrik nüfuzluğunun ədədi qiymətinin azalmasına səbəb yükdaşıyıcıların elektrik sahəsinin təsiri ilə fəallaşması ola bilər. Ümumilikdə, dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissələrində şüalanmadan sonra artma müşahidə olunur. Bu artmanı neytron selinin təsiri nəticəsində nümunə daxilində yaranmış əlavə yükdaşıyıcıların ekstra polyarlaşması kimi qiymətləndirmək olar.

Eyni zamanda, bu fəsildə, 3C-SiC nanokristallarının dielektrik itkiləri neytronlarla şüalanmadan öncə və sonra müqayisəli öyrənilmişdir. Təcrübələr tezliyin 0,1Hz – 2.5MHz aralığında və temperaturun 100K-400K aralığında (25K addım ilə) aparılmışdır. Ümumi yanaşmada, istər  $f(\tan\delta) \sim f(f)$  və istərsə də  $f(\tan\delta) \sim f(T)$  asılılıqlarında neytronlarla şüalanmadan sonra dielektrik itkilərində artma açıq aydın müşahidə olunmuşdur. Bu artım adətən, neytron çevrilmələri, rabitə sürüşməsi (dangling bonds), defekt və ya əlavə yükdaşıyıcıların yaranması ilə izah edilir. 3C-SiC nanokristallarında  $f(\tan\delta) \sim f(f)$  asılılığında tezliyin artması ilə dielektrik itkiləri azalır və tezliyin müəyyən qiymətlərində “əyilmə” halları mövcuddur ki, bu da fəsildə ətraflı izah edilmişdir. Defektlər, orientasiya və ya dipol polyarizasiyası səbəbindən  $f(\tan\delta) \sim f(T)$  asılılıqlarında temperaturun artması ilə dielektrik itkilərinin artması müşahidə olunmuşdur. Eyni zamanda tezliyin müəyyən qiymətindən sonra itkilərin tezlikdən asılılığı sanki azalır. Bunu isə polyarlaşmanın bu uyğun tezliklərdən sonra kəskin azalması ilə əlaqələndirmək olar. Eyni zamanda,

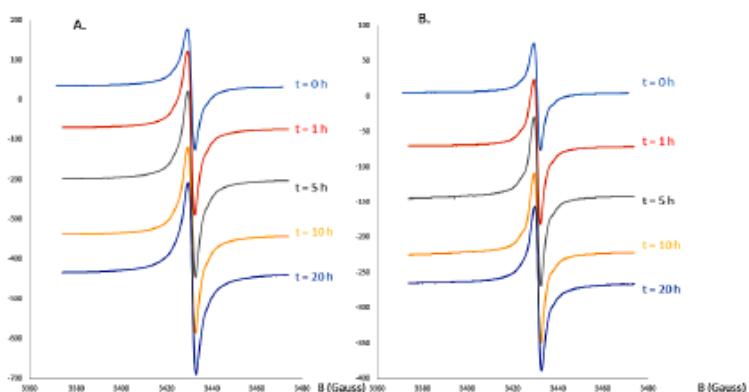
neytronlarla şüalanmadan sonra mövcud asılılıqda “əyilmə halı” tezliyin artması istiqamətində sürüşür. Ola bilsin ki, bunun səbəbi, neytronlarla şüalanma nəticəsində əlavə yükdaşıyıcıların və ya aşqar elementlərin daha çox polyarlaşmasıdır. Digər tərəfdən, neytronlarla şüalanmadan sonra dielektrik itkilərinin ədədi qiymətində müəyyən qədər artma müşahidə olunur. Bunu isə neytronlarla şüalanma zamanı nümunə daxilində yaranan defektlərlə izah etmək olar. Yaranmış defektlər yükdaşıyıcıların hərəkətinə müəyyən qədər təsir edərək onları ləngidir və bunun nəticəsində dielektrik itkilərinin ədədi qiyməti müəyyən qədər artır. Əlavə olaraq, neytronlarla şüalanmadan sonra yeni yükdaşıyıcıların polyarizasiyası da itkilərin qismən artmasına təsir göstərə bilər. Digər tərəfdən, fərqli müddətlərdə neytronlarla şüalanma zamanı baş verən dəyişiklikləri müşahidə etmək üçün temperaturun 100K, 200K, 300K və 400K sabit qiymətlərində dielektrik itkilərinin tezlik asılılıqları nəzərdən keçirilmişdir.

Temperaturun təqribən 350K qiymətindən dielektrik itkilərinin azalması aşağı tezlikərdə aşkar müşahidə olunur. 3C-SiC nanokristallarında bu azalma metal-yarımkeçirici keçidi ilə bağlı ola bilər. Əlavə olaraq, neytronlarla şüalanma nəticəsində dielektrik itkilərində artma temperatur asılılıqlarında da müşahidə olunmuşdur. Eyni zamanda neytronlarla şüalanmadan sonra metal-yarımkeçirici keçidi çox az miqdarda temperaturun azalması istiqamətində sürüşür. Ümumiyyətlə, bu materiallarda metal-yarımkeçirici keçidini neytron çevrilmələri, rabitə sürüşməsi (dangling bonds), defekt və ya əlavə yükdaşıyıcıların yaranması ilə izah etmək mümkündür. Digər tərəfdən müxtəlif sabit tezliklərdə  $f(\tan\delta) \sim f(T)$  asılılıqlarından neytron selinin təsiri aşkar müşahidə olunmuşdur.

Digər tərəfdən, bu fəsildə nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində paramaqnit mərkəzlər və onların təbiəti neytronlarla şüalanmadan öncə və sonra müqayisəli öyrənilmişdir. Elektron Paramaqnit Rezonans (EPR) spektrik analizlər maqnit sahəsinin 0.05 - 0.55 T (500 - 5500 Gauss) qiymətlərində aparılmışdır. Daha çox paramaqnit mərkəzlər müşahidə olunan 0.3270 - 0.3370 T oblastı əlavə olaraq nəzərdən keçirilmişdir. Neytronlarla şüalanmanın yaranan yeni izotopların,  $V_{Si}^-$  və  $V_C^+$  vakansiyalarının konsentrasiyasına təsiri

öyrənilmişdir. Xarici sahənin 3300G ətrafında mövcud lokal hallara uyğun  $g$  – faktorun fərqli qiymətlərində paramaqnit mərkəzlərin sayı hesablanmışdır. Neytron şüalanmadan sonra paramaqnit mərkəzlərin sayında mövcud artıma səbəb olan bilən mexanizmlər irəli sürülmüşdür.

Şəkil 10-da sərbəst elektron regionunda seçilmiş aralıklarda EPR spektrləri təsvir edilmişdir. Sərbəst elektron regionunda mövcud siqnalların dayanıqlılıq dərəcəsinə yoxlamaq və həmçinin sərbəst radikallarla sürətli relaksasiya hallarını ayırmaq məqsədi ilə iki fərqli gücdə EPR spektrləri nəzərdən keçirilmişdir (Şəkil 10 a və b).



**Şəkil 10. Sərbəst elektron regionunda fərqli güclərdə seçilmiş diapozonlarda EPR spektrləri (EPR parametrləri: mərkəzi sahə 3320 G = 3.320 mT, sweep = 100 G = 10 mT, modulasiya amplitudu 0.1 mT, qəbuledici artımı 10, mikrodalğa gücü A. 20 mW, B. 2 mW).**

Doyma həddində aparılan EPR analizlərindən mövcud siqnalların kifayət qədər dayanıqlı olması tapılmışdır. Məlum olmuşdur ki,  $g$  faktorun 2.006 qiymətində müşahidə olunan siqnal iki komponentdən ibarətdir (Cədvəl). Biri çox güclü siqnaldır ki, bu da 20mVt gücdə 3300G – da, 2mVt gücdə isə 3030G – da müşahidə olunur. Digəri isə çox genişdir və spektrlərdən aydın müşahidə olunmur. Cədvəldən şüalanma müddətinin artması ilə ümumi

yanaşmada sərbəst radikalların sayının artması asanlıqla görünür. Həmçinin, şüalanma müddətinin artması ilə sərbəst elektronlara uyğun mərkəzlərin ( $g$  – faktorun 2.006 qiymətində) sayının da təqribən iki dəfəyə qədər artması müşahidə olunur. Belə ki, şüalanmadan öncə sərbəst elektronlara uyğun mərkəzlərin sayı  $3.1 \times 10^{16}$  mərkəz/sm<sup>3</sup> (ümumi mərkəzlərin sayı  $4.5 \times 10^{18}$  mərkəz/sm<sup>3</sup>) olduğu halda, 20 saata qədər şüalanmadan sonra bu sayı  $5.7 \times 10^{16}$  mərkəz/sm<sup>3</sup> qədər (ümumi mərkəzlərin sayı  $8.0 \times 10^{18}$  mərkəz/sm<sup>3</sup>) artmışdır.

**Cədvəl. Nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində neytronlarla şüalanmadan öncə və sonra paramaqnit mərkəzlərin sayı ( $N_{\gamma,m}$  uyğun şüalanma müddətində,  $N_0$  şüalanmadan öncə olan mərkəz sayıdır)**

Neytron seli ilə şüalanma zamanı (saat)	$g$ – faktorun ədədi qiyməti	Ümumi mərkəzlər ( $N_{\gamma,m} - N_0$ , m./cm <sup>3</sup> )	$g = 2.006$ uyğun mərkəzlər ( $N_{\gamma,m} - N_0$ , m./cm <sup>3</sup> )
0	2.29 2.006	0	0
1	2.13 2.006	$1.5 \times 10^{18}$	$0.7 \times 10^{16}$
5	2.58 2.13 2.006	$1.6 \times 10^{18}$	$1.5 \times 10^{16}$
10	2.34 2.006	$3.3 \times 10^{18}$	$2 \times 10^{16}$
20	2.13 2.006	$3.5 \times 10^{18}$	$2.7 \times 10^{16}$

**Yeddinci fəsilə** neytron selinin nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin termik xassələrinə təsiri nəzərdən keçirilmişdir. Kubik modifikasiyalı nanokristallik silisium karbid (3C-SiC) hissəciklərinin termik işlənmə sürətindən aslı olaraq DSC (Differential Scanning Calorimetry), TGA (Thermogravimetric Analysis) və DTG

(Differential Thermogravimetric Analysis) analizləri aparılmışdır. 99,5+ % təmizlik dərəcəsinə malik silisium karbid nanohissəciklərinin 300-1270K temperatur intervalında, 5, 10, 15 və 20 K/dəq termik işlənmə sürətləri ilə yaranan termik effektlərin kinetik parametrləri (istilik axını, oksidləşmə reaksiya sürəti və aktivləşmə enerjisi) təyin olunmuşdur. Fərqli termik işlənmə sürətlərində nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin aktivləşmə enerjiləri Arenius yavaşması ilə hesablanmışdır. Nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin oksidləşmə dərəcəsi temperaturun 1270K qiymətinə qədər öyrənilmişdir.

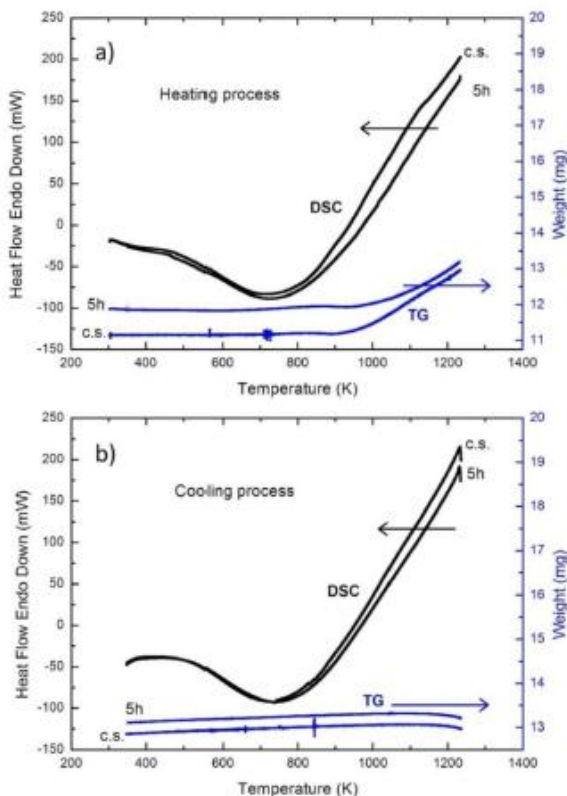
Qızma və soyuma proseslərində nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin DSC və TG spektrləri neytron seli ilə şüalanmadan öncə və sonra müqayisəli verilmişdir (Şəkil 11). Şəkildən görüldüyü kimi temperaturun təqribən 800K qiymətinə qədər DSC spektrlərində mühiti tərk edən əlavə qatışıqlar mövcuddur (Şəkil 11 a). Lakin, sistemi tərk edən qatışıqların miqdarı çox kiçik olduğundan TG spektrində dəyişiklik müşahidə olunmur. Temperaturun  $T > 800K$  qiymətlərində DSC əyrilərində stabilləşmə müşahidə olunur.

Digər tərəfdən TG əyrilərində temperaturun  $T > 900K$  qiymətlərindən başlayaraq kütlə artması müşahidə edilir. Mövcud bu proses adətən oksidləşmə ilə izah edilir. Bu öz təsdiqini soyuma prosesində göstərir. Belə ki, soyuma prosesində demək olar ki, TG spektrlərində heç bir dəyişiklik müşahidə edilmir (Şəkil 11 b). 3C-SiC nanokristallarının DSC və TG spektrlərinə neytron seli xarakter cəhətdən heç bir dəyişiklik yaratmır. Lakin neytron seli istilik mübadiləsi zamanı ədədi qiymətin dəyişməsinə səbəb olur. Digər tərəfdən neytron selinin təsiri nəticəsində oksidləşmə prosesi nisbətən ləng gedir (Şəkil 11 a). Bu isə ola bilsin ki,  $^{31}\text{Si} \rightarrow (\beta\text{-parçalanma}) \text{ } ^{31}\text{P}$  nüvə çevrilmələri nəticəsində daha çox dayanıqlı yeni P izotoplarının konsentrasiyasının artması ilə bağlıdır.

3C-SiC nanohissəcikləri üçün sərbəst Gibbs enerjisinin temperatur asılılıqları təcrübi nəticələrə uyğun olaraq hesablanmışdır. Sərbəst Gibbs enerjisi neytron seli ilə şüalanmadan öncə və sonra, qızma və soyuma proseslərində ayrı – ayrılıqda hesablanmışdır. Nisbətən aşağı temperaturlarda sərbəst Gibbs enerjisinin ədədi qiyməti 0 ətrafındadır və bəzən mənfi qiymətlər alır. Sərbəst Gibbs

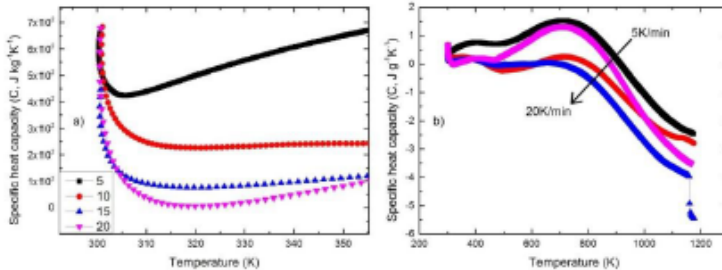


enerjisinin ədədi qiyməti sıfır ətrafında dəyişməsi sistemin tarazlıqda olmasını izah edir. Digər tərəfdən, sərbəst Gibbs enerjisinin ədədi qiymətinin mənfi olması sistemdə baş verən proseslərin spontan və sistem tarazlıq halına doğru irəliləyən olmasının göstəricisidir. Temperaturun  $T > 800\text{K}$  qiymətlərində sərbəst Gibbs enerjisinin ədədi qiyməti müsbətdir və bu halda sistemdə baş verən proseslər spontan deyil.



Şəkil 11. Nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin neytron seli ilə şüalanmadan öncə (c.s.) və sonra (5h) DSC və TG spektrləri (a) qızdırılma prosesi, b soyuma prosesi).

Fərqli termik işlənmə sürətlərində nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin xüsusi istilik tutumunun temperaturdan asılılıq ayrıları şəkil 12-də verilmişdir. Xüsusi istilik tutumunun seçilmiş aşağı temperatur oblastında (300 K – 350 K temperatur aralığında) qızdırılma dərəcəsi ilə mütanasiblik mövcuddur (Şəkil 12a). Lakin, xüsusi istilik tutumunun temperatur asılılığında geniş temperatur (300K – 1200K) oblastında xaotiklik müşahidə olunur (Şəkil 12b). Xüsusi istilik tutumunun ədədi qiyməti aşağı temperatur oblastında SiC üçün xarakterik ( $750 \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) qiymət ətrafındadır. Lakin temperaturun artması ilə kəskin kənarçıxmalar mövcuddur. Temperaturun təqribən  $T \geq 800\text{K}$  qiymətlərində xüsusi istilik tutumunun ədədi qiyməti mənfi olur. Bu isə onu deməyə əsas verir ki, nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində  $T \geq 800\text{K}$  temperaturlarda ekzotermik effektlər müşahidə olunur. Belə ki, bu halda təcrübə aparılan cihazda nümunə olan qabın (pənin) temperaturu nümunənin temperaturundan aşağıdır. Digər tərəfdən xüsusi istilik tutumunun ədədi qiyməti temperaturun 300K-800K aralıklarında müsbətdir və ya ümumi yavaşmada endotermik proseslərə uyğundur.



**Şəkil 12. Nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin fərqli termik işlənmə sürətlərində xüsusi istilik tutumunun temperatur asılılıqları (a seçilmiş aralıqda, b geniş aralıqda).**

Nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin fərqli termik işlənmə sürətlərində kütləsinin temperaturundan asılı olaraq dəyişmə asılılıqları ətraflı nəzərdən keçirilmişdir. Məlum olmuşdur ki, temperaturun artması ilə ümumi yavaşmada kütlədə çox az dəyişmə

müşahidə olunur. Temperaturun təqribən  $T < 800^{\circ}\text{S}$  qiymətində az miqdarda azalma müşahidə olunur ki, bunu da nümunə daxilinə adsorbsiya olunmuş əlavə qanışıqlarla izah etmək olar. Lakin temperaturun təqribən  $T > 800^{\circ}\text{S}$  qiymətindən başlayaraq kütlədə az miqdarda artma müşahidə olunur. Bunun isə səbəbi oksidləşmə ola bilər, lakin bunu təsdiqləmək üçün daha çox analitik işlərə ehtiyac vardır. "Pyris Manger" proqram təminatının köməyi ilə oksidləşmə dərəcəsinin temperatur asılılığı çıxarılmışdır. Məlum olmuşdur ki, nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində temperaturun 1270 K qiymətinə qədər oksidləşmə çox azdır. Xüsusən temperaturun təqribən 1000K qiymətinə qədər oksidləşmə demək olar ki yoxdur. Lakin temperaturun 1000K – dən böyük qiymətlərində çox cüzi oksidləşmə müşahidə olunur və praktik olaraq ümumi yanışmada oksidləşmə dərəcəsi sıfıra yaxındır. Bu isə bu tip materialların yüksək temperaturda oksidləşməyə dayanıqlı olmasını sübut edir.

Fərqli müddətlərdə neytron selinin təsirinə məruz qalmış nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin istilik selinin temperaturdan asılılıq (DSC) spektri izah edilmişdir. Ümumi yanışmada istilik axınının temperatur asılılığında neytronlarla şüalanmadan asılılıq çox azdır və xaotiklik müşahidə olunur. Aparılan tədqiqatlardan məlum olmuşdur ki, neytronlarla şüalanmadan öncə və sonra nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində baş verən termik prosesləri əsasən bir hissə ilə izah etmək olar. Digər kiçik kənaraxıma, atmosferdən adsorbsiya olunan suyun və ya digər aşqar elementlərin sistemdən çıxması kimi qiymətləndirilə bilər. Belə ki, bu mərhələ temperaturun təqribən 400K qiymətində yekunlaşır. Əsas mərhələ isə temperaturun təqribən 800K qiymətinə qədər davam edir. Nanomateriallar çox böyük xüsusi səth sahəsinə (Specific Surface Area - SSA) malik və səthi aktiv olduğu üçün, ilkin yanışmada ehtimal olunur ki, bu mərhələdə atmosferlə təmasdan səthədən asılı hala düşən su və ya digər birləşmələr nanohissəciyi tərk edir. Bu proses təqribən temperaturun 800K qiymətinə qədər davam edir.

Temperaturun  $800 < T < 1300\text{K}$  intervalında sistemə verilən enerji sadəcə nümunənin qızmasına sərf olunur və digər effektlər müşahidə olunmur. Lakin, soyuma prosesində də analoji halın müşahidə olunması 800K temperaturda sistemdən asılı maddələrin

sistemi tərk etməsi fərziyyəsinə müəyyən mənada ziddiyyət yaranır. Belə olan hal, adətən Debay temperaturu ilə az və ya çox dərəcədə izah olunur. Lakin, baxılan haldan fərqli olaraq, ədəbiyyatlarda silisium karbid üçün Debay temperaturu 1270K – dir. Belə olan halda, SiC nanohissəciklərində Debay temperaturunun ölçüntün təsiri ilə 800K temperatura qədər azalmasını iddia etmək olar. Soyuma proseslərində mövcud pik, ola bilsin ki, ətrafdan sistemə yenidən daxil olan aşqar materiallarla əlaqəlidir.

Əlavə olaraq, silisium karbid nanohissəciklərinin 300÷1270K temperatur intervalında, 5, 10, 15 və 20 K/dəq termik işlənmə sürətlərində xüsusi istilik tutumu və Gibbs enerjisi təyin olunmuşdur. Fərqli termik işlənmə sürətlərində nanokristallik 3C-SiC hissəciklərindən təşkil olunmuş sistemin entalpiya və entropiyası hesablanmışdır (nəzəri hesablamalar təcrübi nəticələr ilə əsaslandırılmışdır). Təcrübi nəticələrdən alınmış qiymətlər bütün termofiziki parametrlər üçün fərqli termik işlənmə sürətlərində müqayisəli öyrənilmişdir. Eyni zamanda TRIGA Mark II tipli tədqiqat nüvə reaktorunda 5 saata qədər neytron seli ( $2 \times 10^{13}$  n/sm<sup>2</sup>·san) ilə şüalandırılmış nanokristallik silisium karbid (3C-SiC) hissəciklərinin DSC, TGA və DTG analizləri aparılmışdır. Neytron seli ilə modifikasiya olunmuş nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin oksidləşmə dərəcəsi temperaturun  $300K < T < 1300K$  intervalında öyrənilmişdir. Şüalanmadan öncə və sonra TGA və DSC əyrlərində bəzi effektlər müşahidə edilmiş və izahı verilmişdir. Məlum olmuşdur ki, neytron seli istilik mübadiləsi zamanı ədədi qiymətin dəyişməsinə səbəb olur. Əlavə olaraq, neytron selinin təsiri nəticəsində oksidləşmə prosesi nisbətən ləng getməsi göstərilmişdir. Xüsusi istilik tutumunun ədədi qiymətinin 3C-SiC nanokristalları üçün xarakterik ( $500 \div 750 \text{ C} \cdot \text{kq}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) qiyməti müəyyən edilmişdir.

## ƏSAS NƏTİCƏLƏR

1. HRTEM analizləri ilə yüksək böyütmədə kristal qəfədə mövcud atomlar müşahidə olunmuş və 3C-SiC hissəciklərinin nanokristallik təbiəti müəyyən edilmişdir. Neytronlarla şüalanma intensivliyinin yüksək qiymətlərində ( $1.5 \times 10^{18}$  neytron/sm<sup>2</sup>) nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin səthində qalınlığı ~3nm olan amorf təbəqənin yaranması HRTEM təsvirləri ilə aşkar olunmuşdur. TEM və SEM analizlərindən məlum olmuşdur ki, neytron selinin təsiri nəticəsində nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində nadir hallarda maksimum 70-80 nm tərtibində aqloremasiya mövcuddur.  $k_0$ -INAA üsulu ilə nanomaterialın təmizlik dərəcəsinin 99.5+%- olması və material daxilində mövcud qatışıq elementlərin məxsusi miqdarları təyin edilmişdir.

2. 3C-SiC nanokristallarında mövcud silisium və karbon izotoplarında neytron selinin maksimum zəbtinə uyğun effektiv enerjisi qiymətləndirilmişdir. <sup>28</sup>Si, <sup>29</sup>Si və <sup>30</sup>Si izotoplarında udulma spektrlərində müşahidə olunan rezonans halların minimal enerjisi uyğun olaraq təqribən  $5 \cdot 10^{-2}$  MeV,  $10^{-2}$  MeV və  $10^{-3}$  MeV kimi tapılmışdır. Neytronların enerjisinin  $10^{-3}$  MeV qiymətindən başlayaraq <sup>30</sup>Si izotopunda neytron zəbti nəticəsində nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində <sup>31</sup>P izotopunun yaranması göstərilmişdir. 3C-SiC nanokristallarında digər (n, p), (n, α), (n, γ) və (n, n') çevrilmələrinin enerjisi Si və C izotopları üçün uyğun olaraq 3-7MeV və 10-20MeV aralıqlarında təyin edilmişdir.

3. Məlum olmuşdur ki, nanokristallik 3C-SiC hissəciklərdə kristal strukturu dəyişmədən neytron transmutasiya üsulu ilə donor aşqarları yaratmaq mümkündür. Şüalanmadan öncə və sonra 3C-SiC politipinin strukturunda heç bir dəyişikliyin olmaması SAED, EDP və rentgenstruktur analizləri ilə göstərilmişdir. 3C-SiC nanokristallarının strukturuna uyğun qəfəs parametrləri  $a=b=c=4.377565$  və  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$  kimi müəyyən olunmuşdur.

4. Neytron selinin təsiri ilə 3C-SiC nanokristallarında n – tip aşqarların yaranması nəticəsində RIC keçiriciliyinin meydana gəlməsi müşahidə olunmuşdur. Yaranan aşqar konsentrasiyasının artması nəticəsində 3C-SiC nanokristallarının elektrik keçiriciliyi



ədədi qiymətə  $\sim 5.5$  dəfə artır. Hesablanmış elektrik aktivləşmə enerjilərinin ədədi qiymətinin neytron selinin təsir müddətinin (başqa sözlə aşqar konsentrasiyasının) və tezliyin artması ilə azalması müşahidə edilmişdir.

5. Neytron seli ilə modifikasiya olunmuş nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin impedans spektrlərində rezonans hallar müşahidə olunmuş və relaksasiya müddətlərinin  $3.5 \times 10^{-2}$  saniyədən  $1.7 \times 10^{-4}$  saniyəyə qədər azalması aşkarlanmışdır. 3C-SiC nanokristallarının kompleks impedans spektroskopiyasından keçiriciliyin əsasən yarımkəçirici davranışı müəyyən edilmişdir. Tezliyin 0.1MHz, 1MHz və 2.5MHz qiymətlərinə uyğun olaraq  $T_{MS} = 250K, 325K$  və  $370K$  temperaturalarda 3C-SiC nanokristallarında metal-yarımkəçirici keçidi baş verir. Ümumi yanaşmada,  $f \geq 0.1MHz$  tezlik və  $T < T_{MS}$  temperatur intervallarında 3C-SiC nanokristallarında metallik davranış müşahidə olunmuşdur. Neytron çevrilmələri, rəbitə sürüşməsi, defekt və ya əlavə yükdaşıyıcıların yaranması nəticəsində  $T_{MS}$  – in ədədi qiymətinin şüalanma müddətinə mütənəşib olaraq azalması müəyyən edilmişdir.

6. 3C-SiC nanokristallarının neytron seli ilə aşqarlanması nəticəsində xətti Volt – Amper xarakteristikasında bucaq meylinin dəyişməsi 3C-SiC nanokristallarının müqavimətinin neytronlarla aşqarlandıqdan sonra  $4 M\Omega$ -dan  $1 M\Omega$ -a qədər azalması ilə əlaqələndirilmişdir. Fovler–Nordheim asılılıqlarından şüalanmadan öncə və sonra 3C-SiC nanokristallarında birbaşa tunel keçidinin mövcudluğu və termal aktivliyin bütün tədqiq olunan aralıqlarda dominant olması məlum olmuşdur.

7. Neytron seli ilə modifikasiya zamanı məlum olmuşdur ki, 3C-SiC nanohissəciklərinin aralıq səthdə polyarlaşması dispersiya hallarının yaranmasına səbəb olur. Tədqiqatlar nəticəsində müşahidə olunan bütün dielektrik asılılıqlarının Havriliak–Negami fenomenoloji tənliklərinə uyğunluğu aşkarlanmış və ion polyarlaşmanın dominant olması tapılmışdır.

8. Neytron selinin təsiri nəticəsində nanokristallik 3C-SiC hissəciklərində  $n$  – tip aşqarların konsentrasiyasına uyğun  $g$  faktorun 2.006 qiymətində güclü siqnal müşahidə edilmişdir. Neytronlarla şüalanma müddətinin artması ilə, mövcud EPR siqnalın

intensivliyində artma və yeni siqnallar müşahidə olunmuşdur. Neytronlarla şüalanma zamanı 3C-SiC nanokristallarında əlavə  $^{29}\text{Si}$  və ya  $^{13}\text{C}$  izotoplarının yaranması aşkar olunmuşdur. Neytronlarla şüalanma nəticəsində anizotropik və izotropik strukturlu Si ( $V_{\text{Si}}^-$ ) və C ( $V_{\text{C}}^+$ ) vakansiyalarının yaranması müəyyən edilmişdir. Neytronlarla şüalanmadan sonra g – faktorun fərqli qiymətlərində yeni yaranan paramaqnit mərkəzlərin ümumi sayı  $3.5 \times 10^{18}$  mərkəz/ $\text{sm}^3$  kimi tapılmışdır. Neytronlarla şüalanma nəticəsində yeni yaranmış sərbəst elektronlara uyğun mərkəzlərin (g – faktorun 2.006 qiymətində) sayı  $2.7 \times 10^{16}$  mərkəz/ $\text{sm}^3$  olmuşdur ki, bunun da böyük əksəriyyəti n – tip aşqarların payına düşür.

9. 3C-SiC nanokristallarında tezliyin artması ilə, dielektrik itkilərinin azalması və  $f(\text{tg}\delta) \sim f(T)$  asılılıqlarında temperaturun artması ilə dielektrik itkilərinin artması aşkarlanmışdır.  $f(\text{tg}\delta) \sim f(f)$  asılılığında tezliyin müəyyən qiymətlərində “əyilmə” halları və neytron seli ilə şüalanmaya mütənəsib olaraq sürüşmələr müşahidə edilmişdir ki, bunun da metal-yarımqeçirici keçidi ilə əlaqəli olması məlum olmuşdur. Hər iki,  $f(\text{tg}\delta) \sim f(f)$  və  $f(\text{tg}\delta) \sim f(T)$  asılılıqlarında neytronlara şüalanmadan sonra dielektrik itkilərinin ədədi qiymətində kiçik miqdarda artma müşahidə edilmişdir.

10. 3C-SiC nanokristallarının termal analizlərindən məlum olmuşdur ki, şüalanmadan öncə temperaturun 1270K qiymətinə qədər nanohissəciklər çox böyük termik davamlılığa malikdir. Şüalanmadan öncə 3C-SiC nanokristallarında təqribən  $800\text{K} < T < 1270\text{K}$  temperatur intervalında çox az miqdarda oksidləşmə müşahidə edilmişdir. Oksidləşmə dərəcəsinin neytron çevrilmələri nəticəsində yaranmış yeni izotopların təsiri ilə azalması məlum olmuşdur. 3C-SiC nanokristalları üçün xarakterik Debay temperaturunun 1200K – dən 800 K - ə qədər azalması məlum olmuşdur. DSC spektroskopiyası ilə, nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin şüalanmadan öncə və sonra termal aktivləşmə enerjisinin 120kC/mol və xüsusi istilik tutumunun  $500 \div 750\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$  qiyməti ətrafında olması məlum olmuşdur.

DİSSERTASIYANIN ƏSAS NƏTİCƏLƏRİ ÜZRƏ ÇAP  
OLUNMUŞ ELMİ İŞLƏRİN SİYAHISI

1. Huseynov, E., Anze, J., Luka, S. Temperature vs. impedance dependencies of neutron-irradiated nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC) // Applied Physics A, –2019, 125, – p. 91-98.
2. Huseynov, E., Anze, J. EPR spectroscopic studies of neutron-irradiated nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC) // Silicon, – 2019, 11, – p. 21-27.
3. Huseynov, E.M. Current-voltage characteristics of neutron irradiated nanocrystalline silicon carbide (3CSiC) // Physica B: Condensed Matter, – 2018, 544, – p. 23-27.
4. Huseynov, E.M. Electrical impedance spectroscopy of neutron-irradiated nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC) // Applied Physics A, – 2018, 124, – p. 191-198.
5. Huseynov, E.M. Neutron irradiation, amorphous transformation and agglomeration effects on the permittivity of nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC) // NANO, – 2018, 13 (3), – p. 1830002.
6. Huseynov, E.M. Dielectric loss of neutron-irradiated nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC) as a function of frequency and temperature // Solid State Sciences, – 2018, 84, – p. 44-50.
7. Huseynov, E.M. Neutron irradiation effects on the temperature dependencies of electrical conductivity of silicon carbide (3C-SiC) nanoparticles // Silicon, – 2018, 10, – p. 995–1001.
8. Huseynov, E.M. Neutron activation analysis of 3C-SiC nanoparticles under the neutron flux // Journal of Radiation Researches, – 2018, 5 (1), – p. 20-26.
9. Hüseynov, E.M. Nanokristallik silisium karbid (3C-SiC) hissəciklərində neytron zəbtinin tədqiqi // – Bakı: Azerbaijan Journal of Physics, – 2018, 24 (AZ1), – s. 3-7.
10. Hüseynov, E.M. Neytron selinin təsiri ilə nanokristallik silisium karbid (3C-SiC) hissəciklərində (n, p) və (n,  $\alpha$ ) çevrilmələri // – Bakı: AMEA – nın Xəbərləri, Fizika-texnika və riyaziyyat elmləri seriyası, fizika və astronomiya, – 2018, 38 (2), – s. 15-22.
11. Hüseynov, E.M., Əliyeva, Ü.S., Mürzəyev, M.N. Silisium karbid (3C-SiC) nanokristallanna neytron selinin təsirinə DSC

spektroskopiyası ilə öyrənilməsi // – Bakı: Bakı Universitetinin Xəbərləri, Fizika-riyaziyyat elmləri seriyası, – 2018, № 3, – s. 160-170.

12. Hüseynov, E.M. Nanokristallik silisium karbid (3C-SiC) hissəciklərində neytron selinin təsiri ilə defekt hallarının yaranması // – Bakı: Azerbaijan Journal of Physics, – 2018, 24 (AZ2), – s.3-10.

13. Hüseynov, E.M., Əliyeva, Ü.S., Mirzəyev, M.N. Neytron selinin təsiri altında nanokristallik silisium karbid (3C-SiC) hissəciklərinin DTA, TGA və DTG spektroskopik analizləri // – Bakı: AMEA – nın Xəbərləri, Fizika-texnika və riyaziyyat elmləri seriyası, fizika və astronomiya, – 2018, 38 (5), – s. 65-71.

14. Huseynov, E., Anze, J. Trace elements study of high purity nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC) using  $k_0$ -INAA method // Physica B: Condensed Matter, – 2017, 517, – p. 30–34.

15. Huseynov, E.M. Permittivity-frequency dependencies study of neutron-irradiated nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC) // NANO, – 2017, 12 (6), – p. 1750068.

16. Huseynov, E.M. Investigation of the agglomeration and amorphous transformation effects of neutron irradiation on the nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC) using TEM and SEM methods // Physica B: Condensed Matter, – 2017, 510, – p. 99–103 .

17. Huseynov, E., Garibov, A. Effects of neutron flux on the temperature dependencies of permittivity of 3C-SiC nanoparticles // Silicon, – 2017, 9 (5), – p. 753–759.

18. Huseynov, E.M. EDP study of nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC) under the neutron irradiation // Journal of Radiation Researches, – 2017, 4 (2), – p. 24-30.

19. Hüseynov, E.M. Nanokristallik silisium karbid (3C-SiC) hissəciklərindən neytron selinin səpilməsi // – Bakı: Azerbaijan Journal of Physics, – 2017, 23 (AZ2), – s. 24-32.

20. Hüseynov, E.M., Mirzəyev, M.N. Nanokristallik silisium karbid (3C-SiC) hissəciklərinin termik parametrlərinin DSC metodu ilə tədqiqi // – Bakı: Bakı Universitetinin Xəbərləri, Fizika-riyaziyyat elmləri seriyası, – 2017, № 4, – s. 176-185.

21. Hüseynov, E.M., Mirzəyev M.N. DTA, TGA və DTG metodları ilə nanokristallik silisium karbid (3C-SiC) hissəciklərinin termofiziki

parametrlərinin öyrənilməsi // – Bakı: AMEA – nın Xəbərləri, Fizika-texnika və riyaziyyat elmləri seriyası, fizika və astronomiya, 2017, 37 (5), s. 48-57.

22. Huseynov, E. Neutron irradiation and frequency effects on the electrical conductivity of nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC) // Physics Letters A, – 2016, 380, – p. 3086-3091.

23. Hüseynov, E.M., Qəribov, A.A. TRIGA Mark II tipli tədqiqat nüvə reaktorunda neytron selinin təsiri ilə 3C-SiC nanohissəciklərinin radioaktivlik tədqiqi // – Bakı: Azerbaijan Journal of Physics, 2016, 22 (AZ3), s. 3-9.

24. Huseynov, E.M. Effects of neutron irradiation on the frequency dependencies of electrical conductivity of nanocrystalline 3C-SiC particles // DPG-Frühjahrstagung und EPS-CMD27, Technische Universität Berlin, Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V., Berlin, Germany, – 2018, – p.137.

25. Huseynov, E.M. Impedance study of neutron-irradiated nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC) as a function of temperature // 27th International Conference Nuclear Energy for New Europe, Slovenia, – 2018, – p.95-96.

26. Huseynov, E.M. Nanoscopic study of neutron irradiated nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC) particles // 2nd International congress on semiconductor materials and devices, Turkey, – 2018, – p. 120-121.

27. Hüseynov, E. Nanokristallik silisium karbid (3C-SiC) hissəciklərində neytronlarla şüalanma zamanı (n, p) və (n,  $\alpha$ ) çevrilmələrinin limit enerjiləri // Ümummilli lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 95-ci ildönümünə həsr olunmuş Gənc Tədqiqatçıların II Beynəlxalq Elmi Konfransı, Bakı, – 2018, – s. 67-69.

28. Huseynov, E.M. Frequency – electrical impedance dependencies of neutron irradiated nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC) // XXVII International Materials Research Congress, F2. Advances in functional semiconducting materials - IMRC2018, Cancun, Mexico, – 2018, – p. 2879-2880.

29. Huseynov, E.M. Neutron irradiation effects on the dielectric loss of nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC) // VIII International



Conference, Semipalatinsk Test Site: Legacy and Prospects for Scientific and Technical Potential Development, Kurchatov, Republic of Kazakhstan, – 2018, – p. 161-162.

30. Huseynov, E.M. Permittivity vs. temperature dependencies of neutron irradiated nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC) // XXI Simposio Chileno de Fisica Antofagasta, SOCHIFI, Area H: Materia Condensada Fis. Estado Solido, Chile, – 2018, – p. SPH04.1-2.

31. Huseynov, E.M. Temperature - electrical conductivity dependencies of silicon carbide (3C-SiC) nanoparticles exposed to neutron irradiation // International scientific conference of students and young scientists "Lomonosov-2018", Moscow, –2018, – p. 34.14.1-3.

32. Huseynov, E.M. Neutron activation analysis of high purity nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC) particles // 11th International Conference «Nuclear and radiation physics», Almaty, Republic of Kazakhstan, – 2017, – p. 374.

33. Huseynov, E. Investigation of the Paramagnetic Centers of Neutron - Irradiated Nanocrystalline Silicon Carbide (3C-SiC) Particles // 26th International Conference Nuclear Energy for New Europe, Slovenia, – 2017, – p. 55.

34. Huseynov, E. Frequency dependencies of electrical conductivity of silicon nanoparticles exposed to neutron flux // 25th International Conference Nuclear Energy for New Europe, Slovenia, – 2016, – p. 42-43.

35. Huseynov E.M. Investigation of thermal parameters of nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC) particles using DSC method // I International scientific conference of young researchers, Baku Engineering University, Baku, – 2017, – p. 39.



Dissertasiyanın müdafiəsi \_\_\_\_\_ 2021-ci il tarixində saat \_\_\_\_\_ AMEA Radiasiya Problemləri İnstitutu nəzdində fəaliyyət göstərən BED 1.21 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ1143, B.Vahabzadə küç., 9, Bakı ş.

Dissertasiya ilə AMEA Radiasiya Problemləri İnstitutunun kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları AMEA Radiasiya Problemləri İnstitutunun rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat \_\_\_\_\_ 2021-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 19.03.2021

Kağızın formatı: A5

Həcm: 76500 işarə

Tiraj: 110