

UDC: 541.15:541.183:539.104

## NANO-SİLİSIUMDA EPİTERMAL NEYTRONLARIN TƏSİRİ ALTINDA BAŞ VERƏN PROSESLƏRİN FURYE İQ-SPEKTROSKOPIYA ÜSULU İLƏ TƏDQIQI

A.A.Qəribli<sup>1</sup>, S.Z.Məlikova<sup>2</sup>, M.Ə.Ramazanov<sup>3</sup>, A.A.Qəribov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Milli Nüvə Tədqiqatları Mərkəzi,

<sup>2</sup>AMEA Radiasiya Problemləri İnstitutu,

<sup>3</sup>Bakı Dövlət Universiteti

[qaribliaydan@gmail.com](mailto:qaribliaydan@gmail.com)

**Xülasə:** Furye İQ-spektroskopik udma üsulu ilə nano-silisiyuma epitermal neytronların təsiri tədqiq olunub. Nano-silisiyuma 4000-400sm<sup>-1</sup> tezliklər oblastında xarakterik İQ-udma zolaqları identifikasiya olunub. Epitermal neytronların təsiri altında Furye-İQ-spektrlərdə müşahidə olunmuş bu tərkib hissələrin şüalanma vaxtından asılı olaraq konsentrasiyalarının nisbi vahidlərdə dəyişmə kinetikaları tədqiq olunub.

**Açar sözlər:** Furye-İQ spektr, epitermal neytronlar, nano silisium

Furye İQ-spektroskopik udma üsulu ilə nano-silisiyuma epitermal neytronların təsiri tədqiq olunub. Nano-silisiyuma 4000-400sm<sup>-1</sup> tezliklər oblastında xarakterik İQ-udma zolaqları identifikasiya olunub. Müəyyən edilib ki, epitermal neytronlarla şüalanmış nano-silisiyuma İQ-spektri aşağıdakı tərkib hissələrindən ibarətdir:

- Sintez və saxlama dövründə oksidləşmə proseslərinin nəticəsində yaranan oksid fazası (Si-O-Si, =SiO)
- Hidrid fazası (SiH<sub>x</sub>)
- Səthə birləşmiş üzvi qarışıqlar
- Hidrat və hidrosil örtüyü

Epitermal neytronların təsiri altında İQ-spektrlərdə müşahidə olunmuş bu tərkib hissələrin şüalanma vaxtından asılı olaraq konsentrasiyalarının nisbi vahidlərdə dəyişmə kinetikaları tədqiq olunub.

Epitermal neytronlarla nano-silisiyuma və onun tərkib hissələrini təşkil edən nüvələr arasında qarşılıqlı təsir prosesləri və nəticədə alınan radioaktiv izotop və elastik səpilmə nəticəsində sistemə verilən enerjilərin təsiri altında baş verən proseslərin mexanizmləri verilib. Müəyyən olunub ki, göstərilən hidrat örtüyü sürətli radiolitik parçalanmaya uğrayır və son nəticədə radiasiyaya davamlı izolə olunmuş hidrosil qrupu formalaşır.

Radiasion proseslər nəticəsində davamlı oksigenli struktur fraqmentlərin qatılığının artması da müşahidə edilib. Müşahidə olunmuş prosesləri kifayət qədər izah edən mexanizmlər verilib.

### Giriş

Nano-material və onun əsasında alınmış kompozit materialların struktur və optik xassələrinin tədqiqində geniş tətbiq olunan tədqiqat metodlarından biri də İQ-spektroskopiya üsuludur. Nano-materiallar içərisində fundamental elmi, praktiki, model kimi istifadəsi nöqtəyi nəzərdən daha çox əhəmiyyətli və aktual tədqiqat obyektini kimi nano-silisiyuma böyük əhəmiyyət kəsb edir. Bu nöqtəyi-nəzərdən nano-silisiyuma özünün elektron və optik xassələrinə görə daha çox diqqət kəsb edir [1-4]. Nano-silisiyuma özünün optik, elektrofiziki, fotoluminessent və digər xassələri ilə bərabər, yüksək radiasiyaya davamlılığına görə tətbiq sahələri günbəgün genişlənir.

Məsələn hələ 1990-cı ildə Li Kenxem [2] tərəfindən aşkar olunmuş və sonralar sübuta yetirilmiş nano-silisiyumun hissəciklərində kvant ölçü məhdudiyəti ilə əlaqəli olan qırmızı-qəhvəyi fotoluminessensiya müşahidə olunması nano-silisiyuma olan marağı daha da artırmışdı. Belə ki, sonrakı tədqiqatlar göstərdi ki, ölçüsü 10 nm-dən kiçik olan nano-silisiyumda böyük ölçülərdə müşahidə olunmayan görünən oblastda parlaq luminessensiya müşahidə edilməsi onun bərk maddə lazerləri əsasında yeni işıq mənbələri, optoelektronika cihazları və sair sahələrdə tətbiqini daha da artırır.

Digər tərəfdən də nano-silisiyumun səthi səviyyələri yüksək kimyəvi aktivliyi ilə də xarakterizə olunur [5-6]. Nano-silisiyumun bu xassəsindən istifadə edərək xüsusi sintez üsulları [7-8] və kompozit materialların alınması texnologiyaları işlənilibdir. Nano-silisiyum səthi doymamış rabitələr üzrə həm kompozit, həm də səthi müdafiə təbəqə komponentləri ilə qarşılıqlı təsirdə olur.

Odur ki, təqdim olunmuş işdə nano-silisiyum epitermal neytronların təsirini Furiye-İQ spektroskopiyaya üsulu ilə tədqiq olunub. İşin əsas məqsədi sistemi təşkil edən komponentlərin tərkibi, strukturu, əlaqə xüsusiyyətləri və digər fiziki xassələrində epitermal neytronların təsiri altında baş verən prosesləri xarakterizə etməkdir.

### **Təcrübi hissə**

Tədqiq olunmuş nano Si kubik quruluşa,  $>80\text{m}^2/\text{q}$  xüsusi səth sahəsinə, 100 nm hissəcik ölçülərinə,  $0,08\text{ q/sm}^3$  sıxlığa və 99% təmizliyə malikdir. Təqdim olunan işdə nümunələr Sloveniyanın Lyublyana şəhərində Jozef Stefan İnstitutunun “Reaktor Mərkəzində” TRİGA Mark II yüngül su (light water pool type reactor) tipli tədqiqat reaktorunda mərkəzi (kanal A1) kanalda  $2 \times 10^{13}\text{ n/sm}^2\text{san}$  sel sıxlığına malik neytron seli ilə tam güc rejimində (250kVt) 20 saata qədər kəsilməz rejimdə şüalandırılmışdır. Qeyd edək ki, bu kanalda tam güc rejimində mövcud neytron selinin parametrləri termal neytronlar üçün  $5.107 \times 10^{12}\text{ n/sm}^2\text{san}$  ( $1 \pm 0.0008$ ,  $E_n < 625\text{ eV}$ ), epitermal neytronlar üçün  $6.502 \times 10^{12}\text{ n/sm}^2\text{san}$  ( $1 \pm 0.0008$ ,  $E_n \sim 625\text{ eV} \div 0.1\text{ MeV}$ ), sürətli neytronlar üçün  $7.585 \times 10^{12}\text{ n/sm}^2\text{san}$  ( $1 \pm 0.0007$ ,  $E_n > 0.1\text{ MeV}$ ) və nəhayət bütün neytronlar üçün mərkəzi kanalda sel sıxlığı  $1.920 \times 10^{13}\text{ n/sm}^2\text{san}$  ( $1 \pm 0.0005$ ) kimidir [24-26]. Beləliklə mərkəzi kanalda neytronların orta enerjisi təqribən epitermal neytronların enerjisinə ( $E_n \sim 625\text{ eV} \div 0.1\text{ MeV}$ ) uyğun gəlir.

İlkin halda və 20 saata qədər neytron şüalanmanın təsirinə məruz qalmış nümunələrin SEM analizləri “ZEISS SIGMA VP FE-SEM” qurğusunda aparılıb.

### **Alınmış nəticələr və onların müzakirəsi**

#### **I. Nano-silisiyumun Furiye İQ-spektroskopik tədqiqi**

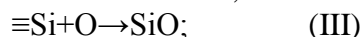
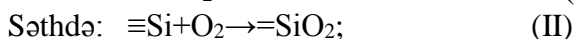
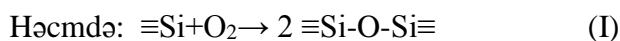
Nano-silisiyumun Furiye-İQ spektri şəkil 1-də verilib və ədəbiyyat nəticələrinə uyğundur [4,11,12]. Göründüyü kimi spektri əsasən iki hissəyə ayırmaq olar. Birinci oblast nano-silisiyumun qəfəs rəqsləri oblast  $400\text{--}2000\text{ sm}^{-1}$ -ə uyğundur. Burada daha intensiv udulma oblastı  $1161$  və  $1105\text{ sm}^{-1}$  oblastında müşahidə olunur. Bu spektr əsasən nano-silisiyumda oksigen atomları ilə əlaqədardır. Müşahidə olunmuş  $1161$  və  $1105\text{ sm}^{-1}$  dublet signalı körpü Si—O—Si əlaqələrinin asimmetrik ( $\nu_{\text{as}}$ ) valent rəqslərinə müvafiqdir. [1-4]. Furiye İQ spektrdə yeni hazırlanmış nano-silisiyuma xas  $\text{SiH}_x$  – in deformasiya rəqslərinə uyğun  $\nu = 600\div 700\text{ sm}^{-1}$ , monokristallik silisiyuma uyğun çoxfononlu udulma oblastı  $\nu = 610\text{ sm}^{-1}$ , qarışıq karbonun rəqslərinə uyğun  $\nu = 605\text{ sm}^{-1}$  və bor qarışıqına uyğun  $\nu = 621\text{ sm}^{-1}$  müşahidə olunmayıb. Şəkil 1-

də verilmiş spektrdə aşağı tezliklər oblastında udulma  $\nu=479 \text{ sm}^{-1}$   $\delta\text{Si}$  əlaqələrində deformasiya rəqslərə uyğundur.

Bundan başqa nano-silisiyumun Furiye İQ spektrində zəif udulma zolağı  $800 \text{ sm}^{-1}$  və intensiv geniş  $1075 \text{ sm}^{-1}$  maksimumla xarakterizə olunan Si—O—Si əlaqələrində simmetrik və qeyri simmetrik valent rəqslərinə uyğun udulma zolaqları da müşahidə oluna bilər.

Göründüyü kimi, tədqiq olunmuş nano-silisiyumda geniş oblastda qeyri-stexiometrik  $\text{SiO}_x$  ( $x=1\div 2$ ) oksid təbəqəsi mövcuddur. Müəyyən edilib ki,  $\text{SiO}_x$  – də  $x$ -kiçildikcə (11)  $\nu_{\text{as}}$  ( $\text{SiOSi}$ ) udulma zolağının maksimumu kiçik dalğa ədədləri oblastına sürüşür. Məsələn  $x=2$  olduqda  $\nu\approx 1080 \text{ sm}^{-1}$  olduğu halda  $x=1$  olduqda isə  $\nu=980 \text{ sm}^{-1}$ . Lakin bu zaman simmetrik rəqslərin tezliyi isə əksinə  $\nu_s$  ( $\text{SiOSi}$ )  $800$ -dən  $875 \text{ sm}^{-1}$ - artır. Nano-silisiyumda müşahidə olunan Furiye İQ-spektrlərdə udulma oblastlarının maksimumunun  $\text{SiO}_x$  – də qeyri stexiometriyalıqla əlaqədar yerdəyişməsi  $\text{SiO}_x$  tetraedrlərində qeyri nizamlılıqla əlaqədardır.

Qeyd etmək lazımdır ki, nano-silisiyumu uzunmüddət hava ilə təmasda saxladıqda səthi (1-2) nm qalınlığında oksid təbəqəsi ilə örtülür, bu isə İQ udulma oblastının  $\nu=1085 \text{ sm}^{-1}$  oblastına uyğundur. Beləliklə, Furiye İQ spektroskopik tədqiqatlar göstərir ki, nano-silisiyumda oksigen əsasən qəfəs düyünləri arasında yerləşir və əksər hallarda elektroneytral vəziyyətdə olur. Onun qəfəsdə qatılığı ədəbiyyat məlumatlarına görə  $C_0\approx 10^{15}\div 10^{18} \text{ sm}^{-3}$  intervalında dəyişir. Qəfəsdə düyünlər arasında oksigen əsasən körpü vəziyyətində olur.



Göstərilən sxemlər üzrə nano-silisiyumda müxtəlif növ oksigenli birləşmələr yaranır.

Nano-silisiyumun Furiye İQ spektrində hidrid fazasına müvafiq udulma oblastlarında da udulma zolaqları müşahidə olunur. Silisiyumun struktur defektlərinin  $sp^3$  orbitalları ilə qarşılıqlı təsirindən və yaxud da qəfəs düyünləri aralarında yerləşmək nəticəsində optik müşahidə oluna bilən halda olur. Məlum olduğu kimi, tədqiq olunmuş nano-silisiyum nümunələrinin tərkibində 1%-ə qədər qarışıq saxlayır. Bu qarışıqlar nano-silisiyum quruluşunda Si atomlarını əvəz edərək müxtəlif növ akseptor və donor səviyyələr yaradır. Məhz hidrogen atomları bu növ mərkəzlər tərəfindən də tutula bilər. Ədəbiyyatda Si-H əlaqələrinin rəqsinə uyğun udulma zolaqlarına valent oblastında: 2210, 2191, 2178, 2123, 2048, 1994, 1950, 1946  $\text{sm}^{-1}$  və deformasiya oblastda isə 812 və 791  $\text{sm}^{-1}$  zolaqları aid olunub [11,12]. Kristallik və poralı silisiyumda hidrid fazaya adətən  $\text{SiH}_x$  və  $\text{Si-CH}_x$  ( $x=1,2,3$ ) qrupları da aid edilir və spektrdə valent və deformasiya oblastlarında müşahidə olunur. Bizim tədqiq etdiyimiz nano-silisiyumun Furiye İQ spektrlərində valent rəqsləri oblastında 2257  $\text{sm}^{-1}$  udulma zolağı uyğun gəlir. Nano-silisiyumda səthi defekt hallarında sərbəst əlaqələri ilə karbohidrogenlərlə də əlaqə yarada bilər və İQ spektrlərində 2850-2950  $\text{sm}^{-1}$  oblastında metil və metilen qruplarının simmetrik və qeyri simmetrik valent rəqslərinə uyğun 2856, 2927 və 2958  $\text{sm}^{-1}$  maksimumları müşahidə edilir.

Deformasiya rəqslər oblastında  $\delta_{\text{as}}$  ( $\text{CH}_3$ ) və  $\delta_s$  ( $\text{CH}_3$ ) rəqslərinə uyğun olan 1460 və 1377  $\text{sm}^{-1}$  udulma zolaqları müşahidə olunub. Bundan başqa spektrdə metilen qrupunun qayçı rəqslərinə uyğun 1410  $\text{sm}^{-1}$ , metilen qrupunun qayçı və sarkaç rəqslərinə uyğun 1230 və 1182  $\text{sm}^{-1}$  udulma zolaqları da müşahidə oluna bilər.

Nano-silisiyumun Furiye İQ spektrinin 3300-3903  $\text{sm}^{-1}$  udulma oblastında səthi hidrosil qrupu və adsorbsiya olunmuş su ilə əlaqədar udulma zolaqları müşahidə olunur.

Nano-silisiyumun hidrosil qrupları haqqında məlumat hidrid və karbohidrogen fazalarına nisbətən çox azdır. Məsələn izolə olunmuş  $\text{SiOH}$  qrupunda  $\nu$  (OH) rəqslərinə uyğun dar ( $\sim 10$

$\text{sm}^{-1}$ )  $3736\text{sm}^{-1}$  udma zolağı bir-birinə yaxın yerləşən və hidrogen əlaqəli SiOH qruplarının valent rəqsləri kiçik dalğa uzunluqlarında müşahidə olunur.

$\delta(\text{SiOH})$  deformasion rəqslərinə uyğun udma zolağı  $800\text{-}900\text{ sm}^{-1}$  oblastında müşahidə olunur. Oksidləşmiş səthdə tək  $\nu_{\text{as}}(\text{SiOH})$ - uyğun

$$\begin{aligned}\nu_{\text{as}}(\text{OH}) &= 3750\text{ sm}^{-1} \\ \nu_{\text{s}}(\text{OH}) &= 3650\text{ sm}^{-1} \\ \delta(\text{HOH}) &= 1600\text{ sm}^{-1}\end{aligned}$$

müşahidə edilir. Bizi tədqiq etdiyimiz nano-silisiyumun ilkin nümunəsinin Furiye İQ spektrində hidrosil örtüyü xarakterizə edən  $3340, 3842, 3903\text{ sm}^{-1}$  udulma zolaqları müşahidə olunur.

## II Epitermal neytronların nano-silisiyuma təsirinin Furiye İQ-spektroskopik tədqiqi.

Əvvəlki hissədə nano-silisiyumun Furiye İQ-spektrlərini şərh etdikdə biz göstərdik ki, ümumi spektri əsasən 3 hissəyə ayırmaq olar.

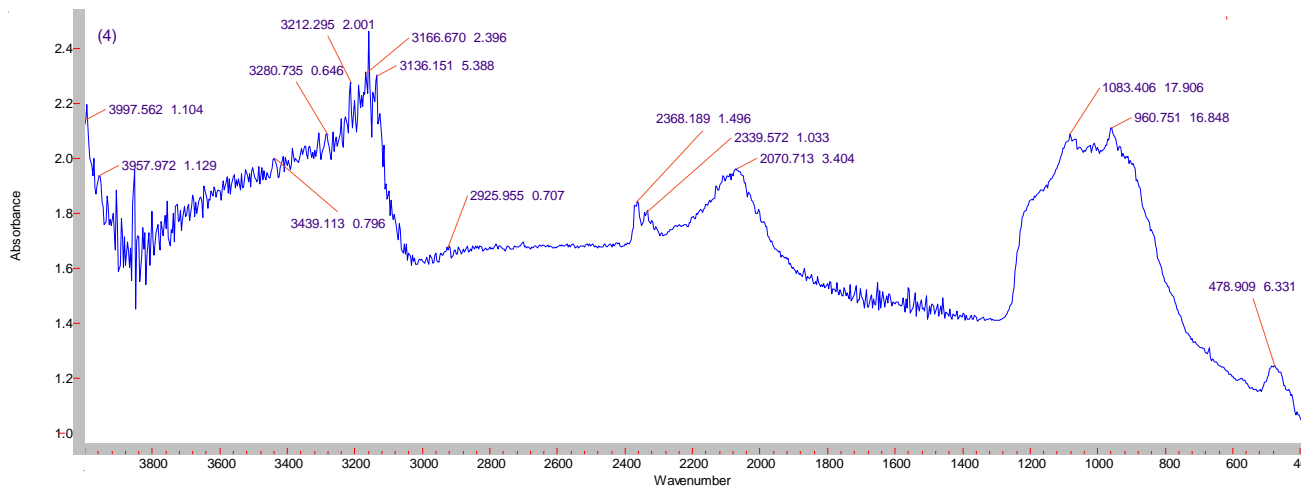
I nano-silisiyumda sintez və saxlama dövrlərində oksidləşmə prosesləri nəticəsində yaranan (Si O Si), (SiO) karkaslarına aid udma zolaqları əsasən  $479\text{-}1400\text{ sm}^{-1}$  udma zolağını əhatə edir.

II Hidrogenlə qarşılıqlı təsirdən yaranan ( $\text{SiH}_x$ ) fazasının müvafiq udma zolaqları ( $\nu\text{-}2000\text{-}2400\text{sm}^{-1}$ )

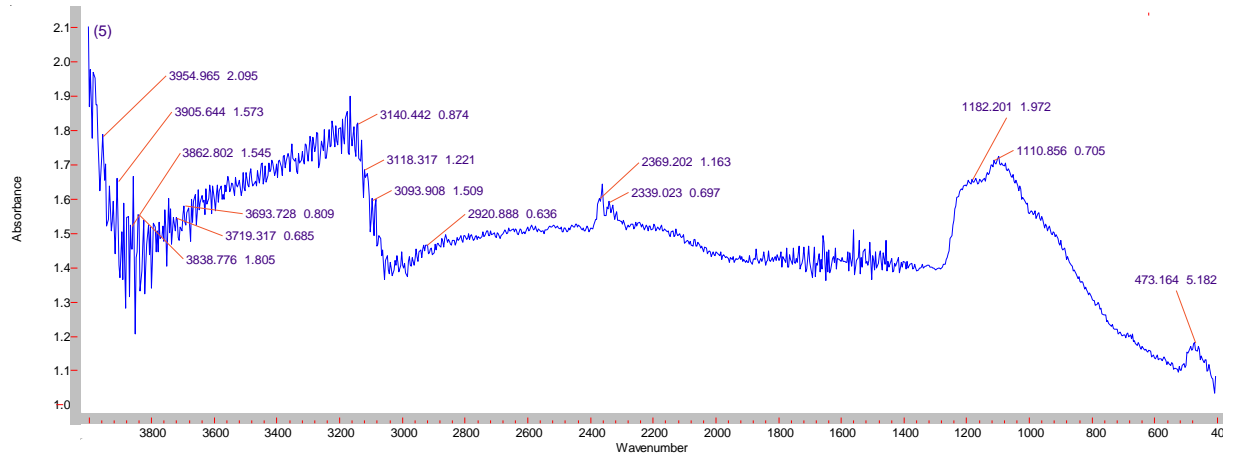
III nano-silisiyumda mövcud olan hidrat və hidrosil örtüyü.

Bu oblast çox mürəkkəb olub molekulyar, dissosiotik adsorbsiya olunmuş su molekulları və müxtəlif növ hidrosil qruplarını əhatə edir. Bu oblast təqribən  $\nu=3100\text{-}3900\text{sm}^{-1}$  dalğa ədədlərinə uyğundur.

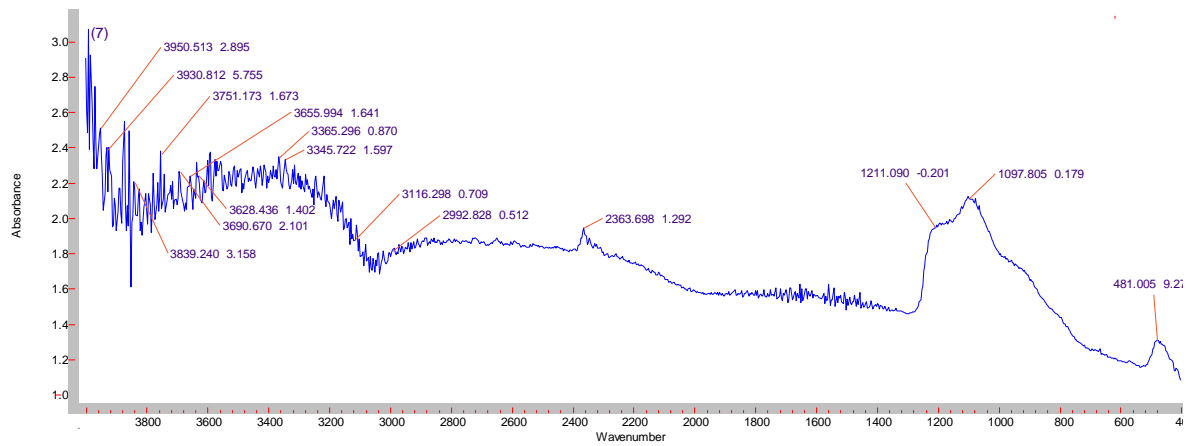
Epitermal neytronlarla  $1\text{-}20$  saat müddətində şüalanmış nano-silisiyumun Furiye İQ-spektrləri şəkil 1-də verilib.



1 saat



5 saat



10 saat

Şək. 1 İlkin və müxtəlif vaxtlarda epitermal neytronlarla şüalanmış nano-siliciumun Furiye İQ spektrləri

Şüalanmamış və müxtəlif vaxtlarda epitermal neytronlarla şüalanmış nano-siliciumun Furiye İQ spektrlərə 1. şüalanmamış nano-siliciumun İQ spektri, 2. 1 saat müddətində, 3. 5 saat müddətində, 4. 10 saat müddətində şüalanmış nano-siliciumun İQ spektrləri. 5-20 saat müddətində şüalanmış nano-siliciumun İQ spektri.

Epitermal şüalanmaya məruz qalmış ilkin nano-silicium nümunəsinin tərkibi Si-28 (92,2%), Si-29 (4,7%), Si-30 (3,1%) izotop tərkibli silisium, 1 %-ə qədər idarə olunmayan qarışıqlar, oksigen və hidrogen elementlərindən ibarətdir.

Epitermal neytronlarla şüalandırıldıqda silisium ilə neytronlar qarşılıqlı təsirdə olur. [13,14]

Elastik səpilmə mexanizmi ilə qarşılıqlı təsir zamanı nano-silicium mühitinə verilən maksimal enerji [13] ifadəsi ilə təyin edilib.

$$E_{\max}=4A \cdot E_n \cdot \cos^2\varphi/(1+A^2) \quad (1)$$

Nano-silicium kütləsinin əsas hissəsini təşkil edən silisium nüvələri ilə hər elastik toqquşma zamanı verilən təpmə enerjisi (1) ifadəsi ilə epitermal neytronların  $E_n \approx 625 \text{ eV} \div 0,1 \text{ MeV}$  intervalında təyin edilib və 0,05eV və 7,9eV-ə uyğun olaraq bərabərdir.

Bundan başqa silisium 28-29-30 izotopları tərəfindən epitermal neytronlar radiosion tutma prosesinə uğrayaraq  $\beta$  radioaktiv  $^{14}_{31}\text{Si}$  izotopunu yaradır. İlkin nano-silisiumda bu izotopların faizlə miqdarı əsasında vahid həcmdə nüvələrin sayı, mikroskopik en kəsiklərinin sorğu kitablarından qiymətləri [14] əsasında makroskopik en kəsikləri təyin edilib.

$$\Sigma_a = \sigma_a \cdot n; \quad \Sigma_s = \sigma_s \cdot n \quad (2)$$

Havada  $\sigma_a$ -radiasia tutmanın,  $\sigma_s$ -səpilmənin mikroskopik en kəsikləri, n-müvafiq izotopların vahid həcmdə miqdarlarıdır.

Toqquşmaların sayı isə

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

havada  $\phi$ =neytron seli (neytron/sm<sup>3</sup>san) ifadəsi ilə təyin edilir.

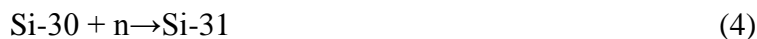
Uyğun qaydada epitermal neytronlarla nano-silisium tərkib izotoplarının səpilmə sayları və yuxarıda təyin olunmuş hər səpilmə aktı zamanı mühitə verilən enerji ( $E_{\min}=0,05\text{eV}$ ;  $E_{\max}=7,9\text{eV}$ ) qiymətləri əsasında hər saniyədə 1sm<sup>3</sup> həcmə verilən səpilmə enerjisi təyinedilə bilər.

$$\Sigma E_{\max} = N_{\text{səpil}} \cdot (E_{\min} + E_{\max}) = 1,44 \cdot 10^{11} \text{ eV/sm}^3 \text{ san}$$

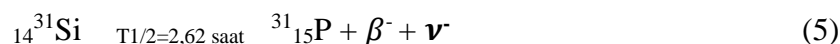
Nümunələrin  $\tau=20$  saat şüalanma müddətində isə mühitə verilən təpmə enerjisi

$$\Sigma E_{\max} \times \Delta t = 3,2 \cdot 10^{16} \text{ eV/sm}^3;$$

Digər tərəfdən də epitermal neytronların təsiri altında radiosion tutma prosesi nəticəsində



alınan  $^{14}_{31}\text{Si}$  izotopu betta radioaktiv olub



Enerjisi 1,266MeV olan  $\beta^-$  hissəcik və antineytrin buraxır.

Epitermal neytronlarla Si-30 nüvəsinin vahid zamanda toqquşma proseslərinin sayı (3) ifadəsi ilə sorğu materialları ( $\sigma_a \approx 0,41\text{barn}$ ,  $\Sigma_a = 2,09 \cdot 10^{-5} \text{ 1/sm}$ ) əsasında təyin edilib və  $N_{\text{Si-30}} = 4,01 \cdot 10^{18} \text{ neytron} \cdot \text{atom/sm}^3 \cdot \text{san}$ -a bərabərdir.

Mühitin hər 1sm<sup>3</sup> həcmində  $\tau=20$ saat ərzində yaranan Si-31 izotopunun sayı

$$\Delta N = w \cdot \Delta t = 4,01 \cdot 10^{18} \text{ atom/sm}^3 \text{ san} = 7,2 \cdot 10^4 \text{ san} = 2,84 \cdot 10^{13} \text{ atom/sm}^3 \text{ olacaqdır.}$$

Hər betta-parçalanma zamanı ayrılan  $E\beta$  enerjisi əsasında 20 saat ərzində mühitə yaranan betta hissəciklərin ümumi enerjisi

$$\Sigma E\beta = E\beta \cdot N\beta = 3,62 \cdot 10^{19} \text{ eV} \quad (IV)$$

Furye İQ-spektroskopik tədqiqatlar göstərir ki, tədqiq olunmuş nano-silisium nümunələrində learkos oksid, hidrid və hidrat örtüyü olduğu aşkar olundu. Hidrat örtüyündə molekulyar su, müxtəlif tip hidroksil qrupları mövcuddur.

Epitermal neytronların təsiri altında nano-silisiumda baş verən elastik səpilmə və radiosion tutma nəticəsində nano-silisium verilən şüa və təpmə enerjilərinin təsiri altında tərkibi

təşkil edən komponentlərdə müxtəlif fiziki və kimyəvi proseslər baş verir. Yuxarıda göstərilən proseslərlə yanaşı epitermal neytronların tərkib komponentlərə təsiri mexanizmi də müxtəlifdir.

Epitermal neytronların ilkin E enerjisinin mühitdə elastik səpilmə zamanı itirməsi, yəni toqquşduğu mühitə vermə qabiliyyəti enerjiden yox toqquşduğu nüvənin kütləsindən asılıdır. Neytronun nüvə toqquşması zamanı nisbi maksimal enerji itkisi ( $\alpha$ )

$$\alpha = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2 \quad (\text{V})$$

ifadəsi ilə təyin edilir.

Göründüyü kimi, nano-silisiyuma mövcud olan nüvələr üçün  $\alpha$ -müxtəlif qiymətlər alır. Hidrogen nüvəsi üçün düşən neytronun enerji itkisi maksimaldır  $\alpha=0$

$$\frac{E-E'}{E} = 1 - \alpha; \quad E' = \alpha E \quad (\text{VI})$$

yəni düşən neytron hidrogen nüvəsi ilə elastik toqquşma nəticəsində enerjisinin hamısını hidrogen nüvəsinə verir.

Epitermal neytronların mühit ilə elastik qarşılıqlı təsir prosesində digər parametrlər nüvələr ilə qarşılıqlı təsirdə orta loqarifmik enerji itkisi parametri də istifadə olunur. [16]

$$l_g = \ln \frac{E}{E'} = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1} \quad (\text{VII}) \text{ və yaxud da}$$

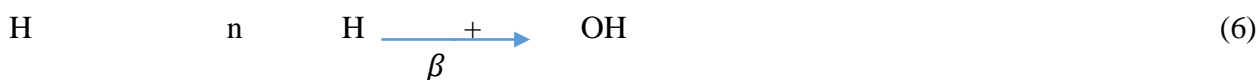
$$l_g = 1 + \frac{\alpha}{1-\alpha} \ln \alpha \quad (\text{VIII})$$

Göründüyü kimi, bu parametrlər də düşən neytronun enerjisindən asılı deyil və toqquşulan nüvənin kütləsindən asılıdır.

Bizim tədqiq etdiyimiz nano-silisiyuma tərkib hissəsini təşkil edən nüvələr ilə neytronların toqquşma zamanı nisbi maksimal enerji itkisi, orta loqarifmik enerji itkisi və neytron 0,0253eV-a qədər, yəni termal enerjiyə qədər enerji itkisi üçün toqquşmaların sayı aşağıda verilib. [15,16]

| Element               | A-atom kütləsi | $\alpha$ | $\epsilon$ | Termolizasiyaya qədər tələb olunan toqquşmaların sayı |
|-----------------------|----------------|----------|------------|---|
| Hidrogen              | 1              | 0        | 1,00       | 18  |
| Su (H <sub>2</sub> O) | 18             |          | 0,920      | 20  |
| Karbon                | 12             | 0,716    | 0,158      | 115   |

Göründüyü kimi epitermal neytronlar ən çox ehtimallı enerji itkisinə hidrogen və su molekulları ilə qarşılıqlı təsirdə baş verir. Hidrogen və su molekulları ilə hər toqquşma anında 34-5600 eV-a qədər enerji itirir. Digər tərəfdən də radiosion tutma nəticəsində yaranan Si-31 nüvəsinin betta şüalarının təsiri altında ilkin növbədə adsorbsiya olunmuş su molekulları parçalanır.



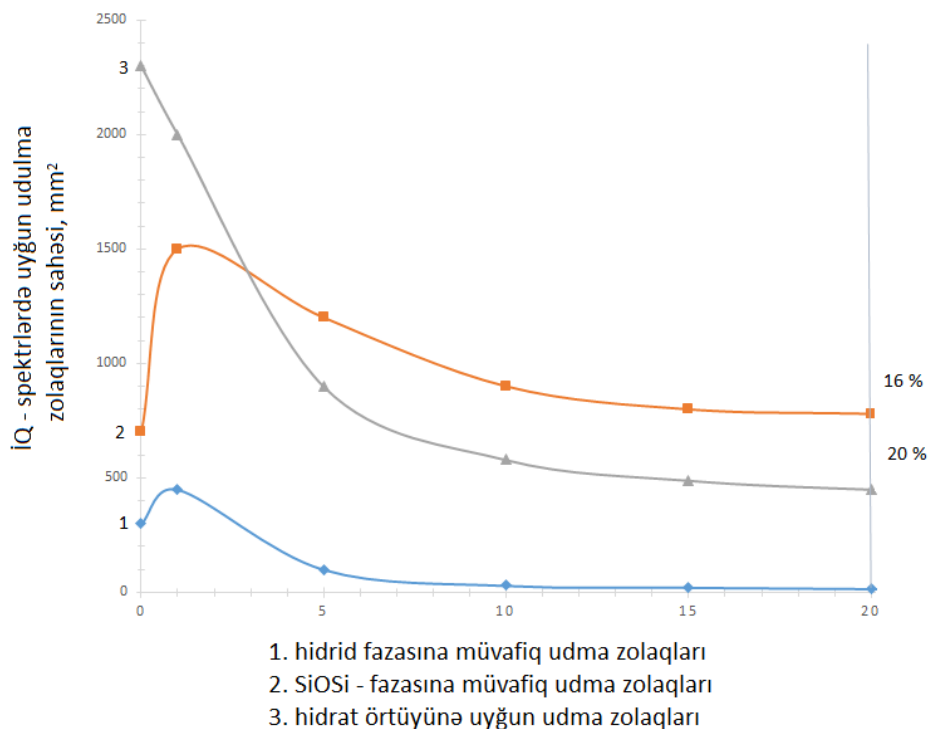
Əmələ gəlmiş H atomları struktur defektləri tərəfindən tutulur.



Parçalanma məhsulları olan oksigenli fraqmentlər



Nano-silisiyuma epitermal neytronların təsiri altında baş verən səthi nüvə kimyəvi prosesləri keyfiyyətcə xarakterizə etmək məqsədi ilə hər komponentə uyğun udulma zonasının təqribi təyin olunmuş sahələrinin şüalanma vaxtından asılılığı qurulub. (şəkil 2)



Şək. 2. Nano-silisiyuma epitermal neytronların təsiri altında tərkib hissəsini təşkil edən (Si O Si) oksid (2)  $\text{SiH}_x$  hidrid (1) və hidrat (3) fazalarına aid İQ udma oblastlarının sahələrinin şüalanma vaxtından asılılığı.

Göründüyü kimi (6) prosesi nəticəsində molekulyar suyun miqdarı bütün müşahidə dövründə azalır. (8) prosesi üzrə müxtəlif növ hidrosil qrupları əmələ gəlir. Hidrosil qruplarının əmələ gəlməsini şüalanma vaxtı  $\tau \geq 10$  saat olan nümunələrin İQ spektrlərində  $\nu = 3655, 3750 \text{ cm}^{-1}$  udulma zolaqlarının intensivliklərinin nisbi artımında görünür. Bu zaman həmçinin də (7) prosesi üzrə hidrid, (8)-(10) prosesləri ilə oksigenli fazanın miqdarının artması müşahidə olunur.

Lakin şüalanma vaxtının sonrakı anlarında struktur OH və hidrid qruplarının da hidrogen nüvəsinə verilən böyük təpmə və betta şüaların enerjisi hesabına da parçalanma prosesləri gedir və nəticədə  $\tau \geq 10$  saat şüalanma vaxtından sonra hidrid faza tam yox olur. Oksigenli fazanın miqdarı isə  $\tau \approx 1-10$  saat müddətində maksimumdan keçərək  $\tau \geq 10$  saat müddətində epitermal neytronlarla şüalanma nəticəsində özünün stabil stasionar qiymətini alır. Bu isə göstərir ki, nano-silisiyuma tərkibində oksigen müxtəlif formada, daha stabil  $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$  körpü və yaxud da səthi SiO, SiOH formalarında olur.



Sonuncu 3 forma udulan və təpmə enerjiləri hesabına asanlıqla parçalanır və stabil SiO<sub>2</sub> məxsus ≡Si–O–Si≡ körpü halları qalır. Epitermal neytronlarla şüalanmış nano-silisiyuma SEM (şəkil 3) üsulu ilə tədqiqində şüalanma nəticəsində τ=10-20 saat səthi oksigen qatılığının 17,5%-dən 20,4%-ə qədər yəni 16,5% artması müşahidə olunur. İQ-spektroskopik tədqiqatlar nəticəsində (şəkil 2, əyri 2-nin başlanğıc və son nöqtələri (S<sub>av.</sub>=700mm<sup>2</sup> və S<sub>son</sub>≈840mm<sup>2</sup>) uyğun qiymətlərin fərqi də təqribən 16-20% tərtibindədir. Yəni iki aslı olmayan tədqiqat nəticəsində sübut olunub ki, epitermal neytronların təsiri altında gedən proseslər nəticəsində stabil oksigenli birləşmə yaranır.

Digər tərəfdən də epitermal neytronlarla şüalanmış nano-silisiyuma nümünələrinin İQ spektri və şəkil 2, əyri 3 göstərir ki, tədqiq olunmuş neytron seli qiymətləri oblastında radiosion davamlı hidrosil qrupu formalaşır.

Beləkilə nano-silisiyuma epitermal neytronlarla şüalanması proseslərinin Furiye İQ spektroskopik tədqiqi əsasında aşağıdakı nəticələrə gəlmək olar.

- Nano-silisiyuma sintezi və saxlama dövründə aşağıdakı tərkib fraqmentləri formalaşır.
- oksigenli faza
- hidrid fazası
- hidrat fazası (molekulyar su və hidrosil qruplar)
- az miqdarda üzvi sorbsiya olunmuş üzvi qarışıqlar müşahidə olunur.
- enerjisi (625÷1x10<sup>5</sup>)eV olan epitermal neytronların təsiri altında bu fazaların konsentrasiyalarının dəyişmə kinetikasının keyfiyyət xüsusiyyətləri aşkar olunub.
- müəyyən olunub ki, epitermal neytronların təsiri altında hidrat təbəqəsinin sürətli parçalanması baş verir. Hidrat fazasında baş verən radiosion çevrilmə prosesləri nəticəsində hidrid və oksigenli fazaların yaranması baş verir. Hidrat fazasının parçalanması nəticəsində müxtəlif növ nisbətən radiosion davamlı hidrosil qrupları yaranır.
- hidrid fazası epitermal neytronlarla şüalanma vaxtından asılılığı 0-5 saat müddətində maksimumdan keçərək sonrakı şüalanma vaxtlarında müşahidə olunmaz olur.
- nano-silisiyuma hidrat fazasının parçalanma məhsulları və ətraf mühit oksigeni ilə qarşılıqlı təsir nəticəsində τ = 0 – 10 saat ərzində oksigenli fazanın miqdarı maksimumdan keçərək, sonda radiosion davamlı oksid təbəqəsi yaranır.

Tədqiq olunmuş vaxt intervalında (τ=20 saat) nano-silisiyuma neytronların təsiri altında oksigenli fazanın miqdarının təqribən 16-20% artımı müşahidə olunur.

### Ədəbiyyat

1. Л.Л.Кузнецова, А.И.Ефимова, Осминкина, Л.А.Голованц, В.Ю.Тимошенко, П.Р.Кашкаров. Исследование в слоях двухлучепреломления в слоях пористого кремния методом инфракрасной Фурье-спектроскопии / Ж.Физика Твердого Тела, 2002, Т.44, вып.5, с.780-784.
2. Canham I.T. // Appl.Phys. Lett, 1990, v. 57, p.1046-1048
3. Wolkin M.V., Jorne J. Fauchet P.M, Alan.C.Delerue G. // Phys.Rec.Lett, 1999, v.82, p.197-200.
4. Ищенко А.А., Фетисов Г.В.Асланов Л.А. Напокремний: свойства, получение, применение, методы исследования и контроля. М.Физматлит, 2011., с.648
5. Dokyoung Kim, Jonathan M. Zuidema, Jinyoung Kang, Youlin Pan, Lianbin Wu, David Warther, Barry Arkles, and Michael J. Sailor, Facile surface modification of hydroxylated Silicon nanostructures using heterocyclic silanes. DOI: 10.1021/jacs.6b08614, J. Am. Chem. Soc. 2016, 138, 15106–15109

6. Chang Huan and Sun Shuqing. Silicon nanoparticles: Preparation, properties, and applications. Chin. Phys. B Vol. 23, No. 8 (2014) 088102
7. Асланов Л.А., Захаров В.Н., Захаров М.А., Яценко А.В. Способ получения стабилизированных кластеров кремния // Патент РФ N.2415079 опуб.27.03.2011
8. Асланов Л.А., Захаров В.Н., Савилов С.В. Способ получения напоякристаллического кремния // Патент РФ N.2471709 опуб. 10.07.2013
9. А.А.Гарибов, Н.Н. Гаджиева, С.З.Меликова. Исследование  $\gamma$  –облученных боросиликатов методами ИК-спектроскопии и электропроводности // Журнал физика и химия обработки материалов., 2008, N3, с.19-23.
10. Kamychny A.I., Zakharov Y.N., Zakharov M.A., Yatsunko A.V., Aslanov L.A., Magdossis Photoluminescent silicon nanocrystals stabilized by ionic Liquid // Journal of Nanoparticle Research 2011, v.13, p.1971-1978
11. Ефимова А.А., Зайцев В.Б., Болдырев Н.Ю., Кашкаров П.К. Инфракрасная Фурье-спектроскопия: Учебное пособие М.: Физический факультет МГУ, 2008, 133с.
12. Кашкаров П.К., Тимошенко В.Ю. Оптика твердого тела и низкоразмерных структур. М.,: Пумс, 2008, 292с.
13. К.Н.Мухин Экспериментальная ядерная физика Москва, Атомиздат, 1974, с.309
14. Т.В.Голасивили, В.П.Чечев, А.А.Абов, В.М.Куприянов, А.П.Демидов Справочник нуклидов-2 Москва, ФГУП «ЦНИИ Атоминформ 2002, 345с.
15. Reuss.P. Neutron physics: EDP Sciences, 2008
16. Lamarch J.R. "Introduction to Nuclear Reactor Theory Addison-Wesley Pub.Co., Reading, MA,1975

## STUDY OF PROCESSES UNDER THE INFLUENCE OF EPITHERMAL NEUTRONS IN NANOSILICON BY THE FOURIER-IR-SPECTROSCOPY METHOD

A.A. Garibli, S.Z. Melikova, M.A. Ramazanov, A.A. Garibov

**Abstract:** The effect of epithermal neutrons on nano-silicon fusion by IR spectroscopic absorption was investigated. Specific IR-absorption strips have been identified in nano-silicon in the 4000-400  $\text{cm}^{-1}$  frequency range. Under the influence of epithermal neutrons, the kinetics of change of their concentrations in relative units were investigated depending on the radiation time of these components observed in IR-spectra.

**Keywords:** IR-spectra, epithermal neutrons, nano-silicon

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭПИТЕРМАЛЬНЫХ НЕЙТРОНОВ В НАНОКРЕМНИИ МЕТОДОМ ФУРЬЕ-ИК-СПЕКТРОСКОПИИ

А.А. Гарибли, С.З. Меликова, М.А. Рамазанов, А.А. Гарибов

**Резюме:** Исследовано влияние эпитеpmальных нейтронов на нано- кремния методом Фурье-ИК-спектроскопии. Основные полосы ИК-поглощения были идентифицированы в нано-кремнии в диапазоне частот 4000-400  $\text{cm}^{-1}$ . Под влиянием эпитеpmальных нейтронов исследовалась кинетика изменения их концентраций в относительных единицах в зависимости от времени излучения этих компонентов, наблюдаемых в ИК-спектрах.

**Ключевые слова:** Фурье-ИК-спектры, эпитеpmальные нейтроны, нано-кремний