

## NANOKRİSTALLİK SİLİSİUM KARBİD (3C-SiC) HİSSƏCİKLƏRİNDƏN NEYTRON SELİNİN SƏPİLMƏSİ

**E.M. HÜSEYNOV**

*Milli Nüvə Tədqiqatları Mərkəzi, AZ1073, İnşaatçılar pr., 4, Bakı, Azərbaycan  
AMEA - nın Radiasiya Problemləri İnstitutu, AZ 1143, B.Vahabzadə 9, Bakı, Azərbaycan  
elchin.h@yahoo.com, e.huseynov@mmtm.az*

Fərqli enerjilərdə neytron selinin nanokristallik 3C-SiC hissəciklərindən səpilməsi kompüter modelləşməsi ilə öyrənilmişdir. Neytron selinin nanomaterialdan səpilməsi 3C-SiC hissəciklərini təşkil edən silisium və karbon atomları üçün ayrı-ayrılıqda tədqiq edilmişdir. Silisium və karbon atomlarının fərqli tip izotoplarında səpilmənin effektiv en kəsiyi fərqli olduğundan, hər bir stabil izotop üçün modelləşmə ayrı-ayrılıqda aparılmışdır. Eyni zamanda, hər bir stabil izotop üçün elastik, qeyri-elastik, elastik olmayan səpilmələr və ümumi effektiv en kəsiyi nəzərdən keçirilmişdir.

**Açar sözlər:** nanokristallik 3C-SiC, neytron səpilməsi, effektiv en kəsiyi  
**PACS:** 61.46.+w, 28.20.Cz, 25.40.Dn, 78.70.Nx, 61.80.Hg

### 1. GİRİŞ

Metallar, yarımqeçiricilər və oksidlər nano ölçülərdə son zamanlar dünya tədqiqatçıları tərəfindən sürətlə öyrənilməyə başlanılmışdır [1-15]. Çünki, bütün tip nanomateriallar öz xassələrinə görə digər hallardan kəskin fərqlənirlər [16-21]. Nanomateriallar unikal kvant ölçü effektləri, daxili və səth effektlərinə malikdirlər [16-18]. Nano ölçülərdə SiC hissəcikləri son zamanlar mükəmməl fiziki və fiziki-kimyəvi xassələrinə görə dünya tədqiqatçılarının diqqət mərkəzindədir. SiC-in kubik (3C-SiC və ya β-SiC) modifikasiyalı politiipi digərləri ilə müqayisədə daha geniş tətbiq sahəsinə malikdir. Son zamanlar, nano 3C-SiC hissəcikləri unikal xassələrinə görə nanokompozit, nanoelektronika və nanomehanika sistemlərdə çox geniş tətbiq olunur [22-24]. Tətbiqi zamanı nanokristallik 3C-SiC hissəciklərini müxtəlif üsullarla aşqarlamak tələb olunur. Nanomaterialları aşqarlamak üçün dünyada ən dəqiq üsullardan biri neytron seli ilə aşqarlamadır. Təbii olaraq, neytron seli ilə aşqarlanma zamanı nanokristallik 3C-SiC hissəciklərinin fiziki xassələrində dəyişikliklər müşahidə olunur [25-29].

Təqdim olunan işdə kubik modifikasiyalı nanokristallik 3C-SiC hissəcikləri tədqiqat obyektini kimi istifadə edilmişdir. Məlum olduğu kimi, neytronlar yüksüzdür və nüvə reaktorlarında neytron seli ilə şüalanma zamanı nanokristallik 3C-SiC hissəciklərini təşkil edən atomların nüvələri birbaşa neytronlarla qarşılıqlı təsirdə olur. Bu isə nüvələrin çevrilməsinə və ya digər radiasiya effektlərinin yaranmasına gətirib çıxara bilər. Bütün proseslərdə neytronların nüvələr üçün mövcud effektiv en kəsikləri çox mühüm rola malikdir. Effektiv en kəsiyinin qiymətindən asılı olaraq prosesin hansı ehtimalla baş verməsi haqda daha müfəssəl məlumat almaq mümkündür. Məhz bu sə-

bəbdəndir ki, əksər nüvə materialları üçün effektiv en kəsiyinin qiyməti müxtəlif metodların tətbiqi ilə nəzəri və praktiki hesablanır. Demək olar ki, bütün tip nüvələr üçün effektiv en kəsiyinin ədədi qiyməti çox kiçik qiymətlər alır. Bunun nəticəsidir ki, effektiv en kəsiyi "barn"larla ifadə olunur ( $1b = 10^{-28}m^2$ ). Digər tərəfdən, effektiv en kəsiyi qarşılıqlı təsirin növündən asılı olaraq dəyişir. Təqdim olunan işdə elastik, qeyri-elastik, elastik olmayan səpilmələr və ümumi effektiv en kəsiyi nəzərdən keçirilmişdir. Həmçinin, silisium və karbon atomlarının fərqli tip izotoplarında səpilmənin effektiv en kəsiyinin fərqli olduğundan, hər bir stabil izotop üçün modelləşmə ayrı-ayrılıqda aparılmışdır.

### 2. NƏZƏRİ YANAŞMALAR

İlk olaraq, sadə halda neytronun maddələrdən səpilməsini nəzərdən keçirək. İlk yanaşmada neytronların materiallardan səpilmə funksiyası aşağıdakı bərabərliklə xarakterizə oluna bilər [30]:

$$I(Q, t) = \left\langle \sum_{i,j} b_i b_j e^{-iQ \cdot [R_j(t) - R_i(0)]} \right\rangle \quad (1)$$

Burada,  $b_i$  və  $b_j$  uyğun olaraq,  $i$  və  $j$  nömrəli atomlardan səpilmə uzunluğu,  $R_i(t)$  və  $R_j(t)$  uyğun olaraq,  $t$  və başlanğıc hallarda ( $0$  halında) sistemin vəziyyətidir. Kütlə mərkəzinə ayrılmış (kütləyə görə mərkəzləşdirilmiş) vektorlar halında  $R_j(t) = R_{CM}(t) + r_j(t)$  kimi yazıla bilər. Əgər kütlə mərkəzinin hərəkəti daxili xaosluqdan asılı deyilsə, o halda səpilmə funksiyası aşağıdakı kimi xarakterizə oluna bilər:

$$I(Q, t) = \left\langle e^{-Q \cdot [R_{CM}(t) - R_{CM}(0)]} \right\rangle \left\langle \sum_{i,j} b_i b_j e^{-iQ \cdot [r_j(t) - r_i(0)]} \right\rangle = e^{-Q^2 D t} \left\langle \sum_{i,j} b_i b_j e^{-iQ \cdot [r_j(t) - r_i(0)]} \right\rangle \quad (2)$$

Burada,  $D$  diffuziya sabitidir və bərabərlikdə birinci hədd kütlə mərkəzinin diffuziyası, ikinci hədd isə daxili hərəkətliliyi xarakterizə edir.

Ümumi yanaşmada mikroskopik halda neytronların maddələrdən səpilməsi dinamik və statistik xarakterə ma-

likdir. Soyuq və termal neytronların dalğa uzunluğu onların maddə daxilində molekulyar səviyyədə nüfuz edə bilməsinə imkan verirlər. Digər tərəfdən, neytronlar yükə malik deyildir və bu səbəbdən, atomlarla Klon qarşılıqlı təsirdə olmayaraq, daha dərin səviyyələrə nüfuz edə bi-

lərlər. Neytronların maddələrdən səpilməsi enerji və impulsun köçürülməsi ilə xarakterizə oluna bilər. Qarşılıqlı təsir zamanı neytronun impulsunu  $p_i$  və dalğa vektorunu  $k_i$  kimi qəbul etsək, o zaman sadə halda enerji üçün aşağıdakı bərabərliyi yazmaq olar:

$$E_i = \frac{p_i^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k_i^2}{2m} \quad (3)$$

Neytronun nümunə ilə qarşılıqlı təsirdən sonra istiqaməti  $2\theta$ , impulsu  $p_f$ , dalğa vektoru  $k_f$  və enerjisi  $E_f$  kimi olar. Digər növ hissəciklərin səpilmə mexanizmində olduğu kimi, neytron selinin də səpilməsi zamanı enerji və impulsun saxlanması ödənilir. Enerjinin saxlanması qanununa uyğun olaraq, səpilmədən öncə və sonra aşağıdakı bərabərliyi yazmaq olar:

$$\hbar\omega = E_f - E_i = \frac{\hbar^2}{2m}(k_f^2 - k_i^2) \quad (4)$$

burada,  $E_f$  səpilmədən sonra və  $E_i$  səpilmədən öncə neytronun enerjisidir. Digər tərəfdən, impulsun saxlanması qanununa uyğun olaraq, səpilmə vektoru üçün aşağıdakı bərabərliyi yazmaq olar:

$$\hbar Q = p_f - p_i = \hbar k_f - \hbar k_i \quad (5)$$

Səpilmə vektoru  $2\theta$  bucağı altında səpilmədən öncə və sonrakı enerjilərə uyğun olaraq aşağıdakı kimi ifadə oluna bilər:

$$Q^2 = \frac{2m}{\hbar^2} [E_i + E_f - 2\sqrt{E_i E_f} \cos 2\theta] \quad (6)$$

Neytronun maddələrdən əsasən iki formada səpilməsi mümkündür: elastik və qeyri-elastik. Elastik səpilmə zamanı  $\Delta\hbar\omega = E_f - E_i = 0$  bərabərliyi ödənilir ki, bu zaman da neytronun enerjisində hər hansı dəyişiklik baş vermir. Digər tərəfdən, qeyri-elastik səpilmə zamanı neytron enerji qazana ( $\Delta\hbar\omega > 0$ ) və ya itirir ( $\Delta\hbar\omega < 0$ ) bilər. Neytron səpilməsini xarakterizə edən əsas parametrlər verilmiş maddə üçün neytronların effektiv en kəziyidir. İkiqat

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE_f} = \frac{k_f}{k_i} \sum_{\lambda_i, \lambda_f} p_{\lambda_i} \left| \langle k_f \lambda_f | V | k_i \lambda_i \rangle \right|^2 \delta(\hbar\omega + E_i - E_f) \quad (8)$$

burada,  $\delta$  funksiyası qarşılıqlı təsirdən öncə ( $E_i$ ) və sonra ( $E_f$ )  $\hbar\omega$  enerji köçürülməsində saxlanması qanununu təmin edir. Tənlikdə  $p_{\lambda_i}$  qarşılıqlı təsirdən öncə  $\lambda_i$  ehtimalıdır. Bu ehtimal Bolsman paylanması ilə ifadə edilə bilər:

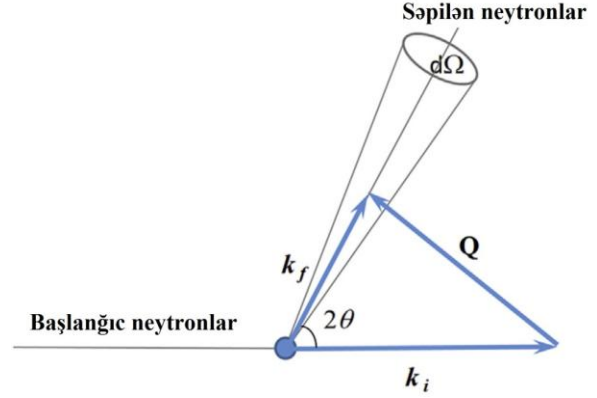
$$p_{\lambda_i} = \frac{e^{-\frac{E_i}{k_B T}}}{Z} \quad (9)$$

və

$$Z = \sum_{\lambda_i} e^{-\frac{E_i}{k_B T}} \quad (9a)$$

burada,  $k$  Bolsman sabiti,  $Z$  nümunənin bölünmə funksiyası və  $T$  nümunənin temperaturudur. Bir neçə manipulyasiyadan sonra, ikiqat diferensial səpilmənin effektiv en kəziyi aşağıdakı kimi yazıla bilər [30]:

diferensial şəkildə effektiv en kəziyi  $d^2\sigma/d\Omega dE_f$  kimi xarakterizə olunur ki, bu da düşən neytronun enerjisindən  $E_i$  asılı olaraq səpilmə bucağı ( $d\Omega$ ),  $E_f$  və  $E_f + dE_f$  aralığındakı enerji ilə təyin oluna bilər. Həndəsi olaraq səpilməni şəkil 1-də olduğu kimi təsvir etmək olar.



Şəkil 1. Neytronların maddədən səpilməsinin həndəsi təsviri.

Səpilmədən öncə neytronun malik olduğu  $k_i$  dalğa vektoru səpilmədən sonra  $k_f$  dalğa vektoruna çevrilir. Neytronların maddə ilə qarşılıqlı təsirdən öncə və sonra uyğun olaraq,  $\lambda_i$  və  $\lambda_f$  kvant halları ilə xarakterizə oluna bilərlər. Neytron və nümunənin mümkün hallarının kombinasiyası qarşılıqlı təsirdən öncə  $|k_i \lambda_i\rangle$  və sonra  $\langle k_f \lambda_f |$  Fermi qanunu ilə izah oluna bilər:

$$\sum_{k_f \text{ in } \rightarrow d\Omega} W_{k_i, \lambda_i \rightarrow k_f, \lambda_f} = \frac{2\pi}{\hbar} \rho_{k_f} \left| \langle k_f \lambda_f | V | k_i \lambda_i \rangle \right|^2 \quad (7)$$

burada,  $\rho_{k_f}$  neytronun sıxlığı olub  $d\Omega$ -da  $k_f$  ilə izah olunur və  $V$  nümunənin nüvəsi ilə neytron arasındakı qarşılıqlı təsir potensialıdır. Effektiv en kəziyi üçün Born yaxınlaşmasından istifadə edərək ikiqat diferensial effektiv en kəziyi üçün alırıq:

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE_f} = \frac{1}{2\pi\hbar} \frac{k_f}{k_i} \sum_{j,i} \overline{b_j b_i} \int \langle e^{-iQ \cdot R_i(0)} e^{-iQ \cdot R_j(t)} \rangle e^{-\frac{iEt}{\hbar}} dt \quad (10)$$

burada,  $b_j$  və  $b_i$  uyğun olaraq  $j$  və  $i$  nömrəli nüvələrdən səpilmə uzunluğu,  $R_i(0)$   $i$  nömrəli nüvənin başlanğıc halda (sıfır anında) vəziyyətini xarakterizə edən operator,  $R_j(t)$   $j$  nömrəli nüvənin  $t$  anında halını xarakterizə edən operator və  $\langle \rangle$  prosesin termal mühitdə olmasının bildirir.  $j=i$  və  $j \neq i$  hallarında  $\overline{b_j b_i}$  kəmiyyətinin orta qiyməti uyğun olaraq  $\overline{b_j b_i} = \overline{b^2}$  və  $\overline{b_j b_i} = \overline{b^2}$  kimi təyin olunur.  $j=i$  və  $j \neq i$  olduqda iki halı ümumiləşdirərək (10) bərabərliyini aşağıdakı kimi yazma bilərik:

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE_f} = \frac{1}{2\pi\hbar} \frac{k_f}{k_i} \overline{b^2} \sum_{j,i} \int \langle e^{-iQ \cdot R_i(0)} e^{-iQ \cdot R_j(t)} \rangle e^{-\frac{iEt}{\hbar}} dt + \frac{1}{2\pi\hbar} \frac{k_f}{k_i} \overline{b^2} \sum_{j,i} \int \langle e^{-iQ \cdot R_i(0)} e^{-iQ \cdot R_j(t)} \rangle e^{-\frac{iEt}{\hbar}} dt \quad (11)$$

Koherent (elastikəbənzər) və qeyri-koherent (qeyri-elastikəbənzər) səpilmə hallarını izah etmək üçün (11) bərabərliyinin ayrı-ayrı hədlərini nəzərdən keçirmək lazımdır. Koherent səpilmə, adətən, nüvələrin səthindən baş verir və bu zamanı bütün nüvələrdən səpilmələrin uzunluğu eyni ( $b$ ) olur. Qeyri-koherent səpilmədə isə, orta səpilmə uzunluğu  $b$  proporsional olaraq ( $\overline{b^2} - \overline{b^2}$ ) müəyyən olunur. Bütün istiqamətlərdə koherent və qeyri-koherent səpilmənin effektiv en kəsikləri aşağıdakı kimi təyin oluna bilər:

$$\begin{aligned} \sigma_c &= 4\pi \overline{b^2} \\ \sigma_i &= 4\pi (\overline{b^2} - \overline{b^2}) \end{aligned} \quad (12)$$

Bu halda ikiqat diferensial effektiv en kəsiyi aşağıdakı kimi təyin oluna bilər:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\sigma}{d\Omega dE} &= \frac{1}{8\pi^2\hbar} \frac{k_f}{k_i} \sigma_c \sum_{j,i} \int \langle e^{-iQ \cdot R_i(0)} e^{-iQ \cdot R_j(t)} \rangle e^{-\frac{iEt}{\hbar}} dt + \frac{1}{8\pi^2\hbar} \frac{k_f}{k_i} \sigma_i \sum_j \int \langle e^{-iQ \cdot R_i(0)} e^{-iQ \cdot R_j(t)} \rangle e^{-\frac{iEt}{\hbar}} dt = \\ &= \left[ \frac{d^2\sigma}{d\Omega dE} \right]_c + \left[ \frac{d^2\sigma}{d\Omega dE} \right]_i \end{aligned} \quad (13)$$

Adətən, koherent səpilmə ayrı-ayrılıqda nüvələr ilə ümumi nüvələr arasında əlaqəni izah edir. Digər tərəfdən, qeyri-koherent səpilmə individual nüvə və bir hissəcik arasındakı əlaqəni izah edir [31-34].  $N$  sayda nüvənin fəza və zamanla görə vəziyyətini izah edən fəza və zaman nisbi funksiyasını aşağıdakı kimi yazma bilirik [35]:

$$G(r,t) = \frac{1}{N} \sum_{i,j} \langle \delta \{ r + R_i(0) - R_j(t) \} \rangle \quad (14)$$

$G(r,t)$  fəza-zaman nisbi funksiyasını fəzanın Furiye çevirmələri ilə mühitdaxili səpilmə funksiyası üçün aşağıdakı şəkildə yazma bilirik:

$$I(Q,t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(r,t) e^{iQ \cdot r} dr = \frac{1}{N} \sum_{i,j} \langle e^{-iQ \cdot R_i(0)} e^{-iQ \cdot R_j(t)} \rangle \quad (15)$$

Zamana görə Furiye çevirmələri ilə mühitdaxili səpilmə funksiyası (bəzən dinamik struktur faktoru da adlanır) nümunənin enerji və impulsunun funksiyası kimi xarakterizə olunur:

$$S(Q,E) = \frac{1}{2\pi\hbar} \int_{-\infty}^{\infty} I(Q,t) e^{-\frac{iEt}{\hbar}} dt \quad (16)$$

$S(Q,E)$  və  $I(Q,t)$  hər ikisi koherent və qeyri-koherent hissələrə bölünür. Koherent və qeyri-koherent səpilmə funksiyaları arasındakı əlaqəni nəzərə alaraq ikiqat diferensial səpilmənin effektiv en kəsiyi üçün alırıq:

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE} = \frac{\sigma_i}{4\pi\hbar} \frac{k_f}{k_i} NS_i(Q, E) + \frac{\sigma_c}{4\pi\hbar} \frac{k_f}{k_i} NS_c(Q, E) \quad (17)$$

Neytronların maddələrdən səpilməsi zamanı mühit daxilində neytronun maqnit momenti ilə mühitdəki cütləşməmiş elektronların bucaq maqnit momenti arasındakı qarşılıqlı təsiri nəzərə alaraq, səpilmə funksiyasını qısa şəkildə nəzərdən keçirək. Neytronun maqnit momenti  $\mu_n = -\gamma\mu_N\sigma_n$  kimi təyin oluna bilər. Burada,  $\gamma=1.913$  neytronun geomaqnetik dərəcəsi,  $\mu_N=5.051 \times 10^{-27} \text{CT}^{-1}$  nüvə maqnetonudur. Əgər  $p$ -ni elektronun maqnit momentinin operatoru,  $R$ -i elektrondan olan məsafə vektoru qəbul etsək, o zaman Zeyman qarşılıqlı təsirindən elektromaqnit nəzəriyyəyə əsasən elektron üçün yazıla bilər [30]:

$$V_{mag}(r) = \frac{\mu_0}{2\pi} \gamma\mu_N\mu_B\sigma_n \cdot \left[ \nabla \times \left( \frac{s \times R}{|R|^2} \right) + \frac{1}{\hbar} \frac{p \times \hat{R}}{|R|^2} \right] \quad (18)$$

burada,  $\sigma_n = 2s_n$  Pauli spin operatoru,  $s$  isə elektronun spin operatorudur.

Elektromaqnit potensialı ikiqat diferensial effektiv en kəsiyinə daxil etsək, maqnetik səpilmənin diferensial effektiv en kəsiyini aşağıdakı kimi yazıla bilər [35]:

$$\left( \frac{d^2\sigma}{d\Omega dE_f} \right)_{mag} = \frac{1}{\hbar} \frac{k_f}{k_i} \left( \frac{\mathcal{M}_0 g}{2} \right)^2 |F(Q)|^2 e^{-2W} \sum_{\alpha, \beta} (\delta_{\alpha\beta} - \hat{Q}_\alpha \hat{Q}_\beta) S^{\alpha\beta}(Q, E) \quad (19)$$

Bu halda səpilmə funksiyası ( $S^{\alpha\beta}(Q, E)$ ) aşağıdakı kimi təyin oluna bilər:

$$S^{\alpha\beta}(Q, E) = \frac{1}{2\pi} \sum_{R, R'} e^{-iQ \cdot (R-R')} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{iEt}{\hbar}} \langle S_R^\alpha(0) S_{R'}^\beta(t) \rangle dt \quad (20)$$

### 3. NƏTİCƏ VƏ MÜZAKİRƏLƏR

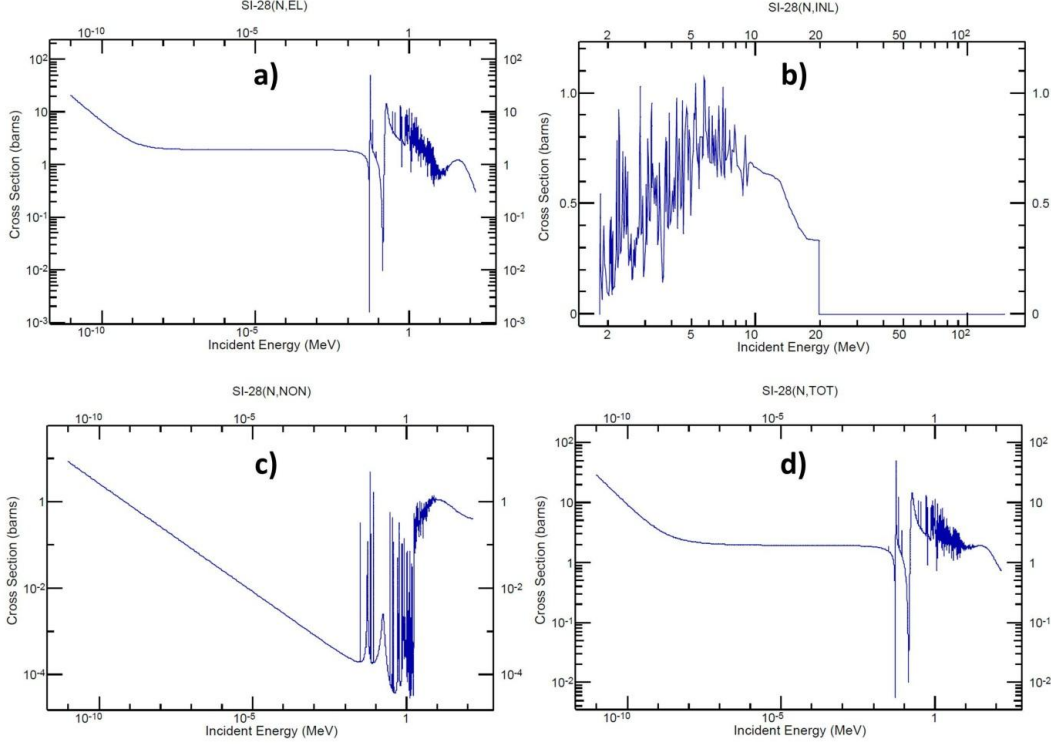
Fərqli enerjilərdə neytron selinin nanokristallik 3C-SiC hissəciklərindən səpilməsi NNDC (National Nuclear Data Center) bazasından və ENDF (Evaluated Nuclear Data File) sistemlərindən istifadə olunaraq kompüter modelləşməsi ilə öyrənilmişdir. Neytron selinin nanomaterialdan səpilməsi 3C-SiC hissəciklərini təşkil edən silisium və karbon atomları üçün ayrı-ayrılıqda öyrənilmişdir. Məlum olduğu kimi silisiumun üç (təbii tərkib 92.23%  $^{28}\text{Si}$ , 4.67%  $^{29}\text{Si}$  və 3.1%  $^{30}\text{Si}$  izotopu) və karbonun iki (təbii tərkib 98.93%  $^{12}\text{C}$  və 1.07%  $^{13}\text{C}$  izotopu) stabil izotopu mövcuddur. Silisium və karbon atomlarının fərqli tip izotoplarında səpilmənin effektiv en kəsiyi fərqli olduğundan, hər bir stabil izotop üçün modelləşmə ayrı-ayrılıqda aparılmışdır. Eyni zamanda hər bir stabil izotop üçün elastik, qeyri-elastik, elastik olmayan səpilmələr və ümumi effektiv en kəsiyi nəzərdən keçirilmişdir. Qeyd edək ki, ümumi səpilmənin effektiv en kəsiyi ( $\sigma_s$ ) additiv kəmiyyət olub elastik ( $\sigma_e$ ) və qeyri-elastik ( $\sigma_i$ ) səpilmələrin effektiv en kəsikləri cəminə ( $\sigma_s = \sigma_e + \sigma_i$ ) bərabər olur. Elastik olmayan səpilmənin effektiv en kəsiyi ( $\sigma_{non}$ ) dedikdə isə, elastik səpilmənin effektiv en kəsiyi istisna olmaqla, ümumi effektiv en kəsiyi nəzərdə tutulur. Əgər ümumi effektiv en kəsiyini  $\sigma_i$  qəbul etsək, elastik olmayan səpilmənin effektiv en kəsiyi  $\sigma_{non} = \sigma_i - \sigma_e$  kimi təyin oluna bilər. İlk olaraq,  $^{28}\text{Si}$  izotopu üçün elastik, qeyri-elastik, elastik olmayan səpilmə və ümumi effektiv en kəsiyini nəzərdən keçirək (şəkil 2). Şəkildən görüldüyü kimi,  $^{28}\text{Si}$  izotopu üçün elastik səpilmə göstərilən enerji aralıklarında dominantlıq təşkil edir (şəkil 2a).

Qeyri-elastik səpilmənin effektiv en kəsiyi isə çox zəifdir və yalnız aşağı enerjilərdə rezonans hal alır (şəkil 2b). Elastik olmayan səpilmənin effektiv en kəsiyi isə, elastik səpilməyə uyğun olaraq, enerjinin 1MeV ətrafında rezonans hal alır və çox kiçik ehtimallıdır (şəkil 2c). Ümumi effektiv en kəsiyi ədədi qiymətə elastik səpilmənin effektiv en kəsiyinə yaxın qiymətlər alır və enerjinin 1MeV qiyməti ətrafında rezonans hal müşahidə edilir (şəkil 2d). Ümumi effektiv en kəsiyinin qiymətinin elastik səpilmənin effektiv en kəsiyinə yaxın olması və digərlərindən kəskin fərqlənməsi, neytron selinin  $^{28}\text{Si}$  izotopundan, adətən, elastik səpilməsini deməyə əsas verir. Bu isə neytron zəbtli ilə izotop çevrilmələrinin aşağı ehtimallı olmasını bir daha təstiq edir [25]. İndi isə  $^{29}\text{Si}$  izotopundan fərqli enerjilərdə neytron selinin səpilməsini nəzərdən keçirək (şəkil 3).

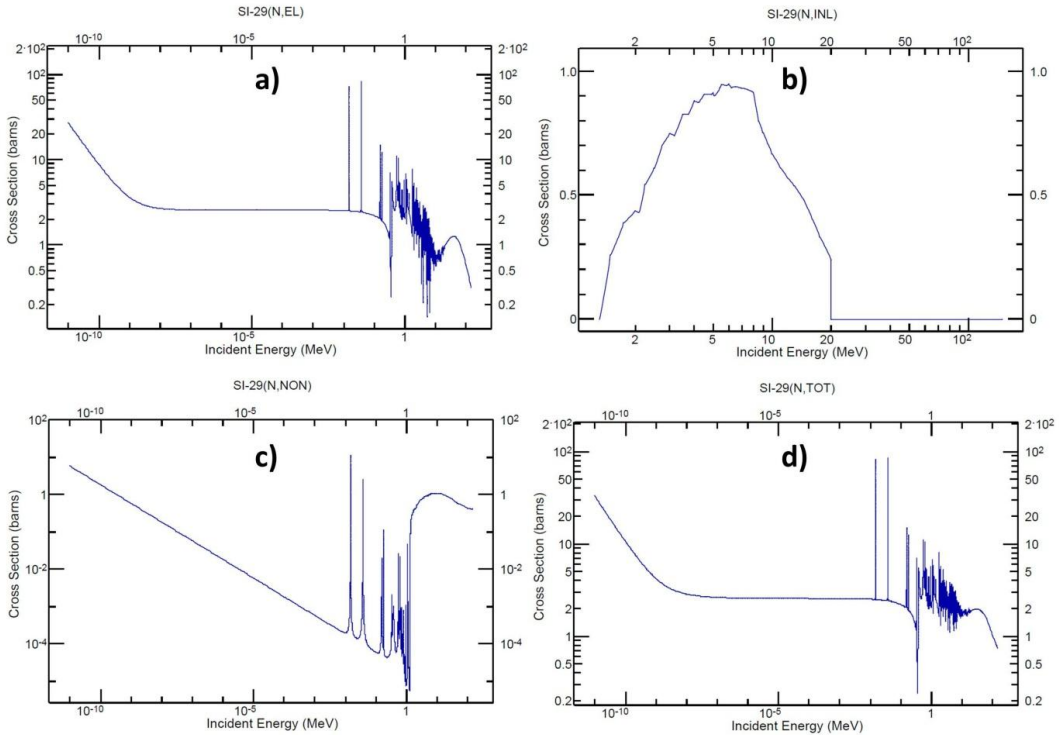
Elastik və qeyri-elastik səpilmənin effektiv en kəsiyi  $^{29}\text{Si}$  izotopu üçün  $^{28}\text{Si}$  izotopuna oxşardır (şəkil 3a və b). Lakin elastik olmayan səpilmənin effektiv en kəsiyi  $^{28}\text{Si}$  izotopundan fərqlidir və daha çox ehtimallıdır (şəkil 3c). Ümumi effektiv en kəsiyi elastik və elastik olmayan səpilmələrin effektiv en kəsiklərinə oxşardır və ədədi qiyməti onlarla uzlaşır (şəkil 3d). Bu isə,  $^{29}\text{Si}$  izotopu üçün əsasən elastik və elastik olmayan səpilmələrin dominantlıq təşkil etdiyini deməyə əsas verir. Analoji hallar  $^{30}\text{Si}$  izotopunda da müşahidə olunur (şəkil 4). Silisiumun digər stabil izotoplarından fərqli olaraq,  $^{30}\text{Si}$  izotopunda neytron selinin elastik və elastik olmayan səpilmələrinin effektiv en kəsikləri ədədi qiymətə böyükdür (şəkil 4a və 4c). Lakin, qeyri-elastik səpilmənin effektiv en kəsiyi digər stabil izotoplara uyğundur və aşağı ehtimallı prosesdir (şəkil 4b). Ümumi effektiv en kəsiyinin qiyməti isə əsasən

elastik və elastik olmayan səpilmələrin effektiv en kəsiklərinin 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 [25-29]. 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 (şəkil 5).

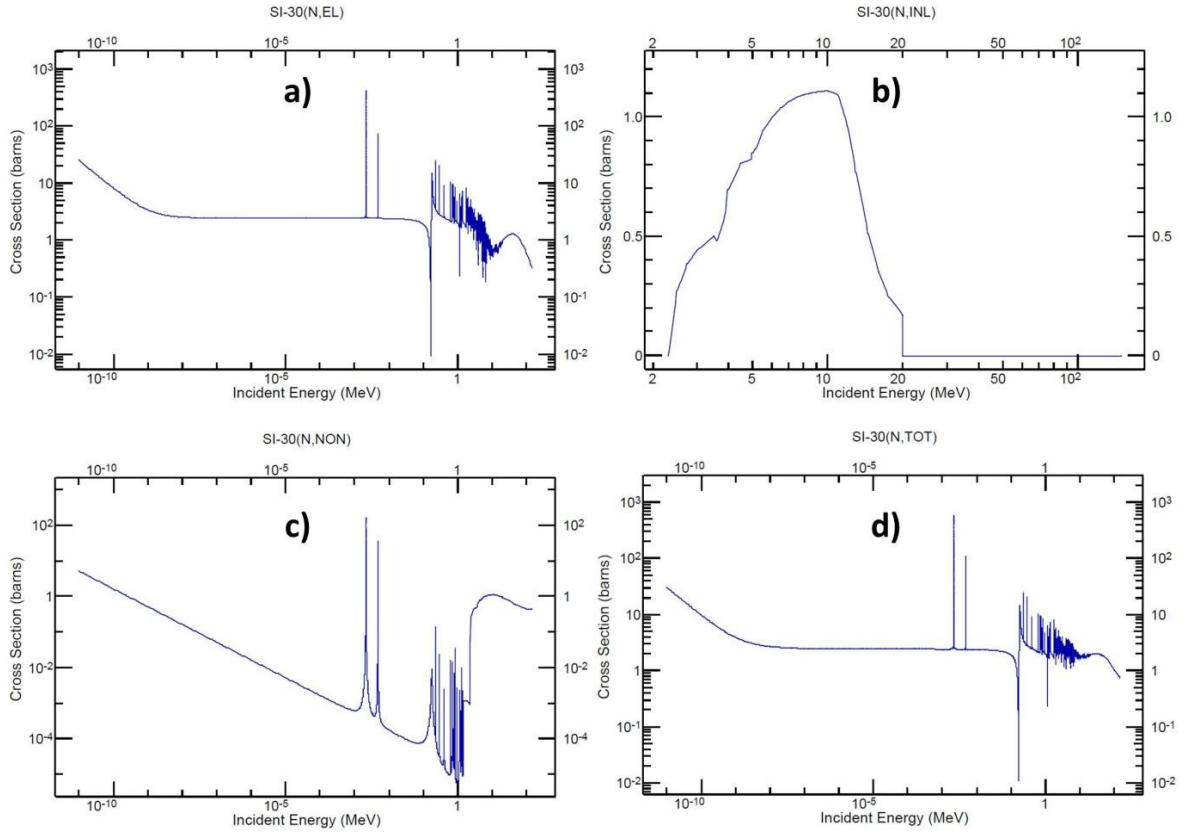


Şəkil 2. Neytron selinin  $^{28}\text{Si}$  izotopu üçün elastik (a), qeyri-elastik (b), elastik olmayan (c) səpilmə və ümumi (d) effektiv en kəsiyi spektrləri.

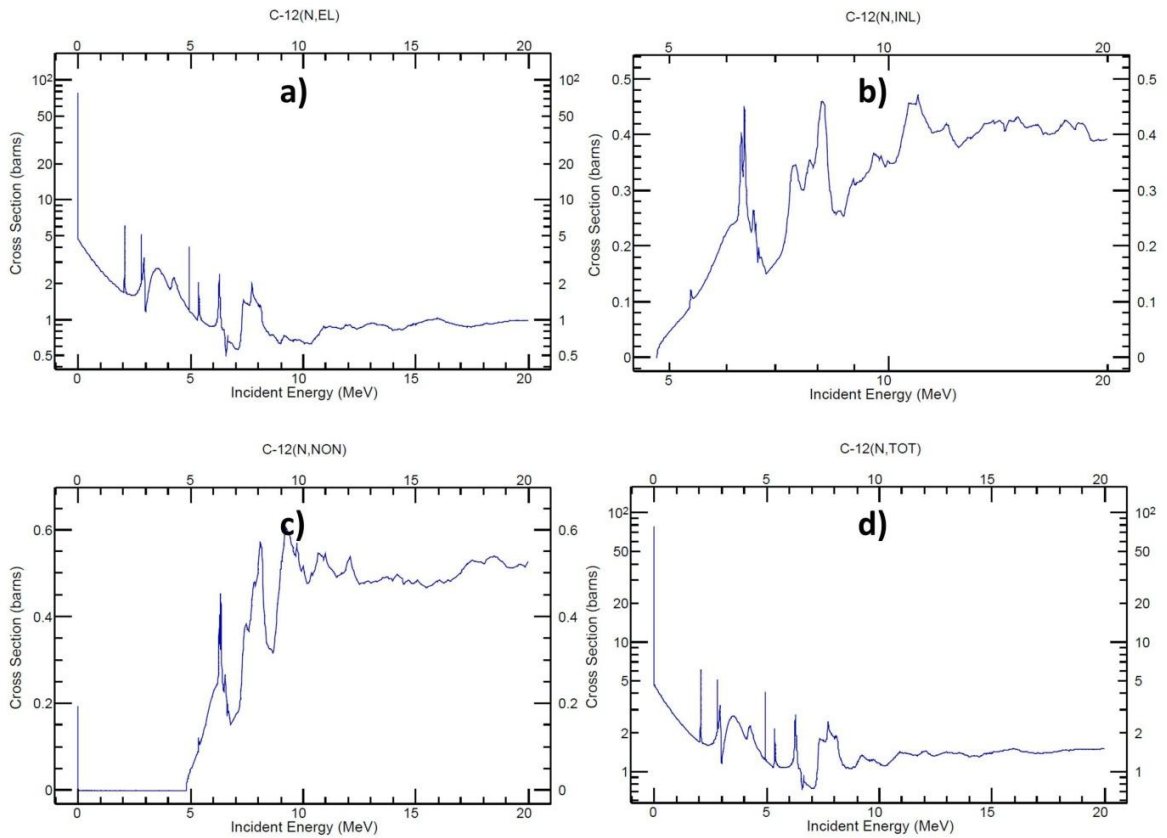


Şəkil 3. Neytron selinin  $^{29}\text{Si}$  izotopu üçün elastik (a), qeyri-elastik (b), elastik olmayan (c) səpilmə və ümumi (d) effektiv en kəsiyi spektrləri.

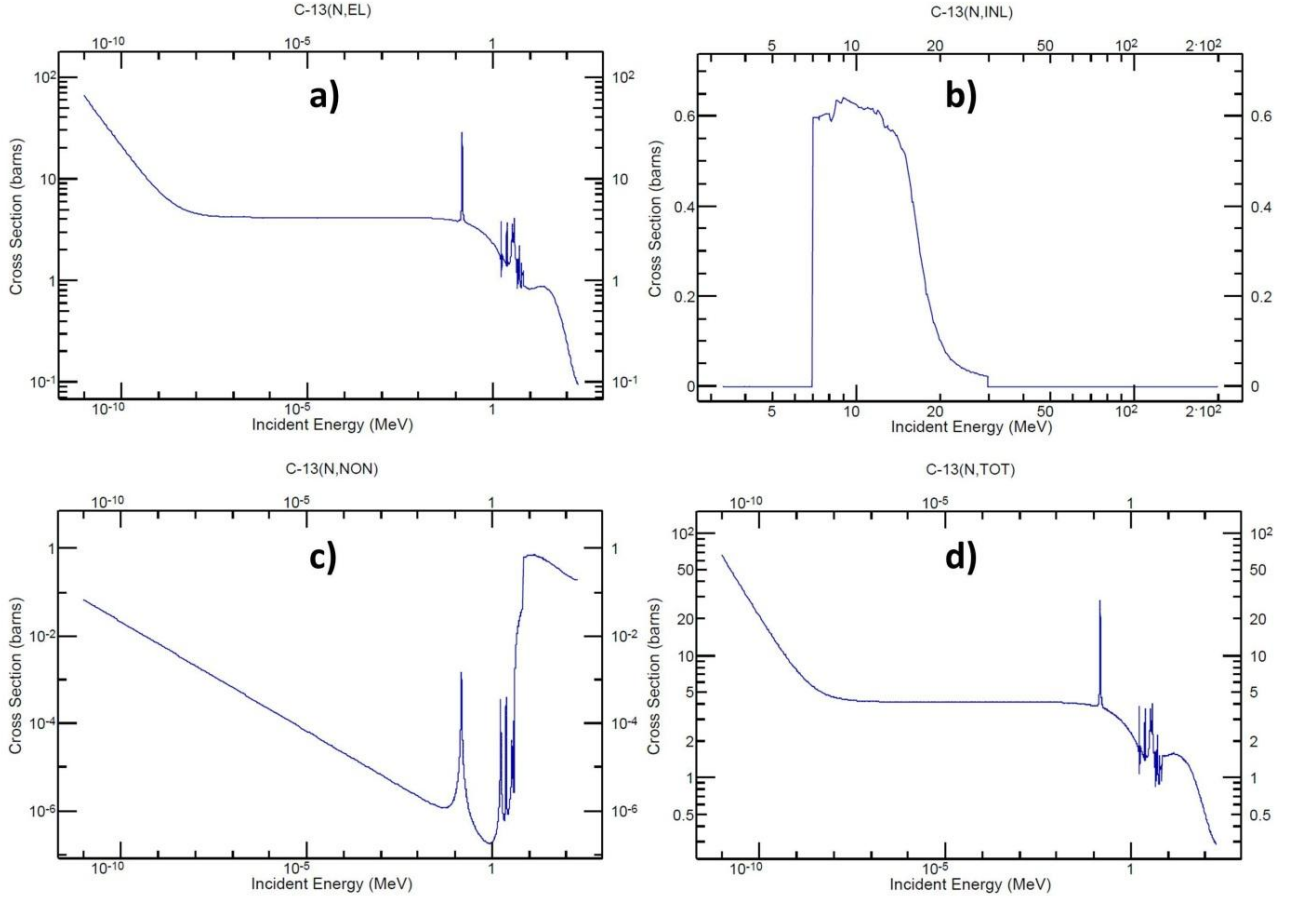
**NANOKRİSTALLİK SİLİSİUM KARBİD (3C-SiC) HİSSƏCİKLƏRİNDƏN NEYTRON SELİNİN SƏPİLMƏSİ**



Şəkil 4. Neytron selinin  $^{30}\text{Si}$  izotopu üçün elastik (a), qeyri-elastik (b), elastik olmayan (c) səpilmə və ümumi (d) effektiv en kəsiyi spektrləri.



Şəkil 5. Neytron selinin  $^{12}\text{C}$  izotopu üçün elastik (a), qeyri-elastik (b), elastik olmayan (c) səpilmə və ümumi (d) effektiv en kəsiyi spektrləri.



Şəkil 6. Neytron selinin  $^{13}\text{C}$  izotopu üçün elastik (a), qeyri-elastik (b), elastik olmayan (c) səpilmə və ümumi (d) effektiv en kəsiyi spektrləri.

Neytronların enerjisinin 20MeV-ə qədər qiymətlərində  $^{12}\text{C}$  izotopu üçün elastik, qeyri-elastik, elastik olmayan səpilmə və ümumi effektiv en kəsiyi fərqli xarakterə malikdir. Digər izotoplarda olduğu kimi,  $^{12}\text{C}$  izotopunda da elastik səpilmənin effektiv en kəsiyi ədədi qiymətcə böyükdür və daha çox ehtimallı prosesdir (şəkil 5a). Qeyri-elastik və elastik olmayan səpilmələrin effektiv en kəsiklərinin ədədi qiymətləri çox kiçikdir və aşağı ehtimallı proseslərdir (şəkil 5b və 5c). Ümumi effektiv en kəsinin ədədi qiyməti elastik səpilmənin ədədi qiymətinə daha çox uyğundur (şəkil 5d). Lakin, elastik səpilmənin effektiv en kəsiyi ilə ümumi effektiv en kəsiyi arasında fərq mövcuddur ki, bu da prosesin əsasən elastik səpilmədən ibarət olduğu mülahizəsini nisbətən inkar edir. Buna baxmayaraq deyə bilərik ki, prosesin böyük bir hissəsi elastik səpilmənin payına düşür. Həmçinin, aşağı kütlə payına malik olmasına baxmayaraq,  $^{13}\text{C}$  izotopu üçün də effektiv en kəsiyi modelləşdirilmişdir (şəkil 6).

Neytron selinin  $^{13}\text{C}$  izotopu üçün effektiv en kəsiklərini nəzərdən keçirdikdə məlum olur ki, bu halda elastik səpilmə üstünlük təşkil edir (şəkil 6a). Qeyri-elastik və elastik olmayan səpilmələrin effektiv en kəsiklərinin ədədi qiymətləri çox kiçikdir və ehtimalı çox az olan pro-

seslərdir (şəkil 6b və 6c). Ümumi effektiv en kəsiyi demək olar ki, elastik səpilmənin effektiv en kəsinə tam oxşardır (şəkil 6d). Bu isə, belə halda prosesin böyük əksəriyyətinin elastik səpilmə ilə baş verdiyini deməyə əsas verir.

#### 4. NƏTİCƏLƏR

Kompüter modelləşməsindən, nanokristallik 3C-SiC hissəciklərini təşkil edən müxtəlif silisium və karbon izotoplarından neytron selinin səpilməsinin ədədi qiymətinin fərqli olması məlum olmuşdur.  $^{28}\text{Si}$  izotopunda elastik səpilmənin dominant olmasına baxmayaraq,  $^{29}\text{Si}$  və  $^{30}\text{Si}$  izotoplarında elastik səpilmə ilə yanaşı elastik olmayan səpilmənin də nisbətən yüksək ehtimallı proses olması aşkarlanmışdır. Məhz elastik olmayan səpilmənin nisbətən yüksək ehtimallı olması (neytron selinin effektiv en kəsinə uyğun olaraq) nəticəsində nanokristallik 3C-SiC hissəcikləri neytron seli ilə  $^{31}\text{P}$  izotopu ilə aşqarlanı bilər. Digər tərəfdən,  $^{12}\text{C}$  və  $^{13}\text{C}$  izotoplarında qeyri-elastik səpilmənin aşağı ehtimallı proses olduğu tapılmışdır. Bununla yanaşı,  $^{12}\text{C}$  və  $^{13}\text{C}$  izotoplarında elastik və elastik olmayan səpilmə ehtimalı nisbətən yüksəkdir.

- [1] *Zhi Zeng, Xiaoyan Li, Dongsheng Xu, Lei Lu, Huajian Gao, Ting Zhu.* Extreme Mechanics Letters, 2016, 8, 213-219.
- [2] *Alfiya Lakhova, Sergey Petrov, Dina Ibragimova et al.* Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 153, 385-390.
- [3] *Chaojin Zhang, Chengpu Liu.* Physics Letters A 380, 2016, 40, 3233-3237.
- [4] *Jiwan Singh, Jae-Kyu Yang, Yoon-Young Chang.* Process Safety and Environmental Protection, 2016, 102, 204-213.
- [5] *Seok-Seong Kim, Kyu Hwang Yeon, Suc-Kyoung Hong, Seog Woo Nam.* Current Applied Physics, 2014, 14, 9, 1325-1330.
- [6] *Moham*
- [7] *ed E. Mahmoud, Ahmed M.G. Nassar, Samir A. Abou Ali, Shimaa M.T. Elweshahy.* Separation and Purification Technology, 2017, 174, 493-501.
- [8] *Ning Sun, Chunjing Li, Yuting Fu, Yanghua Li, Dechong Bu, Yukai An, Jiwen Liu* Superlattices and Microstructures, 2016, 97, 313-318.
- [9] *Safia Anjum, Rabia Tufail, Khalid Rashid, Rehana Zia, S. Riaz* Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, 432, 198-207.
- [10] *Xiaowen Zhao, Xue Zou, Lin Ye* Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2017, 49, 36-45.
- [11] *G.M.S. ElShafei, F.Z. Yehia, Gh. Eshaq, A.E. El Metwally.* Separation and Purification Technology, 2017, 178, 122-129.
- [12] *R. Bani Ardalan, N. Jamshidi, H. Arabameri et al.* Construction and Building Materials, 2017, 146, 128-135.
- [13] *Liang-Yi Lin, Yao Nie, Shalinee Kavadiya, Thiagarajan Soundappan, Pratim Biswas.* Chemical Engineering Journal, 2017, 316, 449-460.
- [14] *Jun Bian, Zheng Jun Wang, Hai Lan Lin et al.* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 97, 120-127.
- [15] *Chang-Chun Lee, Hsien-Chie Cheng, Hung-Wen Hsu et al.* Thin Solid Films, 2014, 557, 316-322.
- [16] *Jitao Lu, Qingguo Meng, Liangliang Zhang et al.* Dyes and Pigments, 2015, 115, 1-6.
- [17] *Dong-Lin Zhao, Fa Luo, Wan-Cheng Zhou.* Journal of Alloys and Compounds, 2010, 490, 190-194.
- [18] *Yiming Yao, Anna Janis, Uta Klement* Journal of Materials Science, 2008, 43, 3, 1094-1101.
- [19] *L.L. Snead.* Journal of Nuclear Materials, 2004, 329-333, 524-529.
- [20] *Umberto Lucia.* Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2014, 407, 185-191.
- [21] *Lajos P. Balogh.* Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine, 2010, 6, 4, 501-503, 2010.
- [22] *Morteza Montazerzohori, Sayed Alireza Musavi, Asghar Naghiha, Mostafa Montazer Zohour.* Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2014, 129, 382-391.
- [23] *S. Gopalakannan, T. Senthilvelan.* Measurement, 2013, 46, 8, 2705-2715.
- [24] *N.A.E. Forhan, M.C.A. Fantini, I. Pereyra.* Journal of Non-Crystalline Solids, 2004, 338-340, 119-122.
- [25] *Dong Uk Lee, Eun Kyu Kim, Goon-Ho Park, Won-Ju Cho.* Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2010, 42, 10, 2876-2879.
- [26] *Elchin Huseynov, Anze Jazbec.* Physica B: Condensed Matter, 517, 30-34, 2017
- [27] *Elchin M. Huseynov.* "Permittivity-frequency dependencies study of neutron-irradiated nanocrystalline silicon carbide (3C-SiC)" NANO 12, 2017, No. 5, 1750068.
- [28] *Elchin M. Huseynov.* Physica B: Condensed Matter. 2017, 510, 99-103.
- [29] *Elchin Huseynov, Adil Garibov* "Effects of neutron flux on the temperature dependencies of permittivity of 3C-SiC nanoparticles" Silicon, 2017.
- [30] *Elchin Huseynov.* Physics Letters A, 2016, 380/38, 3086-3091.
- [31] *Thomas Lucatorto, John T. Yates and Kenneth Baldwin* "Neutron Scattering - Magnetic and Quantum Phenomena" Experimental Methods in the Physical Sciences 48, 26-56/ 520, San Diego, CA 92101-4495, USA, Elsevier, 2015
- [32] *D.L. Price, F. Fernandez-Alonso* "An introduction to neutron scattering" Experimental Methods in the Physical Sciences, first ed. Neutron Scattering 44, 1-135/576, 2013.
- [33] *M. Arai.* "Experimental techniques" Experimental Methods in the Physical Sciences, Neutron Scattering 44, 245-316, 2013
- [34] *Stephen W. Lovesey.* Theory of Neutron Scattering from Condensed Matter 2, 41-67/360, Clarendon Press, 1986
- [35] *G.L. Squires.* Introduction to the Theory of Thermal Neutron Scattering, 73-115/272 Dover Publications, 1997
- [36] *Leon Van Hove.* Phys. Rev., 1954, 95, 249.

**E.M. Huseynov**

**NEUTRON FLUX SCATTERING FROM THE NANOCRYSTALLINE SILICON CARBIDE (3C-SiC) PARTICLES**

At the different energies neutron flux scattering from the nanocrystalline 3C-SiC particles has been studied by computer modeling. Neutron scattering from the nanomaterial have been investigated separately for silicon and carbon atoms in the 3C-SiC particles. Due to the dissimilar scattering cross-section for various stable isotope of silicon and carbon atoms, modeling have been carried out separately for individual isotopes. Simultaneously, elastic scattering, inelastic scattering, non-elastic scattering and total cross-section have been studied for each stable isotope.



E.M. HÜSEYNOV

Э.М. Гусейнов

**РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА ЧАСТИЦ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО  
КАРБИДА КРЕМНИЯ (3C-SiC)**

Изучены рассеяния нейтронов различных энергий путем компьютерного моделирования с учетом частиц нанокристаллического 3C-SiC. Для эффективного моделирования сечения рассеяния использовались различные изотопы кремния и углерода, а также упругое и неупругое рассеяния и эффективное сечение рассеяния для стабильного изотопа.

*Qəbul olunma tarixi: 15.05.2017*