

**AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI**

*Əlyazma hüququnda*

**EPİTERMAL NEYTRONLARIN NANO-SİLİSİUMDA  
NÜVƏLƏRDƏN SƏPİLMƏ VƏ RADİASİON TUTULMALARI  
NƏTİCƏSİNDƏ DEFEKTƏMƏLƏGƏLMƏ PROSESLƏRİ**

İxtisas: 2222.01- Nanoquruluşların fizikası və texnologiyası  
2207.01 Atom və nüvə fizikası

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Aydan Adil qızı Qəribli**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi  
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

**A V T O R E F E R A T I**

**Bakı – 2021**

Dissertasiya işi Bakı Dövlət Universitetinin “Nanoquruluşların kimyəvi fizikası” laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbərlər: Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor  
**Ramazanov Məhəmmədli Əhməd oğlu**

Professor **Borut Smodis**

Rəsmi opponentlər: AMEA-nın müxbir üzvü, fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor  
**Mehdiyeva Səlimə İbrahim qızı**

Akademik, Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor  
**Qasimov Oqtay Kazım oğlu**

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

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Milli Nüvə Tədqiqatları Mərkəzi nəzdində fəaliyyət göstərən FD 1.36 Dissertasiya Şurasının bazasında BFD 1.36 Birdəfəlik Dissertasiya Şurası

Dissertasiya şurasının sədri: Fizika elmləri doktoru, akademik  
**Ənvər Pirverdi oğlu Nəhmədov**

Dissertasiya şurasının elmi katibi: fizika üzrə fəlsəfə doktoru, dosent  
**Aynurə Əlisa qızı Hədiyeva**

Elmi seminarın sədri: AMEA-nın müxbir üzvü  
f.r.e.d., prof.  
**Oqtay Əbil oğlu Səmədov**

## İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

**Mövzunun aktuallığı.** Silisium müasir bərk cisim elektronikasının əsas materiallarından biridir. Mütəxəssislərin proqnozlarına görə yaxın 30-40 ildə də silisium və onun əsasında alınmış materiallar mikro elektronika, mikromexanika, nüvə və kosmik texnologiyalarda özünün liderlik səviyyəsini saxlayacaqlar. Son illərdə silisium kristallarının ölçülərinin azaldılaraq nano-miqyaslara çatdırılması, onların tərkiblərini, fiziki xassələrini, modifikasiyasının yeni yollarının aşkar edilməsi istiqamətində geniş miqyaslı tədqiqatlar aparılır. Nano-silisium əsaslı materiallara ionlaşdırıcı şüalar, o cümlədən neytronların təsirinin tədqiqində əsas məqsəd onların ekstremal radiasion mühitə davamlılığının tədqiqi və onun artırılma üsullarının işlənilməsi idi. Bu cür təsir sahəsində bütün materiallarda olduğu kimi nano-silisiumda da yükdaşıyıcılarının yüksək qatılılığının mövcud olduğu cərəyan keçirici kanallarının, struktur defektlərinin yaranması nəticəsində onların fiziki xassələrində kəskin dəyişikliklər baş verə bilər.

Silisium indi həm də günəş enerji çeviricisi kimi geniş tətbiq tapıb. Onun elektrofiziki xassələrinin modifikasiyası üçün  $^{30}_{14}\text{Si} (n, \beta) ^{31}_{15}\text{P}$  nüvə reaksiyası üzrə fosfor nüvələri daxil edilir. Bu zaman silisiumda yük daşıyıcıları və günəş enerjisinin çevrilmə prosesinin faydalı iş əmsalı da dəyişir. Odur ki, neytronlarla şüalandırmaqla mikroelektronika materiallarının əsas və qarışıq atom nüvələrinin çevrilmə prosesləri nəticəsində yaranan radioaktiv izotopların buraxdığı şüaların təsiri altında əsas materiallarda əlavə qeyri-tarazlı yük daşıyıcıları yarana bilər. Bu proseslər nəticəsində materialların elektrofiziki, dielektrik xassələrində güclü dəyişikliklər baş verir.

Mövcud ədəbiyyat materiallarının analizi göstərir ki, neytronların təsiri altında nano-silisiumda baş verən proseslər nəticəsində yaranan radioaktiv nüvələrin buraxdığı şüaların nano-silisiumun elektrofiziki, dielektrik xassələrinə təsiri üzrə ədəbiyyat materialları çox məhduddur.

Odur ki, geniş miqyaslı enerji və sel sıxlığına malik epitermal neytronların nano-silisiyumda qarışıq və əsas nüvələrdə səpilmə, radiasion tutulma və nüvə çevrilmə proseslərini və bu proseslərin təsiri altında nano-silisiyumda defektmələgəlmə prosesləri, elektrofiziki və dielektrik xassələrində baş verən dəyişikliklərin tədqiqinə həsr olunan təqdim olunmuş dissertasiya işinin mövzusu aktual olub, böyük fundamental və elmi–praktiki əhəmiyyət kəsb edir.

**Dissertasiya işinin məqsədi:** Dissertasiya işinin əsas məqsədi müxtəlif enerjili neytronlarla nano-silisiyum tərkibinə daxil olan təbii silisiyum izotopları və idarə olunmayan qarışıq elementlərin nüvələrinin elastik səpilmə və radiasion tutma mexanizmi üzrə qarşılıqlı təsiri proseslərinin həm nəzəri, həm də təcrübi tədqiqi, bu proseslər nəticəsində mühitə verilən enerjinin yaratdığı defektlərin nano-silisiyumun elektrik və dielektrik xassələrinə təsiri qanunauyğunluqlarının aşkar olunmasıdır.

### **Tədqiqat obyektı**

Tədqiqat obyektı kimi ABŞ-ın Sky Spring Nanomaterials Inc Houston şirkəti tərəfindən sintez olunmuş nano-silisiyum götürülüb. Silisiyumun hissəcik ölçüləri  $d \sim 100$  nm, xüsusi səthi  $S = 80 \text{ m}^2/\text{qr}$ , sıxlığı  $0.08 \text{ q/sm}^3$ , tərkibində silisiyum elementinin qatılığı  $C_{\text{Si}} = 99\%$  tərtibindədir.

**Qarşıya qoyulan məqsədə nail olmaq üçün aşağıdakı tədqiqatların həyata keçirilməsi planlaşdırılıb.**

1. Tədqiqat aparılmış nüvə Reaktorunun malik olduğu neytron enerjiləri və seli qiymətlərində nano-silisiyum tərkibində olan silisiyum təbii izotop nüvələri ilə qarşılıqlı təsir proseslərinin parametrlərinin təyini.

2. Neytronlarla nano-silisiyum tərkibində olan nüvələrin radiasion tutma mexanizmi ilə qarşılıqlı təsirdən yaranan radioaktiv izotopların parçalanma proseslərinin kinetikasi, buraxdığı şüa növü, enerjilərinin və son nəticədə elementlərin nano-silisiyumda qatılıqlarının təyini.

3. Nano-silisiyumun tərkibinə daxil olan təbii silisiyum izotopları və qarışıq element nüvələri ilə tədqiqat şəraitində mövcud olan

neytronların elastik səpilmə və radiasion tutma prosesləri nəticəsində yaranan radioaktiv izotopların buraxdığı şüalar vasitəsi ilə mühitə verilən enerji və defektlərin qiymətləndirilməsi.

4. Neytronların təsiri altında nano-silisiyumun strukturunun tərkib fraqmentləri və səthi adsorbsiya olunmuş fazasında dəyişikliklərin Furye İQ-spektroskopiya üsulu ilə tədqiqi.

5. Neytronların təsiri altında nano-silisiyumun struktur nizamlılığında dəyişikliklərin rentgen-difraksion üsulla tədqiqi.

6. Nano-silisiyumda neytronların təsiri altında yaranan paramaqnit defektləri identifikasiyası və qatılıqlarının dəyişikliklərinin Elektron Paramaqnit Rezonans üsulla tədqiqi.

7. Neytronların təsiri altında gedən proseslərin nano-silisiyumun elektrik keçiriciliyi və impendansına təsiri.

8. Neytronların təsiri altında gedən proseslərin nano-silisiyumun dielektrik xassələrinə təsirinin müxtəlif temperatur, sahə tezliyi və neytron seli qiymətlərinin tədqiqi.

9. Alınmış nəticələr əsasında neytron selinin təsiri altında nano-silisiyumda baş verən proseslərin və onların təsiri altında fiziki xassələrində dəyişikliklərin mexanizmlərinin verilməsi.

### **Müdafiyyə çıxarılan əsas müddəalar:**

1. Genişmiqyaslı enerjiyə malik neytron selinin nano-silisiyumu təşkil edən təbii izotoplarla qarşılıqlı təsir proseslərinin xarakteristik parametrlərinin təyini.

2. Silisiyum izotopları (Si-28, Si-29, Si-30) nüvələri ilə neytronların qarşılıqlı təsirinin daha çox ehtimallı olan elastik səpilmə və radiasion tutma prosesləri nəticəsində nano-silisiyuma enerji verilmə və defektəmələgəlmə prosesləri.

3. Neytronların təsiri altında qarışıq nüvələrində radiasion tutma prosesləri nəticəsində yaranan radioaktiv izotopların parçalanma prosesləri, buraxılan şüa tipi və enerjiləri və son nəticədə qarışıq nüvələrinin qatılıqlarının təyini.

4. Neytronların təsiri altında nano-silisiyumda baş verən nüvə və radiasion proseslər nəticəsində yaranan defekt və struktur nizamsızlıqlarının rentgen-difraksion, Furye-İQ-spektroskopiya, EPR və SEM üsulları ilə tədqiqi nəticələri.

5. Neytronların təsiri altında nano-silisiyumu baş verən nüvə və radiasiya proseslər nəticəsində yaranan defektlərin nano-silisiyumu elektrik keçiriciliyinə şüalanma dozası, elektrik sahə tezliyi və temperaturdan asılı olaraq təsiri.

6. Neytronların təsiri altında nano-silisiyumu baş verən nüvə və radiasiya proseslərinə nano-silisiyumu dielektrik xassəsinə temperatur, sahə tezliyi və şüalanma dozasından asılı olaraq təsirinə tədqiqi nəticələri.

7. Alınmış nəticələr üzrə ümumiləşmələr.

### **Elmi yeniliklər.**

Dissertasiyada

1. Enerjisi  $625 \div 1 \cdot 10^5 \text{ eV}$ , ümumi flüensi  $\phi = 1.92 \cdot 10^{13} \text{ n/sm}^2$  neytronlarla nano-silisiyumu şüalandırıldıqda silisiyumu izotoplarının nüvələri ilə qarşılıqlı təsir proseslərinə parametrləri, radiasiya tutma mexanizmi ilə qarşılıqlı təsir nəticəsində yarana bilən yeni izotopların, o cümlədən radioaktiv Si-31 izotopunun qatılığı, onların qamma və betta parçalanması nəticəsində mühitə verilən enerji hesabına yarana biləcək qeyri-tarazlı yük daşıyıcılarının qatılıqları təyin edilib.

2. Nano-silisiyumu neytronlarla şüalandırmaqla tərkibinə radiasiya leqirə üsulu ilə  $^{31}\text{P}$  izotopunu daxil etmək üsulu aşkar olunub.

3. Neytronların radiasiya tutma mexanizmi ilə qarşılıqlı təsir nəticəsində nano-silisiyumu yaranan radioaktiv izotopların parçalanma kinetikasi, buraxılan şüaların enerjiyi və qarışıq nüvələrin qatılıqları təyin edilib.

4. Neytronların təsiri altında nano-silisiyumu tərkib, struktur nizamlılığı, səthi səviyyələrdə dəyişikliklərin qanunauyğunluqları aşkar olunub.

5. Nano-silisiyumu bioqrafik və neytronlarla şüalandırıldıqda yaranan paramaqnit radiasiya defektlərinə EPR üsulla identifikasiyası aparılıb.

6. Neytronlarla şüalandırıldıqda baş verən proseslər nəticəsində nano-silisiyumu yaranan defektlərin elektrik keçiriciliyinə təsiri qanunauyğunluqları aşkar olunub. Müəyyən olunub ki, nano-

silisiumda yükdaşıyıcıları əsasən üç növ səviyyələrdə lokallaşırlar. Neytron seli və elektrik sahə tezliyi artdıqca aktivləşmə enerjiləri azalır.

7. Neytronlarla şüalandırıldıqda nano-silisiumun dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissələrinin tezlik, temperatur və neytron selindən asılılıqları aşkar olunub.

### **İşin praktiki əhəmiyyəti.**

Nüvə çevrilmələri proseslərinin əsas aparıcı vasitəsi olan neytronların tərkibində üç təbii izotop olan nano-ölçülü silisiuma təsiri zamanı baş verən elastik səpilmə, radiasion tutma, radioaktiv parçalanma prosesləri və onların mühitə buraxdığı ionlaşdırıcı şüaların birgə təsiri üzrə alınmış nəticələr nüvə fizikası, radiasiya materialşünaslığı və nano ölçülər fizikası istiqamətlərində böyük əhəmiyyət kəsb edib. Neytronların təsiri altında Silisium tərkibli materiallarda baş verən proseslərin aşkar olunmuş qanunauyğunluqları yeni nəsil nüvə reaktorların aktiv zonasının neytron balansını və material davamlılığını üzrə təhlükəsizliyinin təmin edilməsində istifadə oluna biləcəkdir.

Digər tərəfdən neytronların təsiri və radiasion leqirə nəticəsində mikroelektronika, günəş çevriciləri, yüksək enerjili hissəciklərin detektə edilməsində geniş istifadə olunan nano-ölçülü silisiumun əsasında hazırlanan cihaz, qurğu və digər sistemlərin effektivliyi və həssaslığının artırılmasında istifadə oluna bilər.

**Tədqiqatın nəticələrinin aprobeşiyası.** Nano-silisiuma neytronların təsiri və bu zaman baş verən prosesləri əhatə edən alınmış dissertasiya işi materialları müxtəlif Respublika və beynəlxalq səviyyəli konfrans, simpozium və seminarlarda məruzə olunub.

1. Neutron activation analysis of silicon nanoparticles. 10th international conference, Nuclear and Radiation Physics, Kurchatov c.,Kazakhstan, 8–11September, 2015, p. 32-33

2. Electrical Conductivity- Temperature Dependencies of nano silicon particles exposed to neutron irradiation, Modern trends in physics, International conference, Baku State University, Baku, 20–22 April, 2017, p.32.

3. Electrical Conductivity – Frequency Dependence of nano silicon particles exposed to neutron irradiation, “Fizika və astronomiya problemləri” Beynəlxalq elmi konfransı, Bakı Dövlət Universiteti, Bakı, 25 may, 2018, s.225-228

4. Epithermal neutrons energy transfer process to nano-silicon, XII International Conference Nuclear and Radiation Physics, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan, 24-27 June, 2019, p.60

**Nəşrlər.** Dissertasiya işi materialları əsasında yüksək reytingli nüfuzlu xarici jurnallarda 6 məqalə və beynəlxalq konfrans materiallarında 4 tezis, respublika miqyaslı jurnallarda 2 məqalə çap olunub.

**Dissertasiya işinin quruluşu, həcmi və əsas məzmunu.** Dissertasiya işi aktuallığı, məqsədi, qarşıya qoyulan tapşırıq və digər məsələləri əhatə edən giriş, beş fəsil, nəticələr və 203 adda ədəbiyyat siyahısından ibarətdir. Dissertasiya 218 səhifədən, o cümlədən, 39 şəkil və 10 cədvəldən ibarətdir.

**Girişdə** dissertasiya mövzusunun vacibliyi və aktuallığı həm elmi, həm də praktiki nöqteyi-nəzərdən əsaslandırılıb. Dissertasiya işinin məqsədi və məqsədə nail olmaq üçün nəzərdə tutulan tədqiqat tapşırığı, alınmış nəticələrin yeniliyi və praktiki əhəmiyyəti, müdafiyyə çıxarılan əsas müddəalar, aprobeasiya, nəşrlər haqqında məlumatlar giriş hissəsində verilib.

**Birinci fəsildə** dissertasiya işinin əsas mövzusu üzrə mövcud ədəbiyyat materiallarının xülasəsi verilib. İlk növbədə nano-ölçülü materialların, o cümlədən silisiumun fərqləndirici xüsusiyyətləri, ölçü effekti, onların xassələrinin həcmi kristallardan fərqliliyi verilib. Silisium və nano ölçülü silisiumun tətbiq sahələri, onların alınma üsulları haqqında ədəbiyyat materiallarının analizi verilib. Nano-silisium və onun əsasında hazırlanmış cihazlar və tətbiq sahələri göstərilib. Nano-ölçülü materiallara, o cümlədən nano-silisiuma ionlaşdırıcı şüalar və neytronların təsiri, neytronların nüvələrlə qarşılıqlı təsiri mexanizmi haqqında materialların təhlili aparılıb. Nano ölçülü materialların strukturu, ölçüləri, defekt halları, elektrofiziki xassələrinin tədqiqi üzrə tətbiq olunan Elektron paramaqnit rezonans, Furye-İQ spektrometriyaları, Rentgen-



difraksiyon, elektrik keçiriciliyi və dielektrik nüfuzluğunun təyini və sair kimi metodlar və onların əsasında alınmış nəticələr haqqında məlumat verilib. Ədəbiyyat xülasəsinin analizi əsasında ümumiləşmə aparılıb, dissertasiya işinin mövzusunun qoyuluşu əsaslandırılıb.

**İkinci fəsildə** dissertasiya işi mövzusu üzrə aparılan tədqiqatların metodikası verilib. İlk növbədə tədqiqat obyektinə haqqında məlumat verilib. Nano-silisiyumun Sloveniyanın TRİGA MARK II tipli tədqiqat nüvə reaktorun mərkəzi A1 kanalında  $6.912 \cdot 10^{16} \div 1.382 \cdot 10^{18}$  neytron/sm<sup>2</sup> neytron seli ilə şüalandırıldıqdan sonra 190-200 saat müddətində “Ortec HPGe” və “Canberra Coaxial HPGe detectors” spektrometridə aktivliyi, buraxılan şüa enerjiləri, parçalanma kinetikaları tədqiqi, əsas və qarışıq element nüvələrinin qatılıqlarının neytron aktivləşmə üsulu ilə təyini metodikası verilib. Furye-İQ- udulma spektrometrik üsulla ilkin və epitermal neytronlarla şüalanmış nümunələr tədqiq olunub. Furye-İQ udulma spektrləri  $\nu = 4000 \div 400$  sm<sup>-1</sup> tezlik intervalında varion 640 FT-İR spektrometridə çəkilib. Bunun üçün xüsusi pressformada qalınlığı 50 – 100 mkm olan həblər hazırlanıb. İQ spektrləri CaF<sub>2</sub> pəncərəyə malik xüsusi kvars küveytlərdə çəkilib. Müşahidə olunmuş udma zolaqları ədəbiyyat materialları əsasında identifikasiya olunub.

Şüalanmamış və şüalanmış nano-silisiyum nümunələrinin elektrik keçiriciliyi və dielektrik nüfuzluğu Sloveniyanın Jozef Stefan İnstitutunda “Novocontrol Alpa High Resolution Dielektrik Analyzer” və “Hewlett Packard 4284 A” həssas LGR-metr cihazlarında məlum metodika üzrə tədqiq olunub. Bunun üçün nano-silisiyum tozu Jozef Stefan İnstitutunun “Nazik təbəqələr və səthlər fizikası” laboratoriyasında xüsusi şəraitdə  $3kN/sm^2$  təzyiqdə sıxılaraq hündürlüyü 250 μm və diametri 5 mm olan həblər hazırlanıb. Sonra həblər TRİGA MARK II reaktorunun mərkəzi kanalında 1, 5, 10, 20 saat müddətində  $\sim 1.92 \cdot 10^{13} n/sm^2 \cdot san$  sel sıxlığında neytronlarla şüalanmaya məruz qalıb. Tədqiqatlar Sloveniyanın Jozef Stefan İnstitutunun “Keramika Elektroniks” laboratoriyasında tezliyin 1Hz – 1MHz qiymətlərində, temperaturun

isə  $T = 100 \div 400K$  oblastında,  $10^{-6} Hz$  və  $10^{-2}K$  dəqiqliklə ölçmələr aparılıb.

Neytron seli ilə şüalanmış nano-silisiyumdakı səthi və hissəcik ölçülərində baş verən dəyişiklikləri tədqiq etmək üçün skanedici elektron mikroskopu (SEM) üsulundan istifadə olunub. Bunun üçün ilkin və şüalanmış nano-silisyum tozları “ZESS SİGMA YP FE-SEM” tip SEM cihazının ölçmə diskinin üzərinə yerləşdirilərək ölçmələr aparılıb. İstifadə olunan SEM cihazının Rentgen Fluorometrik analiz əlavəsi var ki, onun vasitəsi ilə nümunələrin səthi tərkibinin də tədqiq edilmə imkanı vardır. Nano-silisyumda mövcud olan bioqrafik və şüalanma nəticəsində yaranan paramaqnit defektlərin tədqiqi üçün Elektron Paramaqnit Spektrometriya üsulundan istifadə olunub. Nano-silisyum nümunələri Sloveniyanın Jozef Stefan İnstitutunun “Condensed Matter Physics F5” laboratoriyasında “Bruker ELEXSYS E500” EPR spektrometrində tədqiq olunub. Fəslin sonunda təcrübi xətalərin təyini metodikası verilib.

**Üçüncü fəsilə** epitermal neytronlarla nano-silisyum tərkibində olan element nüvələri ilə qarşılıqlı təsiri, enerji ötürülməsi və defektmələgəlmə proseslərinin tədqiqi nəticələri verilib. Şüalandırma zamanı istifadə edilən neytronların enerjiləri intervalında nano-silisyum tərkibində olan nüvələrlə əsasən səpilmə  $\sigma_s$  və tutma prosesləri  $\sigma_{tutma}$  üzrə qarşılıqlı təsir baş verir.

$$\sigma_{üm} = \sigma_s + \sigma_{tutma} \quad (1)$$

Qarşılıqlı təsir proseslərinin makroskopik en kəsikləri hər bir izotopun nano-silisyumun  $1sm^3$ -da qatılığı  $n_i$  və mikroskopik en kəsiyi  $\sigma_i$  əsasında təyin edilib.

$$\Sigma_i = \sigma_i \cdot n_i \quad (2)$$

Tədqiqat nüvə reaktorunun mərkəzi kanalında neytron selinin sıxlığı  $\Phi = 1.92 \cdot 10^{13} \frac{\text{neytron}}{(sm^2 \cdot san)}$  qiyməti və makroskopik en kəsiyinin qiymətləri əsasında şüalanma şəraitində hər bir izotop nüvələrinin neytronlarla toqquşmalarının sayı təyin edilib.

$$N = \phi \cdot \sigma \cdot n_i \quad (3)$$

Silisium nüvəsi üçün elastik səpilmə və radiasion tutma proseslərinin mikroskopik en kəsiklərinin  $\sigma_s = 1.7 \pm 0.3 \text{ barn}$ ,  $\sigma_a = 0.13 \pm 0.3 \text{ barn}$  qiymətləri əsasında Si-28 izotopu üçün elastik səpilmə və radiasion tutma toqquşma sayları və mühitə verilə bilən maksimal təpmə enerjisinin qiymətləri ( $E_{təp}$ ) təyin edilib. Enerjisi 625 eV olan neytronlar üçün nano-Si nüvələri ilə hər toqquşma zamanı  $E' = 0.05 \text{ eV}$ ,  $E_n = 0.1 \text{ MeV}$  enerjili neytronlar üçün isə  $E'' = 7.9 \text{ eV}$  təpmə enerjiləri verilir. Neytronların Si-28, Si-29 və Si-30 izotop nüvələri tərəfindən tutulması nəticəsində müvafiq olaraq Si-29, Si-30 və Si-31 izotopları alınır.

Şüalanmada istifadə olunan neytronların enerjilərinin ( $E'$ ) və ( $E''$ ) qiymətlərini nəzərə almaqla elastik səpilmə nəticəsində mühitə verilən ümumi təpmə enerjisinin qiyməti təyin edilib ( $\Sigma E'_{max}$ ).

$$(\Sigma E'_{max}) = N_s \cdot (E' + E'') = 4.44 \cdot 10^{11} \text{ eV/sm}^3 \cdot \text{san} \quad (4)$$

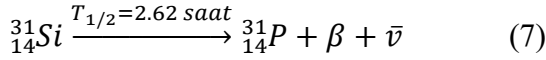
Maksimal şüalanma vaxtında  $\tau = 20 \text{ saat}$  nano-silisiumun vahid həcminə verilən enerji

$$\Sigma E^- = \Sigma E'_{max} \times \tau_s = 3.2 \cdot 10^{16} \text{ eV/sm}^3 \quad (5)$$

Neytronların  $^{28}_{14}\text{Si}$ ,  $^{29}_{14}\text{Si}$  nüvələri ilə qarşılıqlı təsiri zamanı stabil  $^{29}_{14}\text{Si}$  və  $^{30}_{14}\text{Si}$  nüvələri,  $^{30}_{14}\text{Si}$  nüvələri ilə qarşılıqlı təsiri zamanı isə qeyri-stabil  $^{31}_{14}\text{Si}$  nüvəsi alınır. Bu zaman aşağıdakı nüvə reaksiyası üzrə qarşılıqlı təsir baş verir.



Neytronlarla  $\tau = 20 \text{ saat}$  şüalanma vaxtında yaranan  $^{31}_{14}\text{Si}$  qeyri-stabil nüvələrin buraxdığı qamma-şüalar vasitəsi ilə nano-silisiuma  $\Sigma E_\gamma = 9.85 \cdot 10^{18} \text{ eV/sm}^3$  enerji verilir.  $^{31}_{14}\text{Si}$  radioaktiv nüvəsi aşağıdakı sxem üzrə beta parçalanır.



burada enerjisi  $E_\beta = 0.595 \text{ MeV}$  olan  $\beta$  hissəcik,  $\bar{\nu}$ -anti-neytrinolardır.

Neytronlarla  $\tau = 20 \text{ saat}$  şüalanma nəticəsində yaranan radioaktiv  ${}_{14}^{31}\text{Si}$  nüvələrinin  $\beta$ -parçalanması məhsulu olan beta hissəciklər vasitəsi ilə mühitin ionlaşma proseslərinə  $\Sigma E_\beta = 4.63 \cdot 10^{18} \text{ eV/sm}^3$  miqdarda enerji sərf olunur.

Tədqiqat obyektini olan nano-Si nümunəsinə epitermal neytronların təsiri altında əsas və qarışıq nüvələrin qamma-spektrometriya üsulu ilə identifikasiyası, buraxılan şüaların enerjiləri və radioaktiv parçalanma proseslərin kinetikasi tədqiq olunub.

Müşahidə olunmuş neytron aktivləşmiş nano-Si -da qarışıq şəkildə olan nüvələrin



prosesi nəticəsində qamma-kvantlar vasitəsi ilə mühitə verdikləri enerjinin miqdarı təqribi qiymətləndirilib.

$$\Sigma_{qar} E_\gamma = 3.29 \cdot 10^{18} \text{ eV/sm}^3 \quad (9)$$

Ümumiyyətlə, epitermal neytronların tədqiq olunmuş nano-Si nümunələrinə təsiri zamanı elastik səpilmə, radiasion tutma prosesləri nəticəsində nano-Si -a aşağıdakı miqdarda enerji verilə bilər.

$$\Sigma_i E_i = \Sigma_S E_S + \Sigma_\gamma E_\gamma + \Sigma_\beta E_\beta + \Sigma_\gamma E_{qar} \quad (10)$$

Burada  $\Sigma_S E_S$ -səpilmə zamanı təpmə enerjisi,  $\Sigma_\gamma E_\gamma$  -  ${}_{14}^{31}\text{Si}(n, \gamma){}_{14}^{31}\text{Si}$  nüvə reaksiyası üzrə,  $\Sigma_\beta E_\beta$  -  ${}_{14}^{31}\text{Si} \rightarrow {}_{15}^{31}\text{P}$  radioaktiv parçalanması zamanı ayrılan beta,  $\Sigma_\gamma E_{qar}$  - nano-Si da olan qarışıq nüvələrin neytron aktivləşmə prosesləri nəticəsində mühitə ayırdığı enerjilərdir. Onların təyin olunmuş enerjiləri qiymətlərini yerinə qoysaq nano-Si-

u 20 saat şüalandırıldıqda ona verilən ümumi enerjini qiymətləndirmək olar.

$$\sum_i E_i = 1.78 \cdot 10^{19} \text{ eV/sm}^3 \quad (11)$$

Yarımkəçiricilərdə elektron-deşik cütlərinin əmələ gəlmə hədd enerjiləri

$$E_h = 3 \cdot E_g \quad (12)$$

Nano-siliisum nümunələri üçün  $E_g = 1.55 \text{ eV}$  olduğunu nəzərə almaqla nano-Si -u  $\tau = 20 \text{ saat}$  neytronlarla şüalandırıldıqda yarana bilən elektron-deşik cütlərinin miqdarını qiymətləndirmək olar.

$$N_{\text{cüt}} = \frac{\sum_i E_i}{E_h} = 3.8 \cdot 10^{18} \text{ cüt/sm}^3 \quad (13)$$

Bizim təcrübələrdə nano-silisiyum neytronlarla şüalandırıldıqdan sonra  $\tau = 360 \text{ saat}$  müddətində radioaktiv parçalanma proseslərinin kinetikasi tədqiq olunub. Müəyyən olunub ki, nano-silisiyumun neytronlarla şüalanması nəticəsində yaranan radioaktiv nüvələrin radioaktivliyi  $A = 0.1 \text{ kB}$  -dən  $A = 3.1 \text{ GBq}$  -ə qədər, yarımparçalanma periodu  $T_{1/2} = 2.2$  dəqiqədən  $T_{1/2} = 5.3$  ilə qədər geniş intervalda dəyişir. Qamma spektrometriya üsulu ilə aşkar olunmuş radioaktiv nüvələri aktivliyi və yaşama müddətlərinə görə şərti beş qrupa ayırmışığı. I-  $A \leq 3.5 \text{ kBq}$ ; II-  $A \leq 35 \text{ kBq}$ , III-  $A \leq 3.1 \text{ GBq}$ ; IV-  $A \leq 30 \text{ MBq}$ ; V-  $A \leq 350 \text{ kBq}$ . Təcrübi olaraq I qrupda 12 izotop  $La - 40$ ,  $Sc - 47$ ,  $Ba - 131$ ,  $H - 181$ ,  $Fe - 50$ ,  $Sb - 124$ ,  $Co - 58$ ,  $Sc - 46$ ,  $Zn - 65$ ,  $Mn - 54$ ,  $Cd - 109$  və  $Co - 60$  daxildir. İkinci qrupa üç  $W - 187$ ,  $Br - 82$ ,  $Sb - 122$  izotopları daxildir. Üçüncü qrupa iki  $Cu - 64$ ,  $Cr - 51$  izotopları dördüncü qrupa üç  $Cl - 35$ ,  $Mn - 65$ ,  $Si - 31$ , beşinci qrupa isə  $V - 52$ ,  $Al - 28$  kimi iki izotop daxildir. Radioaktiv nüvələrin parçalanma parametrləri əsasında nano silisiyumda qatılıqları təyin edilib.

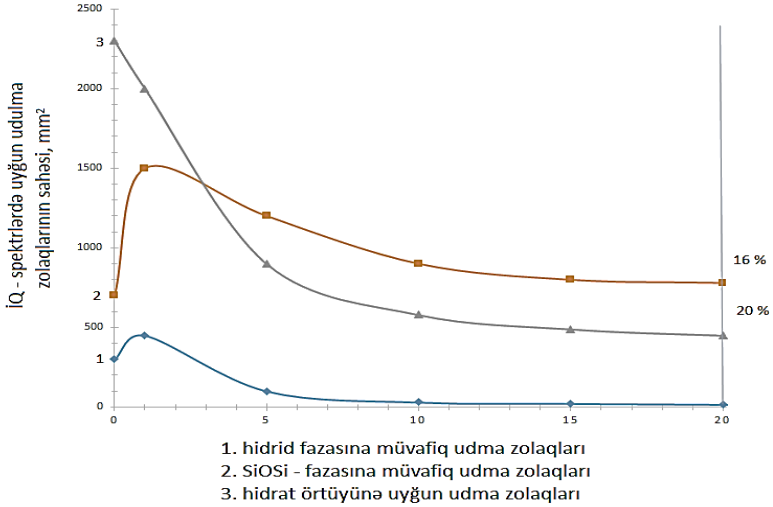
**Dördüncü fəsilə** epitermal neytronların təsiri altında nano-Si -da yaranan defektlər eksperimental olaraq Rentgen-difraksiyon,

Furye-İQ, Elektron Paramaqnit spektroskopiya və xüsusi RFA əlavəli SEM üsulları ilə tədqiqatlarının nəticələri verilib.

Müəyyən olunub ki, göstərilən intervalda şüalandırıldıqda nano-silisiyumun rentgen-difraktoqramında xətlərin intensivliyinin azalması müşahidə olunur. Şüalanmamış nümunələrin rentgen difraktoqrammaları ilə müqayisə göstərir ki, epitermal neytronlarla  $\tau = 1 \div 10$  saat müddətində şüalandırıldıqda nano-silisiyumda 35-38% amorflaşma baş verir. Neytronlarla şüalandırıldıqda nano-silisiyumda baş verən defektəmələgəlmə prosesləri, struktur, səthi funksional qrup, adsorbsiya və xemosorbsiya fazalarında baş verən dəyişikliklərin tədqiqi üçün Furye-İQ spektrometriya üsulu istifadə olunub. Nano-silisiyumun Furye-İQ spektrində müşahidə olunmuş udma zolaqlarını xaraktercə üç hissəyə ayırmaq olar: Birinci qrup udma zolaqları nano-Si qəfəs rəqslərinə uyğun oblastlar, ikinci qrup oksid fazasının qəfəs rəqsləri, üçüncü oblast isə funksional qruplar  $SiH_x$ ,  $\equiv Si - OH$ , adsorbsiya olunmuş su və karbohidrogenlərə aid udma zolaqları göstərmək olar. Müşahidə olunmuş Furye-İQ spektrlərdə aşağı tezliklər oblastında  $\nu = 479 \text{ sm}^{-1}$   $\delta Si$  əlaqələrində deformasiya rəqslərə, monokristallik silisiyuma uyğun  $\nu = 610 \text{ sm}^{-1}$  çox fononlu udma,  $800 \text{ sm}^{-1}$  və intensiv geniş  $1075 \text{ sm}^{-1}$  Si-O-Si əlaqələrində simmetrik və qeyri-simmetrik rəqslərə uyğundur. Müəyyən olunub ki, nano-silisiyum hava ilə təmasda saxlanıldıqda İQ udma oblastı  $1085 \text{ sm}^{-1}$ -ə uyğun oksid təbəqəsi əmələ gəlir. Daxili Si-O-Si əlaqələrinin assimetrik ( $V_{as}$ ) valent rəqsləri  $1161 - 1105 \text{ sm}^{-1}$  dublet kimi Furye-İQ spektrlərdə müşahidə olunur.  $SiH_x$  fazasına uyğun  $\nu = 2000 - 2400 \text{ sm}^{-1}$ , molekulyar və dissosiativ adsorbsiya olunmuş su molekullar, müxtəlif növ hidroksil qruplarına müvafiq udma zolaqları  $\nu = 3100 - 3900 \text{ sm}^{-1}$  oblastları müşahidə olunur. Nano-silisiyuma neytronların təsiri altında  $-Si-O-Si-$ ,  $SH_4$  və  $Si-H_2O$  fraqmenlərinin miqdarlarının dəyişməsinə keyfiyyətcə xarakterizə edən Furye-İQ spektrlərdə udma zolaqlarının intensivliyinin şüalanma vaxtından asılılıqları aşkar olunub (Şəkil 1).

Epitermal neytronlarla şüalanmış nümunələrin xüsusi analiz əlavəsi olan Skanedicci Elektron Mikroskopu vasitəsi ilə tədqiqi nəticələri göstərir ki, şüalanma nəticəsində nano-silisiyum

hissəciklərinin aqlomerasiya prosesləri baş verir və nəticədə hissəcik ölçüləri 1.5 ÷ 4 dəfə artır. Epitermal neytronlarla şüalandırıldıqda nano-silisiyum hissəciklərində silisiyumun oksigenli birləşmələrinin əmələ gəlməsi Furiye-İQ spektroskopiyaya metodu ilə yanaşı SEM cihazının RFA əlavəsi ilə tədqiqi nəticəsində də müəyyən olunub.



**Şəkil 1. Nano-silisiyuma epitermal neytronların təsiri altında tərkib hissəsini təşkil edən (Si-O-Si) oksid (2), SiH<sub>x</sub> hidrid (1) və hidrat (3) fazalarına aid İQ udma oblastlarının sahələrinin şüalanma vaxtından asılılığı.**

Şüalanma prosesləri nəticəsində oksigenli fazanın miqdarı təqribən 16.6 % artır ki, bu da Furiye-İQ udma spektrləri əsasında müşahidə olunmuş Si-O-Si körpü rabitələrinə uyğun udma xətlərinin artımına uyğundur.

Furiye-İQ spektroskopiyaya, SEM metodlarla tədqiqatlar göstərir ki, şüalanmamış nano-silisiyumda silisiyumun oksigenli birləşmələri mövcuddur. Odur ki, ilkin nümunələrdə adi silisiyumun oksigenli birləşmələrinə xas  $\equiv Si$ ,  $\equiv SiO$  radikallarına uyğun g-faktorlar 2.1 ÷ 2.2 oblastında olan EPR spektri xətləri müşahidə olunur. Nano-silisiyumun neytron aktivləşmə üsulu ilə tədqiqi nəticəsində tərkibində ~1% -ə qədər qarışıq kimi keçid elementləri olduğu göstərilmişdir.

Keçid elementləri Si mühitində elektro akseptor mərkəz rolu oynayır və ionlaşmış halda olurlar. İonlaşmış halda olan bu kationlar paramaqnit olur və onlara xas EPR xətləri  $g = 3.5 \div 5.0$  oblastında müşahidə olunur. Neytronlarla şüalandırıldıqda silisiumda baş verən ionlaşma prosesləri nəticəsində mühitdə yaranan elektron və deşiklər struktur defektlərində lokallaşır və onların müəyyən hissəsi paramaqnit olub EPR spektrlərdə  $L(n)$  elektron və  $L(p)$  deşik ( $\equiv SiO^-$ ) mərkəzlər kimi uyğun olaraq  $g \sim 2.02$  və  $2.10$  oblastlarında müşahidə olunurlar. Neytronlarla şüalanma zamanı yaranan daha sərbəst olan elektronlar keçid element kationları tərəfindən tutulur və qeyri-paramaqnit hala keçir və EPR spektrlərdə onlara xas  $g = 3.5 \div 5.0$  faktorlar oblastında xətlər müşahidə olunmur.

**Beşinci fəsilə** epitermal neyronların təsiri altında nano-silisiumda baş verən nüvə və radiasion proseslərinin dielektrik xassələri və elektrik keçiriciliyinə təsirinin tədqiqi üzrə alınmış nəticələr şərh olunub.

Neytronlarla müxtəlif dozalarda şüalanmış nano-silisiumun elektrik keçiriciliyi və dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissələrinin  $1 \div 10^6 Hz$  intervalında tezlikdən,  $T = 100 \div 400 K$  intervalında isə temperaturdan asılıqları tədqiq olunub.

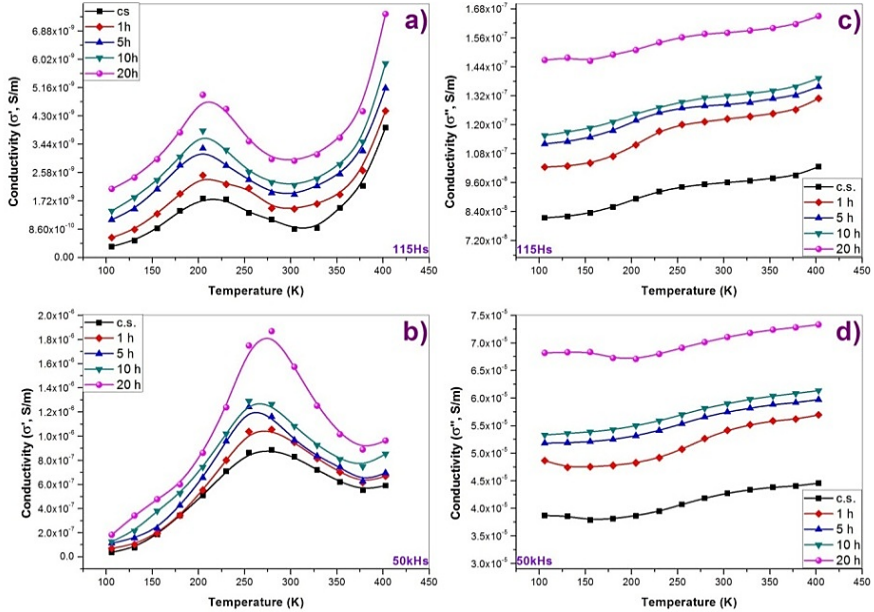
Müəyyən olunub ki, nano-silisiumun elektrik keçiriciliyinin həm həqiqi, həm də xəyali hissələri neytronlarla şüalanma dozasının  $D \approx 0 \div 1.38 \cdot 10^{18} \text{neytron}/\text{sm}^2$  intervalında dozanın artımı ilə xətti artır.

Nano-silisiumun şüalanmamış və tədqiqat aparılmış doza intervalında neytronlarla şüalanmış nümunələrinin elektrik keçiriciliyinin həqiqi hissəsinin  $T \leq 300 K$  temperaturlarında tezlikdən asılılığında xaotiklik müşahidə olunub. Müşahidə olunmuş xaotiklik temperaturun artımı ilə azalır və  $T = 400 K$ -də aradan qalxır.

Nano-silisiumun elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılığına neytronlarla şüalanmanın təsiri ( $1 Hz - 10 Hz$ ), ( $115 Hz - 50 kHz$ ) (Şəkil 2) və ( $0.1 MHz - 1 MHz$ ) kimi tezliklər oblastında tədqiq olunub. Birinci tezlik oblastında aşağı temperaturlarda  $T \leq 300 K$  elektrik keçiriciliyinin həqiqi hissəsi temperaturdan zəif



asılıdır. Sonrakı temperatur oblastında kəskin artım müşahidə olunur. Bu artım neytronlarla şüalanma dozası artdıqca daha kəskin xarakter daşıyır. Ölçmə zamanı elektrik sahəsinin tezliyi artıqca elektrik keçiriciliyinin həqiqi hissəsinin temperatur asılılığında şüalanma dozasının təsiri daha güclü olması müşahidə olunub.



**Şəkil 2.** İlkin halda (c.s.) və müxtəlif müddətlərdə (1, 5, 10, 20 saat) neytron selinin təsirinə məruz qalmış nano-silisiumun orta tezliklər oblastında müxtəlif tezliklərdə elektrik keçiriciliyinin həqiqi (a və b) və xəyali (c və d) hissələrinin temperatur asılılıqları

Şüalanmamış və neytronlarla şüalanmış nano-silisiumun elektrik keçiriciliyinin həqiqi hissəsinin temperatur asılılığında tezlik artdıqca yerini və intensivliyini dəyişən maksimum müşahidə olunur.

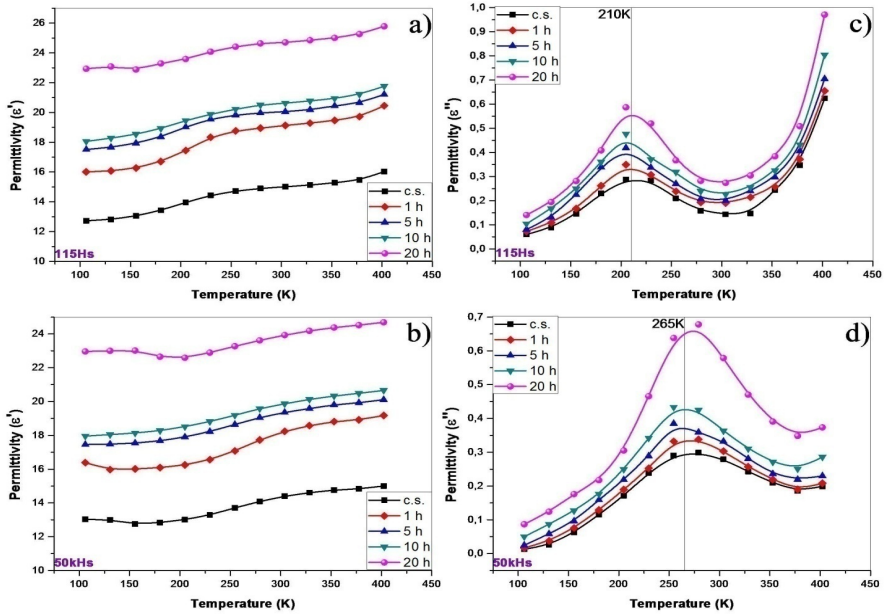
Belə ki,  $1 \div 10 \text{ Hz}$  tezliklərdə  $T = 170\text{K}$  -də müşahidə olunan maksimum  $\nu = 1\text{MHz}$  qiymətində  $T = 320\text{K}$  -ə qədər yerini dəyişir. Tezliyin artması ilə elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılığında müşahidə olunan maksimumun intensivliyi artır.

Elektrik keçiriciliyinin xəyali hissəsinə tezlik artdıqca temperaturun təsiri daha zəif şəkildə özünü göstərir. Elektrik keçiriciliyinin Arrenius koordinatlarında  $\ln\sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$  temperatur asılılıqları əsasında müxtəlif tezliklər və neytronlarla şüalanma doza qiymətlərində keçiriciliyin aktivləşmə enerjiləri təyin edilib. Elektrik keçiriciliyinin həqiqi hissəsinin Arrenius koordinatlarında temperatur asılılıqları ilkin və şüalanmış nümunələrdə müxtəlif tezliklərdə əsasən üç hissədən ibarətdir. Nano-silisiumun elektrik keçiriciliyinə aktivləşmə enerjisi şüalanma dozası və elektrik sahə tezliyi artdıqca azalır. Müşahidə olunmuş aktivləşmə enerjilərinin qiymətləri  $E_{ak} = 0.01 \div 3.6 \text{ eV}$  oblastında dəyişir. Aşkar olunmuş üç oblastı şərti olaraq aşağı, orta və yüksək tempertur oblastlarına ayırmaq olar. Yüksək temperatur oblastında müşahidə olunmuş keçiriciliyin aktivləşmə enerjisi  $E_1 = 0.5 \div 3.5 \text{ eV}$ , orta temperatur oblastında  $E_2 = 0.12 \div 0.82 \text{ eV}$ , aşağı temperatur oblastında isə  $E_3 = 0.09 \div 0.74 \text{ eV}$  intervallarında dəyişir. Nano-silisiumun elektrik keçiriciliyinin aktivləşmə enerjisinin şüalanma dozası artdıqca azalması radiasion proseslər nəticəsində yaranan tutma səviyyələrinin nisbətən dayaz və yükdaşıyıcılarının sərbəst enerjisinin çox olması ilə izah olunur.

Alınmış nəticələr əsasında neytronla şüalanmış nano-silisiumun elektrik keçiriciliyinin atomik və ya dipolyar xarakter daşması göstərilib. Müəyyən olunub ki, dielektrik nüfuzluğunun xəyali hissəsinin tezlik asılılığında aşağı  $f_a \leq e^5 \text{ Hz}$  və yüksək  $f_y \geq e^{13} \text{ Hz}$  tezliklər oblastlarında qiymətlərində sistemdə yaranan klasterlə və ya rezonans proseslərlə izah oluna bilən xaosluq müşahidə olunub. Aşağı temperaturlarda ( $T \approx 100 \text{ K}$ ) dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsi demək olar ki, tezlikdən asılı olmur. Tədqiq olunmuş bütün temperatur və tezliklər oblastlarında nano-silisiumun dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsi şüalanma dozası artdıqca artır.

Neytron şüalanmasının nano-silisiyumun dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissələrinin sabit tezliklərdə temperaturdan asılılıqları tədqiq olunub. Tədqiqat nəticələri üç qrupa aşağı ( $1\text{Hz} \div 10$ ), ( $115\text{Hz} - 50\text{kHz}$ ), orta ( $115\text{Hz} - 50\text{kHz}$ ) və yuxarı ( $0.1\text{MHz} - 1\text{MHz}$ ) bölünmüş tezliklər oblastı təmsalında şərh olunub.

Dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissələrinin temperatur asılılığında  $T \geq 350\text{K}$  oblastında artım müşahidə olunur.



**Şəkil 3. İlkin halda (c.s.) və müxtəlif müddətlərdə (1, 5, 10, 20 saat) neytron selinin təsirinə məruz qalmış nano-silisiyumun orta tezlik oblastında müxtəlif tezliklərdə dielektrik nüfuzluğunun həqiqi (a və b) və xəyali (c və d) hissələrinin temperatur asılılıqları**

Dielektrik nüfuzluğunun xəyali hissəsinin də temperatur asılılığında elektrik keçiriciliyinin həqiqi hissəsinin temperatur asılılığında

müşahidə olunmuş, tezlik artdıqca intensivləşən və yuxarı temperatur oblastına sürüşən  $T_{max} \sim 117 \div 315 K$  maksimum müşahidə olunur.

Neytronlarla müxtəlif dozalarda şüalanmış nümunələrin dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissələrinin tezlik və temperatur asılılıqlarının uyğun olaraq izotезlik və izotemperatur kəsilişi göstərir ki, neytronlarla şüalanma dozası artdıqca nano-silisiyumun dielektrik nüfuzluğunun hər iki tərkib hissəsi artır. Bu artım onu göstərir ki, neytronların təsiri altında baş verən ionlaşma prosesləri nümunədə polyarlaşmanı artırır.

Müxtəlif neytron selinin təsirinə məruz qalmış nano-silisiyumun dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissələrinin  $T = 100 \div 400 K$  temperatur oblastında qarşılıqlı asılılıqları  $\epsilon'' = f(\epsilon')$  tədqiq olunub. Bu asılılıqlarda aşağı temperatur oblastında güclü xaotiklik müşahidə olunur. Nisbətən yüksək temperaturlarda  $T = 200 - 300 K$ -də Koul-Koul diaqramına bənzər hal müşahidə olunur. Bu əyrilərin xəyali uzantıları üzərindən relaksasiya müddətləri hesablanıla bilər. Müşahidə olunmuş əyrilər əsasında təyin edilmiş relaksasiya müddətləri çox geniş diapazonda  $\sim 10^{-3} \div 10^{-10}$  saniyə intervalında dəyişir.

Alınmış relaksasiya müddətləri əsasında nano-silisiyum nümunələrində polyarlaşmanın təbiəti və mexanizmi haqqında fikir yürüdülmüşdür. Müşahidə olunmuş relaksasiya müddətinə uyğun tezliklər əsasında nano-silisiyumda atomik, dipolyar və ya səthi yüklərin polyarlaşmasının mövcudluğu haqqında mülahizə yürütmək olar. Alınmış nəticələr əsasında neytronlarla şüalanmış nano-silisiyumun elektrik keçiriciliyinin atomik və ya dipolyar xarakter daşması göstərilib.

Neytronların nano-silisiyuma təsiri zamanı baş verən elastik səpilmə, radiasion tutma və qeyri-stabil nüvələrin radioaktiv parçalanması nəticəsində mühitə verilən  $\sum_i E_i = 1.78 \cdot 10^{19} \text{ eV/sm}^3$  enerjinin hesabına yarana bilən  $N_{cüt} = 3.8 \cdot 10^{18} \text{ cüt/sm}^3$  yükdaşıyıcılarının hansı hissəsinin elektrik keçiriciliyində iştirak etməsinin aşkar edilməsinin bərk cisimlər, radiasiya fizikası, nüvə, radiasiya materialşünaslığı və digər sahələrdə böyük elmi və praktiki əhəmiyyət kəsb edir. Nəzəri hesablamalar nəticəsində müşahidə

olunmuş qeyri-tarazlı yükdaşıyıcılarının qatılığı silisium tərkibli materiallara xas məxsusi yük daşıyıcılarının qatılığından  $N_m = 1.5 \cdot 10^{10}$  hissəcik/sm<sup>3</sup> çox böyükdür. Şüalanmış nümunələrin elektrik keçiriciliyi şüalanmadan  $\tau = 400$  saat sonra tədqiq olunduğundan bu proseslərdə yalnız lokallaşmış hissəciklər iştirak edir. Elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılığından nano-silisiumda əsasən üç tip, kifayət dərəcədə dərin səviyyələrin mövcudluğu aşkar olunub. Elektrik keçiriciliyinin dozadan asılılığı əsasında keçiricilikdə iştirak edən yükdaşıyıcılarının qatılığını hesablamaq üçün yükdaşıyıcılarının yükü və yürüklüyü məlum olmalıdır.

$$\sigma = q \cdot n \cdot \mu \quad (15)$$

Təqribi qiymətləndirmək üçün ədəbiyyat materiallarından silisiumda elektronların yürüklüyünün  $\mu_e = 1200 \div 1450$  sm<sup>2</sup>/V · san, dəşiklər üçün isə  $\mu_d = 500$  sm<sup>2</sup>/V · san qiymətləri götürülüb. Nano-silisiumun ölçüləri və səthi xüsusiyyətləri nəzərə alınmaqla təcrübi müşahidə olunmuş elektrik keçiriciliyinin qiymətləri əsasında (15) ifadəsi ilə yükdaşıyıcılarının müxtəlif şüalanma dozası, temperatur və tezliklərdə keçiricilikdə iştirak edən yükdaşıyıcılarının qatılıqları hesablanıb. Təyin edilmiş elektrik keçiriciliyində iştirak edən yükdaşıyıcılarının qatılığı  $N_{el} = 1.45 \cdot 10^8 \div 1.64 \cdot 10^{13}$  1/sm<sup>3</sup> intervalında dəyişir. İlk yaranmış və keçiricilikdə iştirak edən yükdaşıyıcılarının qatılıqlarının müqayisəsi göstərir ki,

$$N_{el}/N_0 = \frac{1.64 \cdot 10^{13}}{3.18 \cdot 10^{18}} = 4.31 \cdot 10^{-6} \quad (16)$$

onların yalnız  $\sim 10^{-6}$  hissəsi elektrik keçiriciliyində iştirak edir. Qalan yükdaşıyıcıları müxtəlif növ rekombinasiya proseslərinə uğrayırlar.

Alınmış nəzəri və təcrübi nəticələrin müqayisəli analizi əsasında neytronların təsiri altında nano-silisiumda baş verən proseslərin və onların təsiri altında fiziki xassələrinə aşkar olunan dəyişikliklərin izahı və mexanizmləri verilib.

## ƏSAS NƏTİCƏLƏR

Enerjiləri  $E_n = 625 \div 1 \cdot 10^5 eV$ , sel sıxlığı  $\Phi = 1.29 \cdot 10^{13} n/sm^2 \cdot san$  olan neytronların təsiri altında baş verən nüvə-neytron qarşılıqlı təsiri, bu zaman radiasion tutma və radioaktiv parçalanma nəticəsində verilən enerjinin hesabına nano-Si -da baş verən defektmələgəlmə prosesləri və onların materialın fiziki xassələrinə təsiri tədqiq olunub. Aparılmış tədqiqatlar əsasında aşağıdakı əsas nəticələr alınmışdır.

1. Nano-silisiyumun mövcud olan təbii  $^{28}_{14}Si$ ,  $^{29}_{14}Si$ ,  $^{30}_{14}Si$  izotoplarının nüvələri ilə enerjisi  $625 \div 1 \cdot 10^5 eV$  neytronların qarşılıqlı təsir proseslərinin əsas parametrləri, elastik səpilmə, radiasion tutulma, radioaktiv  $^{31}_{14}Si$  nüvələrinin yaranma proseslərinin sürətləri, bu proseslər nəticəsində ayrılan şüaların hesabına *nano – Si*-a verilən enerji, bu enerjilər hesabına *nano – Si*-da gedən ionlaşma prosesi nəticəsində yarana bilən elektron-deşik cütlərinin yaranma sürəti və maksimal şüalanma dozasında ( $\phi = 1.382 \cdot 10^{18} n/(sm^2 \cdot san)$ ) onların qatılıqları  $N_S = 3.8 \cdot 10^{18} \frac{1}{sm^3}$  təyin olunub.

2. Nano-silisiyumun tərkibində olan əsas silisiyum və qarışıq nüvələrin neytronlarla radiasion tutma mexanizmi ilə qarşılıqlı təsirinə nəticəsində yaranan radioaktiv nüvələrin buraxdığı şüalar, onların enerjiləri və radioaktiv parçalanma proseslərinin kinetik qanunauyğunluqları aşkar olunmaqla yanaşı radioaktiv nüvələrin aktivliyi nəticəsində buraxılan şüalar tərəfindən mühitə verilən enerji və yaranan yükdaşıyıcıların qatılıqları təyin edilmişdir ki, bu da nano-silisiyumun radiasion dopping (leqirə) yolu ilə tərkibinə  $^{31}_{15}P$  element atomlarının daxil edilməsi üsulunun mümkünlüyünü göstərmişdir.

3. Neytronların təsiri altında nano-silisiyum hissəciklərinin səthi yüklülüyü və kimyəvi aktivliyi artdığından onların aqlomerasiya prosesləri nəticəsində hissəcik ölçüləri  $1.5 \div 4$  dəfə artır. Şüalanmamış *nano – Si*-da keçid elementlərinə xas elektron və deşik xarakterli paramaqnit mərkəzlər identifikasiya olunub. Neytronlarla şüalanma nəticəsində yaranan qeyri-tarazlı

yükdaşıyıcılarının lokallaşması nəticəsində elektron və deşik xarakterli paramaqnit defektlərin qatılığı kəskin şəkildə artır. Keçid elementlər elektron akseptor olduqlarına görə şüalanma nəticəsində yaranan sərbəst elektronları tutaraq qeyri-paramaqnit hala keçirlər. Müəyyən olunub ki, nano-silisiumu  $\Phi = 6.91 \cdot 10^{17} \text{ n}/(\text{sm}^2 \cdot \text{san})$  neytron seli ilə şüalandırıldıqda yaranan struktur defektləri nümunələrin struktur nizamlılığında 35-38 % azalma yaradırlar.

4. Nano-silisiyumun bioqrafik struktur fraqmentləri və neytronlarla şüalanmanın təsiri Furiye-İQ-spektroskopiya üsulu ilə tədqiq olunub. Şüalanmamış nano-silisiyumda silisiyum qəfəsi,  $Si - O - Si$  tipli oksid,  $SiH_x$  -hidrid, hidroksil və müxtəlif formada səth ilə əlaqələnmiş hidrat örtüyü aşkar olunub. Neytronların təsiri altında bu struktur fraqmentlərində dəyişikliklərin qanunauyğunluqları öyrənilib. Müəyyən olunub ki, neytronların təsiri altında  $SiH_x$  hidrid fazası  $\phi \geq 3.45 \cdot 10^{17} \text{ n}/\text{sm}^2$  dozalarla şüalandırıldıqda tamamilə parçalanır. Neytronların təsiri altında  $\Phi \geq 3.45 \cdot 10^{17} \text{ n}/\text{sm}^2$  doza intervalında hidrat örtüyü parçalanır və səthdə ilkin örtüyün 20 %-ni təşkil edən stabil struktur hidroksil qrupları qalır. Neytronlarla şüalanmanın başlanğıc vaxtlarında  $\Phi \leq 1.04 \cdot 10^{17} \text{ n}/(\text{sm}^2 \cdot \text{san})$  doza intervalında səthin sürətli oksidləşməsi və  $\Phi \leq 1.04 \cdot 10^{17} \div 6.912 \cdot 10^{17} \text{ n}/\text{sm}^2$  doza intervalında oksid fraqmentinin müəyyən hissəsi parçalanır və şüalanmamış nümunələrdən 16% çox radiasiyaya davamlı oksid fazası qalır ki, bu da SEM-RFA metodu ilə də təsdiqlənib.

5. Neytronların təsiri altında nano-silisiyumda baş verən nüvə və radiasion proseslər nəticəsində yaranan qeyri-tarazlı yükdaşıyıcılar xüsusi səviyyələrdə lokallaşırlar və müvafiq şəraitdə elektrik sahə tezliyi və temperaturda onlar lokallaşma səviyyələrinin baryerlərini aşaraq elektrik keçiriciliyində iştirak etmələri elektrik keçiriciliyinin tədqiq olunmuş doza intervalında xətti artımını yaradır.

Nano silisiyumun neytronlarla şüalanma dozasının elektrik keçiriciliyinin tezlik və temperatur asılılıqlarına qarşılıqlı təsir qanunauyğunluqları aşkar olunub. Yükdaşıyıcıların əsasən üç tip səviyyələrdə lokallaşması, bu səviyyələrdən aktivləşmə enerjilərinin tezlik və şüalanma dozası artdıqca azalması aşkar olunub.

6. Neytronlarla şüalanmış nano-silisiyumun elektrik keçiriciliyi, yükdaşıyıcıların silisiyum tərkibli materiallarda yürüklüyünün qiymətləri əsasında elektrik keçiriciliyində iştirak edən yükdaşıyıcıların təqribi qiymətləndirilməsi ( $N_{el} 1.45 \cdot 10^8 \div 1.64 \cdot 10^{13} 1/sm^3$ ) aparılıb. Nano-silisiyuma neytronların təsiri altında baş verən nüvə və radiasion proseslər nəticəsində yaranan elektron-deşik cütlərinin təyin olunmuş qiyməti  $N_0 \approx 3.8 \cdot 10^{18} 1/sm^3$  müqayisəsi göstərir ki, radiasion yolla yaranan yükdaşıyıcıların əsas hissəsi şüalanma dövrünün başlanğıc kinetik oblastında sərbəst və yaxud da mərkəzdə rekombinasiya proseslərinə uğrayır, yalnız  $4.3 \cdot 10^{-6}$ -da bir hissəsi keçiricilikdə iştirak edir. Bu nəticə silisiyum əsaslı materialların nüvə, kosmik və sair sahələrdə tətbiqində radiasiya materialşünaslığı üzrə böyük əhəmiyyət kəsb edir.

7. Neytronlarla şüalanma zamanı gedən nüvə və radiasion proseslər nəticəsində yaranan yükdaşıyıcıların hesabına formalaşan polyarlaşmanın hesabına nano-silisiyum dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissələrinin temperatur, tezlik və şüalanma dozasında asılılıq qanunauyğunluqları aşkar olunub.

### **Dissertasiyanın əsas nəticələrinin əks olunduğu məqalə və tezislər**

1. Aydan Garibli, Elchin Huseynov, Adil Garibov, Neutron activation analysis of silicon nanoparticles, 10 th international conference, Nuclear and Radiation Physics, Kurchatov c.,Kazakhstan, 8–11September, 2015, p. 32-33
2. Garibli A.A., Ramazanov M.Ə., Huseynov E.M. Electrical Conductivity- Temperature Dependencies of nano silicon particles exposed to neutron irradiation. Modern trends in physics. İnternational conference, Baku State University, Baku, 20–22 Aprel, 2017, p.32.
3. A.A.Garibli. M.A.Ramazanov, Electrical Conductivity – Frequency Dependence of nano silicon particles exposed to neutron irradiation. “Fizika və astronomiya problemləri” Beynəlxalq elmi konfransı, Bakı Dövlət Universiteti, Bakı, 25 may, 2018, s.225-228



4. Garibov A.A., Garibli A.A., Epithermal Neutrons Energy Transfer Process to nano-silicon, XII International Conference, Nuclear and Radiation Physics, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan, 24-27 June, 2019, p.60
5. Aydan Garibli, Elchin Huseynov, Effect of neutron flux on the frequency dependencies of electrical conductivity of
6. Aydan Garibli, Elchin Huseynov, Adil Garibov, Ravan Mehdiyeva, Additive analysis of nano silicon under the influence of neutron irradiation, International Journal of Modern Physics B, 10, 2016. p.1-10.
7. Aydan Garibli, Elchin Huseynov. The neutron irradiation effects on the temperature dependencies of the electrical conductivity of nanosilicon particles, Modern Physics Letters B, 28, 2017. P.1-10.
8. A.A.Qaribli, S.Z.Məlikova, M.Ə.Ramazanov, A.A.Qaribov, Nano-Silisiyümdə epitermal neytronların təsiri altında baş verən proseslərin Furiye İQ-spektroskopiyaya üsulu ilə tədqiqi, Journal of radiation researches. 2. 2018. s.109-118.
9. Aydan Garibli, Elchin Huseynov, Effect of Neutron Flux on the Frequency Dependence of Permittivity of Nano Silicon Particles, Silicon, 1. 2018. p.99-105.
10. A.A.Garibli, A.A.Garibov, E.M.Huseynov, Defect formation processes in the silicon nanoparticles under the neutron irradiation, Modern Physics Letters B, 26. 2019, p.1-14.
11. A.A.Garibli, Energy transfer and defect formation processes in nano silicon under the influence of epithermal neutrons, Eurasian journal of physics and functional materials, 2019, 3, p.242-253.
12. A.A. Garibli, Change mechanisms of electrical conductivity of nano-silicon under the influence of neutrons, Journal of Low Dimensional Systems, 2020, v.4 (1), p.32-35.

Dissertasiyanın müdafiəsi 7 iyun 2021-ci il tarixdə, saat 14<sup>00</sup>-da AR Nəqliyyat, Rabitə və Yüksək Texnologiyalar Hazırlıyının Milli Nüvə Tədqiqatları Mərkəzi nəzdində fəaliyyət göstərən FD 1.36 Dissertasiya Şurasının bazasında BFD 1.36 Birdəfəlik Dissertasiya Şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ 1073, Bakı, Qobu qəsəbəsi, Bakı-Şamaxı şossesi.

Dissertasiya ilə Milli Nüvə Tədqiqatları Mərkəzinin elmi kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Milli Nüvə Tədqiqatları Mərkəzinin rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat 7 may 2021-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 06.05.2021

Kağızın formatı: A5

Həcm: 34 147

Tiraj: 100 ədəd