

SÜRƏTLİ AĞIR İON, NEYTRON, ELEKTRON VƏ QAMMA ŞÜALANMANIN TƏSİRİ NƏTİCƏSİNDƏ BORLU BİNAR BİRLƏŞMƏLƏRDƏ DEFEKT ƏMƏLƏGƏLMƏ MEXANİZMİ VƏ TERMOFİZİKİ EFFEKTLƏR

O.A. SƏMƏDOV, M.N. MİRZƏYEV

Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası, Radiasiya Problemləri İnstitutu

Azərbaycan, Bakı, AZ-1143, B. Vahabzadə küç., 9.

Təqdim olunan işdə $T=300-1200$ K temperatur intervalında borlu binar birləşmələrdə müxtəlif növ şüalanmaların təsirləri altında əmələ gələn defektlərin rekombinasiya mexanizmi və temperaturdan asılı olaraq istilik seli funksiyasının kinetikasi müəyyən edilmişdir. Yüksək temperaturlarda B_4C və B_6Si birləşmələrinin səthində oksid təbəqəsinin formalaşması və sürətli ağır ion selinin təsiri altında borlu birləşmələrdə səth morfoloqiyasında yaranan degradasiya tədqiq olunmuşdur.

Açar sözlər: sürətli ağır ion, neytron və elektron seli, qamma şüalanma, defekt əmələgəlmə, DSC.

PACS: 544.223

1. GİRİŞ

Radiasiya effektlərinin və defektlərinin müxtəlif analitik metodlarla araşdırılması, fərqli növ hissəciklərlə daşınan kinetik enerjinin kristal struktura ötürülməsi, enerjinin strukturunda paylanma kinetikasının öyrənilməsi radiasiya materialşünaslığının təməl prinsiplərindən hesab olunmaqdadır. Müasir dövrün nüvə texnologiyalarında, detektorların hazırlanmasında, optik qurğularda borun binar və keramik birləşmələrlə əmələ gətirdiyi yüksək entropiyaya malik nümunələri geniş tətbiq olunmaqdadır [1-2]. Təbiətdə və müasir sintez metodları ilə bor elementinin oksid, metal və qeyri-metal kimi çoxlu sayda birləşmələrini (B_2O -bor monoksid; B_2O_3 -bor trioksid; B_6O -bor subksid; B_xC -bor karbid; B_xSi -bor silikat; BF -bor monoflorid; BN -bor nitrid; B_2S_3 -bor sulfid; BBr_3 -bor triboromid; BCl_3 -bor trixlorid; BF_3 -bor triflorid; ZrB_2 -sirkonium diborid; BCN -nano borusu; BPO_4 -bor fosfat) sadalamaq mümkündür [3]. Borlu ikili, üçlü və çoxsaylı laylı birləşmələri, həmçinin çoxterkibli keramik qarışıqları B_4C -VC; B_4C -TiC; B_4C - Cr_3C_2 ; B_4C -WC-Co; B_4C - Al_2O_3 ; BN -C; BN -CuNi; BN - Fe_2B ; BN -W; B_6Si -SiC; B_6Si - ZrB_2 qeyd etmək mümkündür [4]. Müxtəlif tədqiqatlar nəticəsində impuls rejimində çalışan NMRS (Nüvə Maqnit Rezonans Spektroskopiyası) və "maqnit-bucaq" spin texnikasından istifadə etməklə bir sıra borlu kristallarda borun izotop qarışıqlarının konsentrasiyasının və borat minerallarında ^{10}B və ^{11}B izotopunun spektrlərinin təyin olunması növbəti tədqiqatlar üçün yeni üfqlər açmışdır. Bor elementi kristal, yaxud amorf quruluşlarda adətən iki izotopun (^{10}B və ^{11}B) cəmi şəklində mövcuddur [5]. Kristofer və başqaları tərəfindən sintez olunmuş super möhkəm WB_4 birləşməsində bor izotoplarının (^{10}B və ^{11}B) paylanma qanunauyğunluğunu öyrənmək məqsədilə nüvə maqnit rezonans spektroskopiyası (NMRS) metodundan istifadə edilmişdir. WB_4 kristalında ^{11}B spektrinin tam maqnit həssaslığı (680 kHz intervalda), maqnit qütblərinin dördbucaqlı tezlikləri, ikinci dərəcəli dördbucaqlı xətt formaları və ^{10}B izotopunun spektrləri (142kHz intervalında) aşkar olunmuşdur [5]. BO_3 və BO_4 oksid birləşmələrində izotop nisbətinin dəqiq vahidlərini ayırmaq üçün, kristal və şüşələmiş bor birləşmələrində ^{11}B və ^{10}B izotopunun spektrləri NMRS metodu ilə geniş xəttlə fasiləsiz dalğa üsulu

metodundan istifadə etməklə öyrənilmişdir [5]. Tətbiq sahəsinə görə "sirlı materiallar" adlanan borlu birləşmələr ionlaşdırıcı şüaların qeyd edilməsində yüksək effektiv detektor xassələrinə malikdir. Nüvə reaktorlarında geniş tətbiqi və hərbi sənayedə müxtəlif qoruyucu avadanlıqların hazırlanmasına qədər geniş bir tətbiq sahəsi mövcuddur. Son onillikdə yüksək analitik dəqiqliyə malik termofiziki qurğuların əsas tərkib hissələrini təşkil edən elementlər bor əsaslı birləşmələrin polimer qarışıqlarla əmələ gətirdiyi kompozitlər əsasında hazırlanmaqdadır. B_4C birləşməsi nüvə reaktorlarında neytron udularının hazırlanmasında, optik qurğularda, müxtəlif enerjili neytronlar üçün detektorların hazırlanmasında geniş istifadə olunur [6]. Tədqiqat işində geniş araşdırılmış borlu nümunələrin dayanıqlı kimyəvi, fiziki və mexaniki xüsusiyyətləri onun müasir nüvə texnologiyalarında tətbiqinə geniş imkanlar yaradır. Termofiziki xassələrin kinetikasına görə borlu nümunələr yüksək temperaturlarda dayanıqlı materiallardan (ərimə temperaturu $2350^\circ C$, buxarlanma temperaturu $3500^\circ C$) hesab edilir [7]. Unikal kristallik quruluşa malik olan nüvə reaktorlarında "yanacaq materiallarının kinetikasını idarə edən çubuqlar" kimi geniş istifadə olunur. (h -BN) və (h - B_6Si) tədqiqat obyektləri detektor xüsusiyyətlərinə görə neytron və qamma şüalarının qeyd olunmasında yüksək izotermik oksidləşmə temperaturuna malik olması bu birləşmələrə böyük maraq doğurmuşdur. Bor nitrid birləşməsinin SiC, ZrB, AlN keramik birləşmələrlə əmələ gətirdiyi kompozit birləşmələrin termofiziki qiymətlərinin (istilik tutumu, istilik keçiriciliyi, termodiffuziya əmsalı) yüksək olması onun tətbiq sahəsinə daha da genişləndirir [8-9]. Məsələn quruluş strukturunu formalaşdıran bor nitridin bor karbidlə əmələ gətirdiyi kompozit materialların oksidləşmə müqaviməti bor karbidə on dəfə çoxdur. Qamma kvantlarla şüalanmış heksaqonal bor nitrid strukturunda kubik BN faza izlərinin yaranması baş verir. Kristal quruluşun hibridləşmə formasını dəyişməsi yüksək temperaturlarda mürəkkəb termodinamik mexanizmin olmasını göstərir [10]. Tədqiqat işində borlu birləşmələrdə, şüalanma faktorundan asılı olaraq, nümunələrin kristal quruluşunda formalaşan vakansiyaları, sərbəst bor və silisium atomlarının yerdəyişməsinin aktivləşmə enerjisi və mürəkkəb termodinamik qanunauyğunluqları öyrənilmişdir.

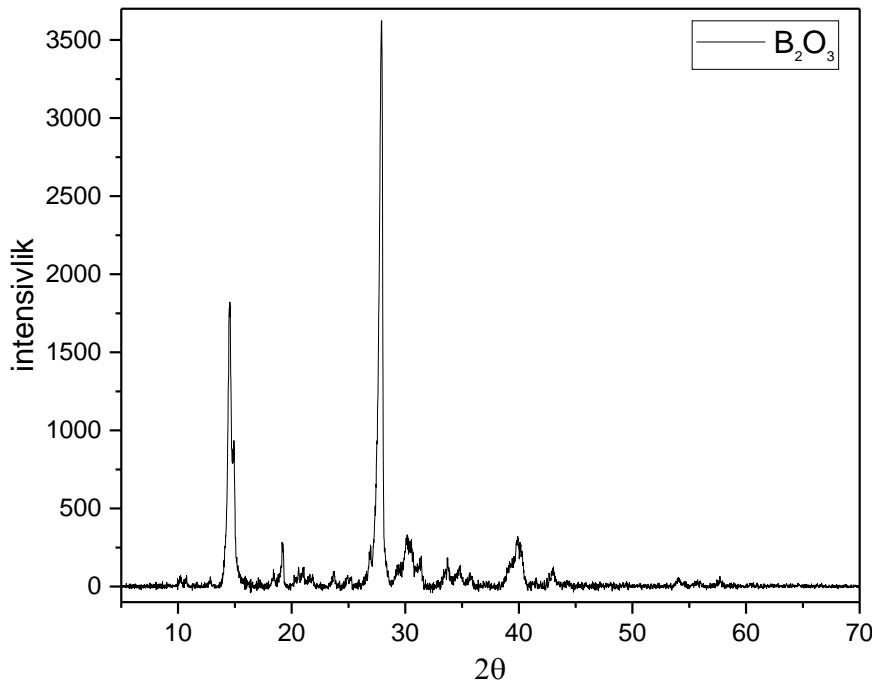
2. TƏCRÜBƏLƏR

Ekperimental təcrübələrdə təmizlik dərəcəsi 99.9%, xüsusi səth sahəsi $28 \text{ m}^2/\text{q}$, hissəciklərin ölçüsü $1-3 \text{ }\mu\text{m}$, toz halında sıxlığı $1.8 \text{ q}/\text{sm}^3$ olan romboedrik fəza quruluşlu B_4C , 99.8%, xüsusi səth sahəsi $76-120 \text{ m}^2/\text{q}$, hissəciklərin ölçüsü $3-8 \text{ }\mu\text{m}$, toz halında sıxlığı $2.29 \text{ q}/\text{sm}^3$ olan heksaqonal fəza quruluşlu BN, 99.5%, xüsusi səth sahəsi $68 \text{ m}^2/\text{q}$, hissəciklərin ölçüsü $40 \text{ }\mu\text{m}$, toz halında sıxlığı $2.43 \text{ q}/\text{sm}^3$ olan heksaqonal fəza quruluşlu B_6Si və 99.99%, xüsusi səth sahəsi $32 \text{ m}^2/\text{q}$, hissəciklərin ölçüsü 80 nm , toz halında sıxlığı $2.6 \text{ q}/\text{sm}^3$ olan tetraqonal fəza quruluşlu B_2O_3 nano birləşməsindən istifadə edilmişdir. Tədqiqat nümunələri, enerjisi $E < 1 \text{ MeV}$ olan sürətli neytronlarla nümunələrin otaq temperaturunda $4.0 \times 10^{12} \text{ n}/(\text{sm}^2 \times \text{san})$, $8.0 \times 10^{12} \text{ n}/(\text{sm}^2 \times \text{san})$, $1.37 \times 10^{13} \text{ n}/(\text{sm}^2 \times \text{san})$, $4.0 \times 10^{14} \text{ n}/(\text{sm}^2 \times \text{san})$ və $1.0 \times 10^{15} \text{ n}/(\text{sm}^2 \times \text{san})$ intensivliklərdə [10-13], 2.5 MeV enerjili xətti elektron sürətləndiricidə $4.16 \times 10^{16} \text{ 1}/\text{sm}^2$, $1.20 \times 10^{17} \text{ 1}/\text{sm}^2$ və $1.03 \times 10^{18} \text{ 1}/\text{sm}^2$ intensivliklərdə [14-16] və $167 \text{ MeV}/\text{u}$ enerjili ^{132}Xe ionları ilə $5.0 \times 10^{12} \text{ ion}/\text{sm}^2$, $5.0 \times 10^{13} \text{ ion}/\text{sm}^2$ və $3.83 \times 10^{14} \text{ ion}/\text{sm}^2$ intensivlikdə [17-19] otaq temperaturunda şüalandırılmışdır. Həmçinin, tədqiqat nümunələrinin 1.17 MeV və 1.33 MeV enerji xəttinə malik ^{60}Co mənbəyi ilə 9.7 kQr , 48.5 ,

97 kQr , 145.5 kQr və 194 kQr udulma dozalarında şüalanması yerinə yetirilmişdir [20-29]. Termofiziki xassələr “Perkin Elmer” STA 6000 [17-15], DSC3 STAR^e Systems METTLER TOLEDO [10-12] və NETSCHE DSC 204 F1 Phoenix [10-16] cihazında öyrənilmişdir. “Perkin Elmer” STA 6000 cihazında işçi oblast $25-1000^\circ\text{C}$, termik işləmə sürəti $5^\circ\text{C}/\text{min}$, PolyScience analizatoru və “digital temperature controller” soyuducu sistemindən ibarətdir. “Pyris Manger” proqram təminatından istifadə olunaraq kinetik parametrlərin təyini, dəyişməsi və temperaturdan asılı olaraq artması və azalması hesablanmışdır. Yanma məhsullarının sistemdən xaric edilməsi və kondensasiya prosesinin qarşısının alınması məqsədi ilə təsirsiz arqon (Ar) qazından istifadə edilmiş və sistemə verilmiş sürəti $20 \text{ ml}/\text{dəq}$ götürülmüşdür.

3. MÜZAKİRƏLƏR

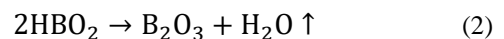
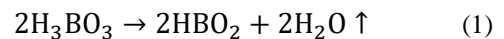
B_2O_3 nano kristalının difraksiya spektri şəkil 1-də verilmişdir. Müəyyən olunmuşdur ki, difraksiya spektri $Cmc2$ fəza qrupuna, $a=0.4613 \text{ nm}$, $b=0.7803 \text{ nm}$ və $c=0.4129 \text{ nm}$ qəfəs parametrlərinə malik $\beta\text{-B}_2\text{O}_3$ modifikasiyaya uyğundur. Spektrdə B(OH) xarakterizə edilən fazaların olması aktiv nano səth tərəfindən atmosferdən su molekullarının absorbsiya olunduğunu göstərir.



Şəkil 1. B_2O_3 nano kristalının difraksiya spektri.

Şəkil 2-də $450 \leq T \leq 580 \text{ K}$ temperatur intervalında B_2O_3 nano kristalının səthində, neytron selinin intensivliyindən asılı olaraq, müxtəlif növ qarşılıqlı təsirdə olan fərqli OH qruplarının mürəkkəb mexanizmlə baş verən parçalanma reaksiyalarının DSC spektrləri verilmişdir.

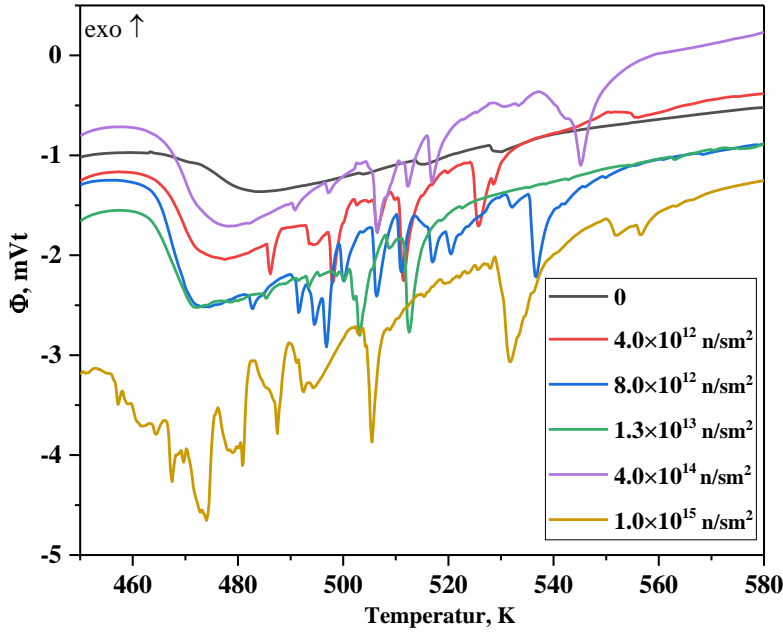
Qrafikdən aydın görünür ki, yüksək udulma dozalarında parçalanma mərkəzlərinin sayı artır və $450 \leq T \leq 580 \text{ K}$ temperatur intervalında yüksək kimyəvi aktivliyə malik nano bor oksid birləşməsində $\text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{H}_3\text{BO}_3$ mexanizmi üzrə ardıcıl çevrilmə reaksiyaları baş verir [20-23].



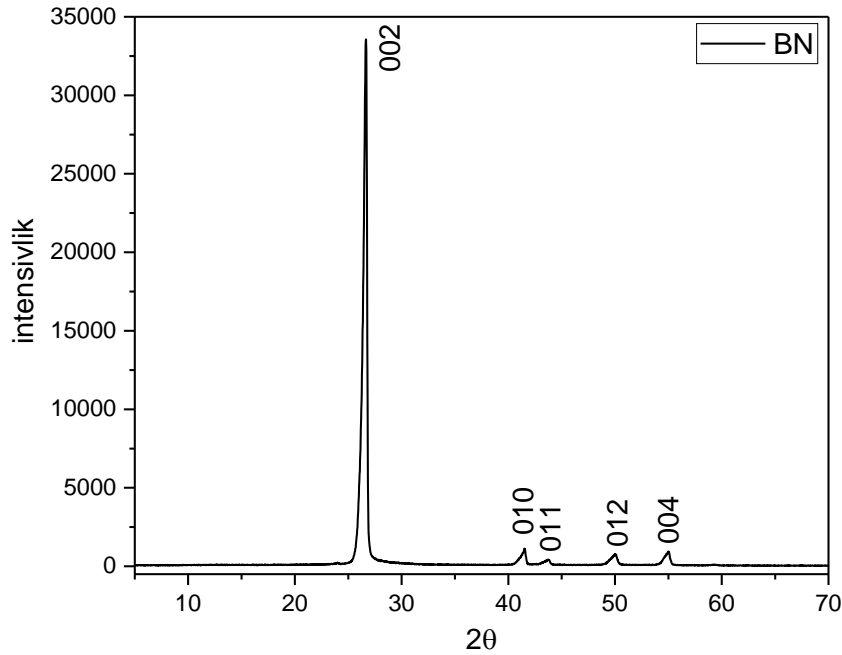
Neytron intensivliyinin artması ilə yeni endo-mərkəzlər formalaşır. Neytron şüalanma hesabına formalaşmış hər bir yeni endo-mərkəz temperaturun təsiri altında hidrat və hidrooksid qrupunun parçalanma fazasını eksperimental olaraq xarakterizə edir. Şüalanmamış nümunədə mərkəzi piki 503 , 515 , və 530 K temperatura uyğun gələn endo-effektlər şüalanmadan sonra daha da

artır. Şüalanma dozəsindən asılı olaraq endo-effektlərin temperaturun kiçik 457 K və böyük 556 K qiymətlərinə doğru dəyişməsi yuxarıda söylənilən fikirləri təsdiq edir. Şüalanma məhsulu kimi yaranmış H^+ atomları müəyyən miqdarda həcmdə neytron selinin təsiri ilə

formalaşmış aktiv mərkəzlər tərəfindən tutulur. Digər tərəfdən, radikal şəklində H^+ atomları birləşərək molekulyar hidrogen formasına keçir və parçalanma məhsulu kimi ayrılır. Altıbucaqlı bor nitrid (*h*-BN) mikro kristalının difraksiya spektri şəkil 3-də göstərilmişdir.



Şəkil 2. $450 \leq T \leq 580$ K temperatur intervalında şüalanmamış və müxtəlif intensivlikli neytron seli ilə şüalandırılmış B_2O_3 nümunəsində istilik selinin effektləri.



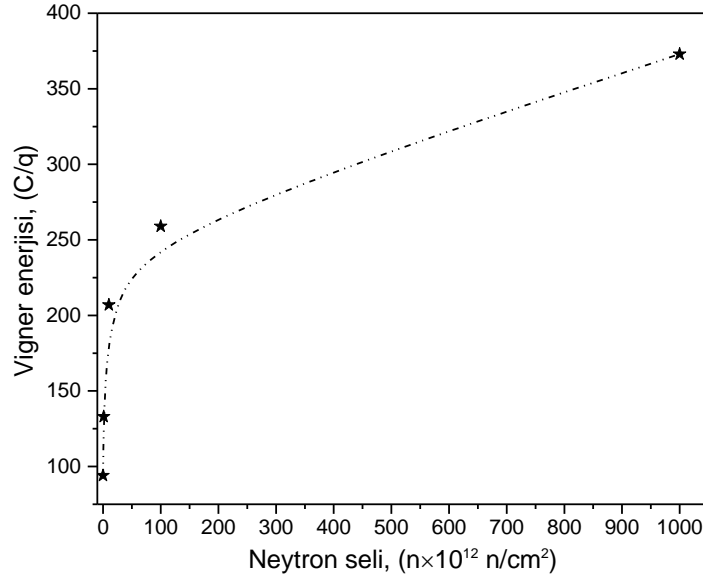
Şəkil 3. BN nano kristalının difraksiya spektri.

Analiz nəticələri göstərir ki, bor nitrid hissəciklərinin quruluş və səth modifikasiyasında dəyişiklik mövcud deyil. Bor nitrid üçün mövcud müstəvi difraksiyasına aid edilir, bu piklər borun altıbucaqlı fazasının (002), (100), (101), (102), (004) və (110) müstəvilərinə aiddir [24-28]. BN kristal ölçülərinin (Şerrer düsturundan istifadə etməklə) müvafiq olaraq 2.5092nm və 6.6762nm, fəza qrupunun P-6, $a=2.5092 \text{ \AA}$; $c=6.6762 \text{ \AA}$; $\alpha=90^\circ$; $\gamma=120^\circ$ olduğu müəyyən edilmişdir.

Bor nitrid nümunəsi üçün istilik axınının sürəti $400 \leq T \leq 1300$ K temperatur intervalında sabitdir [29]. Bununla birlikdə, sərbəst buraxılan Vigner enerjisinin kinetikasi bir bölgəni əhatə edir və $770 \leq T \leq 1220$ K temperatur intervalında "Vigner enerji" təyin olunur. Cədvəl 1-də heksagonal bor nitrid hesablanmış Vigner enerjisi qiyməti bir sıra tədqiqat nəticələri ilə bir araya gətirilmişdir.

Altıbucaqlı bor nitrid nümunəsində müxtəlif ədəbiyyat nəticələrindən alınan Vigner enerjisinin qiyməti.

Nümunə	Mərkəzi pik, K	Baza qiyməti	Vigner enerjisi, C/q	Vigner enerjisi, kC/mol	Vigner enerjisi, eV/atom	Ədəbiyyat
<i>h</i> -BN	623	300-1173 K	93.89	233.22	56	[30]
	598	525-584 K	95.8	245.89	58.9	[30]
	1002.9	770-1220 K	94.49	239.76	57.89	Tədqiqat işi

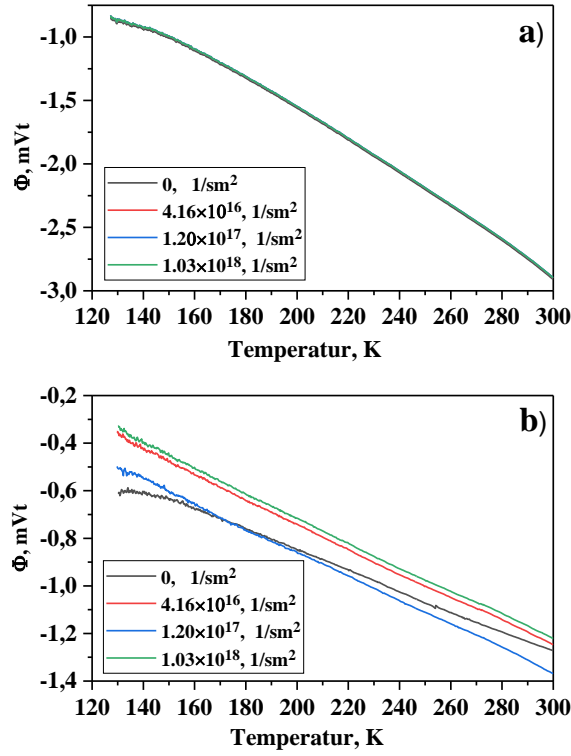
Şəkil 4. *h*-BN nümunəsi üçün neytron axımı əsasında saxlanılan enerji qrafikinə dəyişməsi.

DSC analizlərinin nəticələri (oksidləşmə reaksiyasından əlavə) göstərir ki, bor nitridin kristal stukturda sintez şəraitindən və yaxud digər təsirlərdən həcmdə və yaxud Ar və vakuum səthində xarakterik defektlər formalaşır. Defektlərin formalaşma mexanizmindən və onların miqrasiyasından asılı olaraq Vigner effektləri fərqli temperatur intervalında baş verir. Vigner effektinin fərqli mexanizmlərlə dəyişməsi eksperimental şəraitdən, istilik sürətlərində N_2 , O_2 , Ar və vakuum mühitində yerinə yetirilən təcrübə şərtlərdən asılıdır. Vakuum mühitində yerinə yetirilən bütün eksperimental tədqiqatlarda Vigner enerjisinin qiyməti minimum olur [31-34]. İstilik selinin qiyməti maksimum 5 mVt qədər artır. Müəyyən olunmuşdur ki, $770 \leq T \leq 1220$ K temperatur intervalında mərkəzi piki 1002 K olan şüalanmamış nümunədə Vigner enerjisi maksimum qiymətinə malik olur və uyğunluq təşkil edir [30]. Şəkil 4-də müxtəlif neytron şüalanmalarda BN birləşməsində toplanan enerjinin asılılığı verilmişdir. Göründüyü kimi, eksperimental olaraq şüalanmanın dozasının artması ilə kristal quruluşda toplanan enerji artır. Neytron selinin bor və azot nüvələrindən elastik səpilməsi və radiasion tutulması nəticəsində kristal quruluşda müxtəlif növ defekt mərkəzləri formalaşır. Neytron selinin B^{10} radioizotopu ilə qarşılıqlı təsir prosesində çoxlu sayda enerji xətləri *h*-BN quruluşunda böyük miqdarda defekt mərkəzləri formalaşdırır.

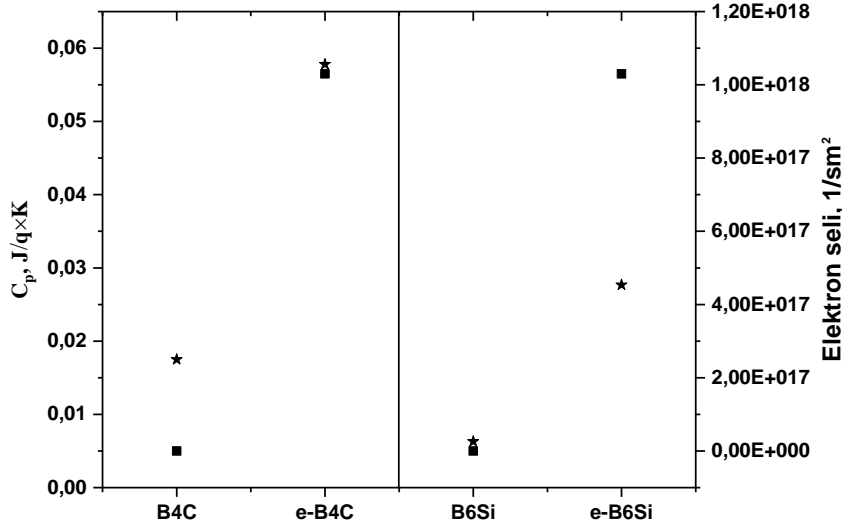
Neytron selinin ^{14}N nüvəsi ilə qarşılıqlı təsiri zamanı 40 keV ^{14}C və 580 keV enerjili 1H proton izotoplarının alınması da, öz növbəsində yeni növ defektlər yaradır. Həmçinin, neytron intensivliyinin artması

ilə kristal quruluşu verilən enerjinin miqdarı artır. Böyük miqdarda defekt mərkəzlər böyük miqdarda enerjinin toplanmasını yaradır. Şüalanmamış nümunələrdə ana defektlərin hesabına yaranan toplanan enerjinin miqdarı 94.49 J/q olduğu halda, $8.0 \times 10^{12} \text{ n/sm}^2$ -dən $4.0 \times 10^{14} \text{ n/sm}^2$ -ə qədər olan neytron intensivliyində toplanan enerjinin qiyməti 133.106 J/q-dən 259.364 J/q qədər zəif artır. Lakin, maksimum neytron $1.0 \times 10^{15} \text{ n/sm}^2$ şüalanması göstərir ki, toplanan enerjinin qiyməti daha sürətlə artaraq 373.609 J/q çatır. Bu bir daha eksperimental olaraq göstərir ki, yüksək şüalanma dozaları yüksək Vigner enerjisinə ekvivalentdir [35-36].

B_4C və B_6Si nümunələri 2.5 MeV enerjili elektronlarla $4.16 \times 10^{16} \text{ 1/sm}^2$, $1.20 \times 10^{17} \text{ 1/sm}^2$ və $1.03 \times 10^{18} \text{ 1/sm}^2$ intensivliklərdə şüalandırılmışdır. Şüalanmadan sonra ilk tədqiq olunan bor karbid nümunəsində $100 \geq T \geq 146$ K temperatur intervalında istilik selinin ötürülməsi daha kiçik sürətli olduğu halda, $146 \geq T \geq 300$ K daha aktiv fazada dəyişir, yəni ikifazlı istilik ötürülmə mexanizmi baş verir. Şəkil 5-dən göründüyü kimi, bor silikat üçün istilik selinin kinetikası bölgələrə bölünür. Bor silikat birləşməsi üçün istiliyin ötürülməsi və selin dəyişməsi eyni mexanizm ilə baş verir. Xətti qanunauyğunluqla dəyişən kinetikada faza keçidi müşahidə olunmursa, baş verən bütün termo-fiziki proseslər xüsusi istilik tutumu üzərində qurulur və bir-biri ilə əlaqəlidir. DSC metodu ilə təyin olunan xüsusi istilik tutumunun qiyməti istilik selinin ortalama qiyməti əsasında hesablanır [37-38].



Şəkil 5. $4.16 \times 10^{16} \text{ 1/sm}^2$, $1.20 \times 10^{17} \text{ 1/sm}^2$ və $1.03 \times 10^{18} \text{ 1/sm}^2$ intensivlikli elektronlarla şüalandırılmış a) bor karbid b) bor silikat nümunələrinin $100 \leq T \leq 300 \text{ K}$ temperatur intervalında istilik seli funksiyası.



Şəkil 6. $100 \leq T \leq 300 \text{ K}$ temperatur intervalında xüsusi istilik tutumunun kinetikası.

Bor karbid numunəsi üçün xüsusi istilik tutumunun temperatur asılılığından alınan ($T_1 \geq 146 \text{ K} \geq T_2$ tem-

peratur aralığında) qrafiklərin fitting olunduqdan sonra tənliklərini aşağıdakı kimi ifadə etmək olar.

$$C_{p1}(T_{T \leq 146}) = f_1(T_{T \leq 146}) = 0.00212 + 1.185 \cdot 10^{-4} \cdot T_{T \leq 146} \quad (3)$$

$$C_{p2}(T_{T \geq 146}) = f_2(T_{T \geq 146}) = -0.01887 + 2.5259 \cdot 10^{-4} \cdot T_{T \geq 146} \quad (4)$$

Alınan eksperimental nəticələr kiçik temperaturalarda istilik selinin bor karbid nümunəsində ötürülməsinin ikili mexanizmlə baş verdiyini göstərir. Kiçik temperaturlarda fonon-fonon qarşılıqlı təsiri ilə ötürülən istilik seli ikili mexanizmdə özünü ehtiva edir. İstilik selinin temperatur asılılığından baş verən termik kinetika, istilik tutumunun temperatur asılılığından da özünü göstərir. İstilik tutumunu temperatur asılılığından

aydın görünür ki, bor karbid nümunələrinin elektron selinin təsiri altında 100 K temperaturda xüsusi istilik tutumu $0.0170\text{-}0.0176 \text{ J/K} \times \text{g}$ intervalında dəyişir. Şüalanma növündən və şüalanma selindən asılı olmayaraq, bor silikat nümunələri üçün xüsusi istilik tutumunun mexanizmi bor karbid nümunəsindən fərqlənir [39]. Bor silikat nümunəsində istilik selinin ötürülmə mexanizmi xəttidir. Həmçinin, bor silikat numunəsi üçün

xüsusi istilik tutumunun temperatur asılılığından alınan qrafikin fitting qiyməti aşağıdakı kimi ifadə etmək olar.

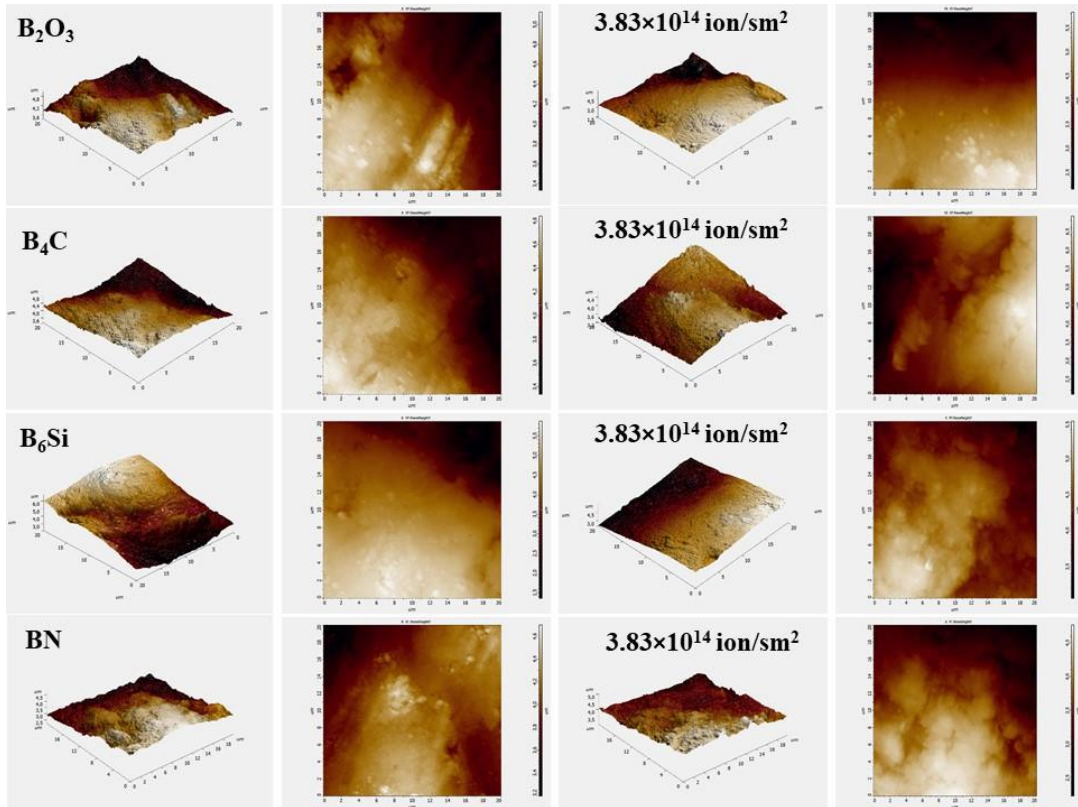
$$C_p(T) = -0.01645 + 2.4188 \cdot 10^{-4} \cdot T \quad (5)$$

Kiçik temperaturalarda fonon-fonon qarşılıqlı təsirinə ötürülməsi yalnız bir mexanizmdir. Bor silikat nümunəsində elektron və ion selinin təsiri altında, 100K temperaturda xüsusi istilik tutumu 0.005627-0.0129 J/K×g intervalında dəyişir. Lakin, bu bor karbid nümunəsi ilə müqayisədə olduqca kiçik qiymətdir [40]. İstilik tutumunun alınmış qiyməti kristal quruluş və sıxlıq faktoru ilə bağlıdır. Sıxlığın artması ilə keramik nümunələrdə kiçik temperaturalarda fonon-fonon qarşılıqlı təsiri daha böyükdür və bu daha çox xətti funksiya ilə ifadə olunur. Müxtəlif sıxlıqlara malik bor karbid və bor silikat nümunələrinin xüsusi istilik tutumunun azacıq dəyişməsi eksperimental müşahidə olunur. Hər bir şüalanma üçün xüsusi istilik tutumunun kinetikasi şəkil 6-da verilmişdir.

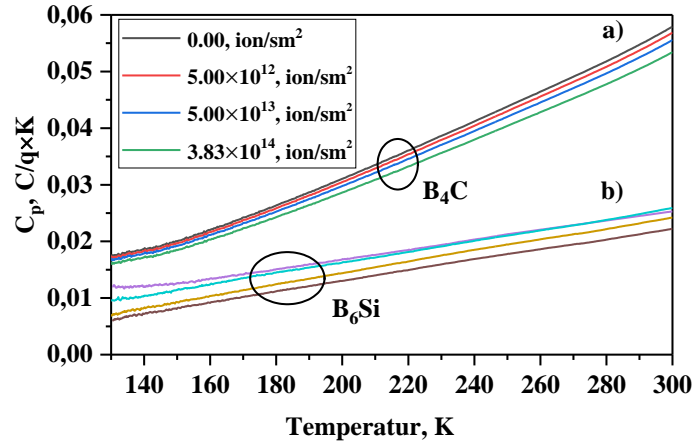
Xüsusi istilik tutumunun dəyişmə kinetikasi göstərir ki (şəkil 6), B₄C birləşməsi 100≤T≤300 K temperatur intervalında yüksək enerjili elektronlarla şüalandırıldıqda 3.48, B₆Si nümunəsi üçün 4.40 dəfə artır. Eksperimental təcrübələr göstərir ki, bor silikat nümunələrində xüsusi istilik tutumunun qiyməti daha sürətlə artır.

Şəkil 7-də B₂O₃, B₄C, B₆Si və BN birləşməsinin ilkin və yüksək enerjili ¹³²Xe ionları ilə şüalanmadan sonra 2D və 3D səth morfologiyası təsvirləri verilmişdir. Şüalanmayan nümunələrdə səthdə əmələ gələn mikrostrukturun maksimal ölçüsü 4.8±0,5µm bərabər-

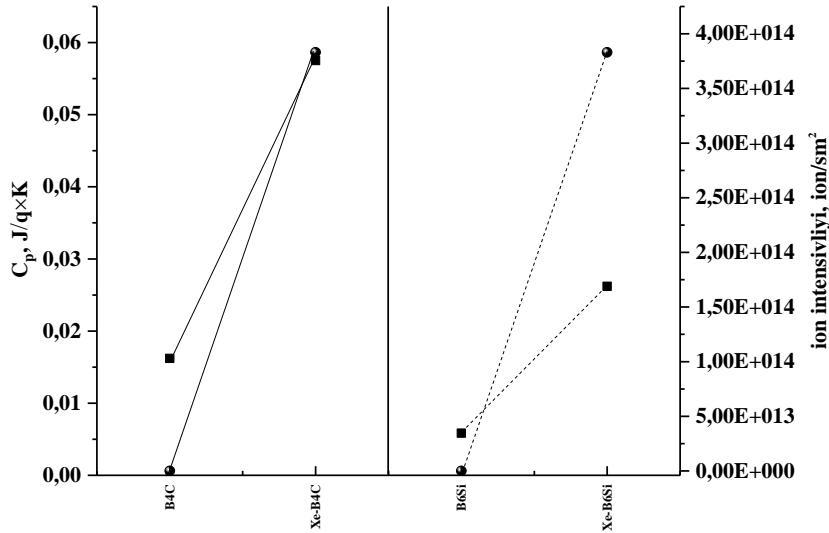
dir. İlkin strukturun 2D morfologiyasından görüldüyü kimi, şişlərin paylanma dinamikası zəifdir. 167MeV ¹³²Xe ionları ilə şüalanmadan sonra mikrostrukturda hissəciklərin paylanması, şişlərin sahəsi və ölçüsü artır. Şüalanma zamanı iri şişlər kiçik və orta şişlər tərəfindən "adsorbsiya edilmişdir". Çox təbəqəli nümunələr üçün bu proses "şişlərin qarşılıqlı keçid effektləri" adlanır [31-32]. Nəticədə, müxtəlif ölçülü radiasiya şişkinliyi daha böyük təsirlənmiş şişlərin formalaşmasına təsir edir. Nümunələrin səthində şişkinliyin artması səthdə baş verən istilik prosesləri nəticəsində baş verir. Conson yaxınlaşmasına görə, silindrik formalaşan ölçü Conson parametrinə bərabərdir. Tədqiqatlar göstərir ki, şüalanmamış nümunələrin səthində şişlərin böyümə sürəti şüalanmış nümunələrdəkindən 2.2 dəfə çoxdur. 167 MeV ¹³²Xe ionlarla şüalandırılmış nümunələrdə şişlərin böyümə sürəti müəyyən olunmuşdur. İon şüalanma zamanı səthdə şişlərin yaranması mikrostrukturun dislokasiyası və yaxud "çoxqatlı birləşmələrdə dislokasiyanın əmələ gəlməsi" ilə bağlıdır. Dislokasiya mikrostrukturda iki (impulsu şüalanma və davamlı şüalanma) mexanizmlə formalaşır. Ədəbiyyatda α-Fe üzərində 50 keV Ar ionlarla yerinə yetirilən tədqiqatlar göstərir ki, enerji və intensivlikdən asılı olaraq dislokasiya sıxlığı impuls rejimində formalaşır. Həmçinin, dislokasiya təsirləri nümunənin səthində plastik deformasiyanın yaranmasını formalaşdırır. Parçalanma məhsullarından olan ²He ionun enerjisi 1 MeV ətrafında dəyişir. Yüksək entropiyaya malik nümunələrin ~100nm dərinliyində qaz ionları molekulyar hala keçərək şişlər mexanizmini yaradır. Şişlərin təsiri altında qəfəs parametrlərinin genişlənmə prosesi baş verir.



Şəkil 7. 3.83×10^{14} ion/sm² intensivlikdə 167 MeV ¹³²Xe ionları ilə şüalanmış B₂O₃, B₄C, B₆Si və BN nümunələrinin səth morfologiyası.



Şəkil 8. $120 \leq T \leq 300$ K temperatur intervalında 5.0×10^{12} ion/sm², 5.0×10^{13} ion/sm² və 3.83×10^{14} ion/sm² intensivliklərdə şüalandırılmış B₄C və B₆Si birləşmələrinin xüsusi istilik tutumunun temperatur asılılığı.



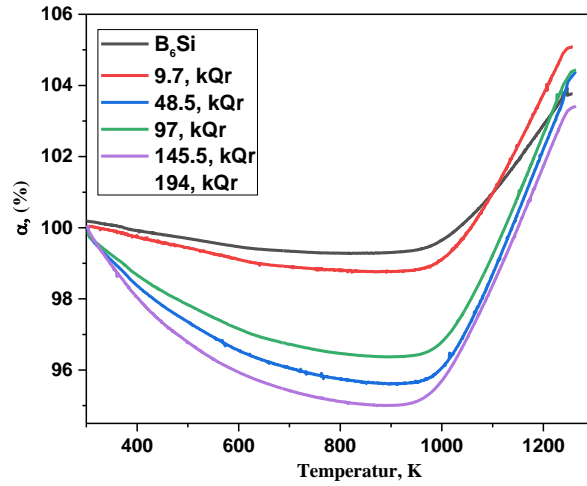
Şəkil 9. Müxtəlif intensivlikli ağır ionlarla şüalanmış B₄C və B₆Si nümunələrinin xüsusi istilik tutumunun $120 \leq T \leq 300$ K temperatur intervalında kinetikasi.

Şəkil 8-də B₄C və B₆Si nümunələri üçün $120 \leq T \leq 300$ K temperatur intervalında müxtəlif şüalanmalarda 5.0×10^{12} ion/sm², 5.0×10^{13} ion/sm² və 3.83×10^{14} ion/sm² xüsusi istilik tutumunun temperatur asılılığı göstərilmişdir.

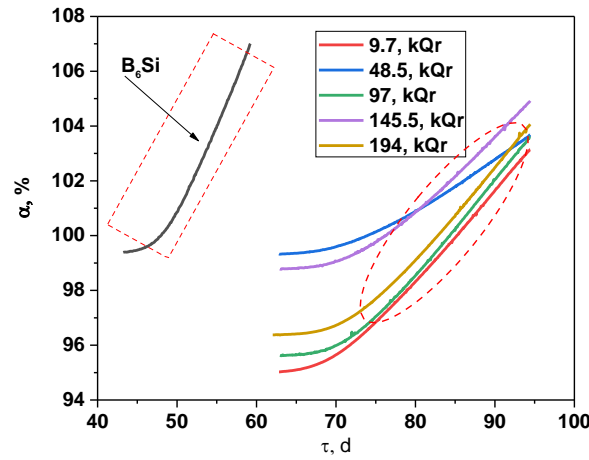
İstilik selinin temperaturdan asılılıq kinetikasi istilik tutumunun temperaturdan asılılığında təzahür olunur. İstilik tutumunun temperatur asılılığından aydın olur ki, B₄C nümunələri müxtəlif intensivlikli ionların təsirinə məruz qaldıqda, 120 K temperaturda 0.0170-0.0176 C/q×K-ə bərabərdir. Yüksək enerjili ağır ionlarla şüalanmış B₄C nümunələrində xüsusi istilik tutumunun qiyməti 0.016 C/q×K-ə dəyişir. Ağır ionlarla qarşılıqlı təsir nümunələrin səth morfologiyasında amorfizasiyaya və istilik tutumunun kinetikasında dəyişikliyə səbəb olur. B₆Si nümunələrinin istilikkeçiricilik mexanizmi B₄C nümunəsindən bir qədər fərqlənir. B₆Si nümunəsində istiliyin paylanma mexanizmi xəttidir. Xüsusi istilik tutumunun kinetikasi B₄C və B₆Si nümunələri üçün şəkil 9-da verilmişdir. Xüsusi

istilik tutumunun dəyişməsi göstərir ki, B₄C birləşməsi $120 \leq T \leq 300$ K temperatur intervalında sürətli ağır ionlara məruz qaldıqda 3.59, B₆Si nümunəsi isə 4.42 dəfə artır [41]. Təcrübələr B₆Si nümunələrində xüsusi istilik tutumunun qiymətinin daha sürətlə artdığını göstərir. Eksperimental təcrübələrdə ağır ionlarla şüalanmadan sonra, B₆Si nümunəsində xüsusi istilik tutumu daha aktiv fazada dəyişir.

Şəkil 10-da müxtəlif udulma dozalarında şüalandırılmış B₆Si birləşməsinin oksidləşmə dərəcəsinin temperatur asılılığı verilmişdir. B₆Si birləşməsində oksidləşmə şüalanmamış və 9.7, 48.5, 97, 145.5, və 194kQr udulma dozalarında şüalanmış nümunələr üçün $T \geq 650^\circ\text{C}$ -dən başlayır. Lakin, $T \leq 650^\circ\text{C}$ oblastında şüalanmanın udulma dozasından asılı olaraq, nümunələrin kütləsində fərqli miqdarlarda parçalanmalar müşahidə olunur ki, bu da atmosfer şəraitində nümunələr tərəfindən absorbsiya olunmuş su buxarlarının parçalanması ilə bağlıdır.



Şəkil 10. $650 \leq T \leq 1000^\circ\text{C}$ temperatur intervalında müxtəlif qamma şüalanma dozası ilə şüalandırılmış B_6Si nümunəsi üçün oksidləşmə kinetikasi.



Şəkil 11. B_6Si nümunəsinin müxtəlif qamma şüalanma dozasında $650 \leq T \leq 1000^\circ\text{C}$ temperatur intervalında oksidləşmə dərəcəsinin zamandan asılılığı.

Yüksək udulma dozalarında oksidləşmə dərəcəsinin udulma dozasından asılılığı əsasən iki hissədən ibarətdir: Qeyri isotermləşmə oblast $650 \leq T \leq 740^\circ\text{C}$ temperatur intervalından və isotermləşmə $T \geq 740^\circ\text{C}$ başlayır. Oksidləşmənin kritik temperaturu B_6Si nümunəsi üçün 9.7, 48.5, 97, 145.5 və 194 kQr udulma dozalarında $T \approx 970^\circ\text{C}$ temperaturuna uyğundur. Qeyri izotermləşmə oblastda kiçik miqdarda oksidləşmə faizi göstərir ki, oksidləşmənin bu mexanizmi daha çox passiv oksidləşmədir. B_6Si hissəciklərinin səthində maye B_2O_3 təbəqəsinin formalaşması isotermləşmə oblastda daha aktiv şəkildə baş verir [33]. Şüalanmamış nümunədə oksidləşmə 3.5% təşkil edirsə, 194 kQr şüalandırılmış nümunələrdə 8.2%-ə bərabərdir. Bu onu göstərir ki, prosədə iki mexanizmlə oksidləşmə prosesi baş verir. Kritik temperaturdan sonra B_6Si hissəciklərində aktiv fazada oksidləşmə prosesi tamamlanır. Oksidləşmə prosesinin kinetikasi və aktivləşmə enerjisinin təyini üçün oksidləşmənin zamandan asılılığı müxtəlif udulma dozalarında müəyyən olunmalıdır. B_6Si birləşməsi üçün zamandan asılı olaraq müxtəlif udulma dozalarında temperaturun artması ilə oksidləşmə dərəcəsinin asılılığı şəkil 11-də verilmişdir.

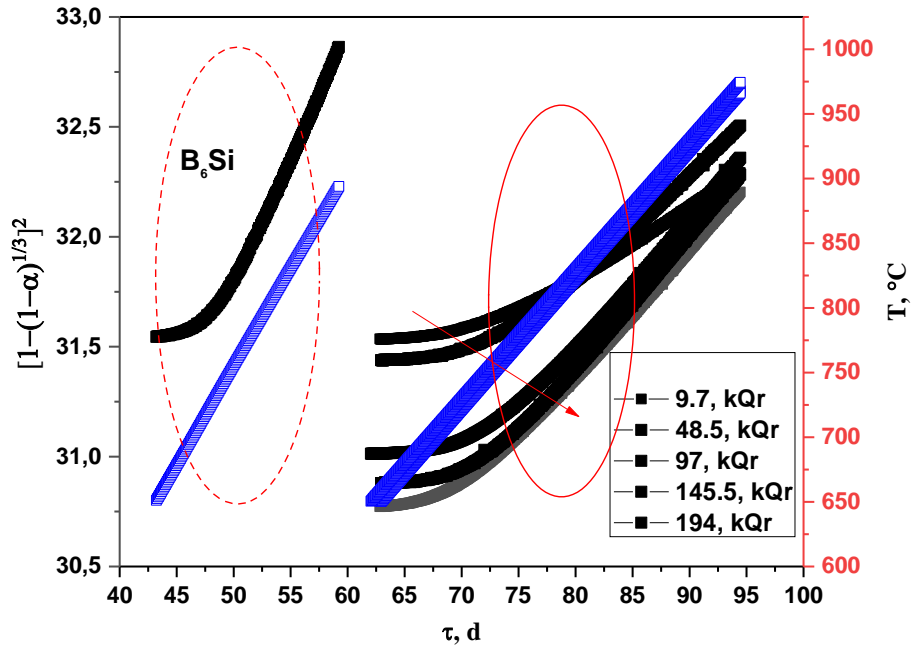
Şəkil 11-də şüalanmamış nümunədə oksidləşmə zamandan asılı olaraq sürətli fazada baş verir, müxtəlif udulma dozalarında şüalandırılmış B_6Si birləşməsində yüksək udulma dozalarında cəmlənmiş oksidləşmə

faktoru özünü daha aydın göstərir. $T \leq 650^\circ\text{C}$ -də, udulma dozalarından asılı olmayaraq, oksidləşmə dərəcəsinin qiyməti bir-birinə bərabərdir. B_2O_3 ərimə temperaturunda ($T=450^\circ\text{C}$) kiçik qiymətlərdə oksidləşmə müşahidə olunmur. $450 \leq T \leq 650^\circ\text{C}$ temperatur intervalı nümunədə termik stabil oblastdır və istilik selinin sürəti nümunədə hər hansı dinamik dəyişiklik yaratmır. Şüalanmadan sonra B_6Si birləşməsinin $T \leq 650^\circ\text{C}$ kiçik temperaturda oksidləşməsi daha çox "non-isothermal oxidation" xarakterlidir. $T \geq 740^\circ\text{C}$ -dən sonra udulma dozasından asılı olmayaraq bütün oblast üzrə xətti oksidləşmə müşahidə olunur və bu qiymət kritik həddə çatana qədər artır. Oksidləşmə dərəcəsinin temperaturdan, şüalanmanın udulma dozasından və zamandan asılılıqları göstərdi ki, əsas oksid təbəqəsi səth xarakterlidir. Səth xarakterli oksidləşmə proseslərində oksidləşmə dərinliyi və oksidləşmənin diffuziya sürəti kritik həddin səviyyəsini müəyyən edir. Səthdə yaranan oksidləşmə dərinliyi şüalanmanın udulma dozası və temperaturdan önəmli dərəcədə asılı olduğu kimi, nümunənin molyar kütləsindən, kimyəvi çevrilmədən sonra yaranan birləşmələrin molyar kütləsindən, hissəciyin xüsusi səth sahəsi və hissəciyin ölçüsündən də asılıdır. Oksidləşmə reaksiyasında B_6Si -dən B_2O_3 və SiO_2 kimyəvi keçidləri nəzərə alsaq, səthdə yaranan oksid dərinliyi və hər bir udulma dozası üçün yaranan

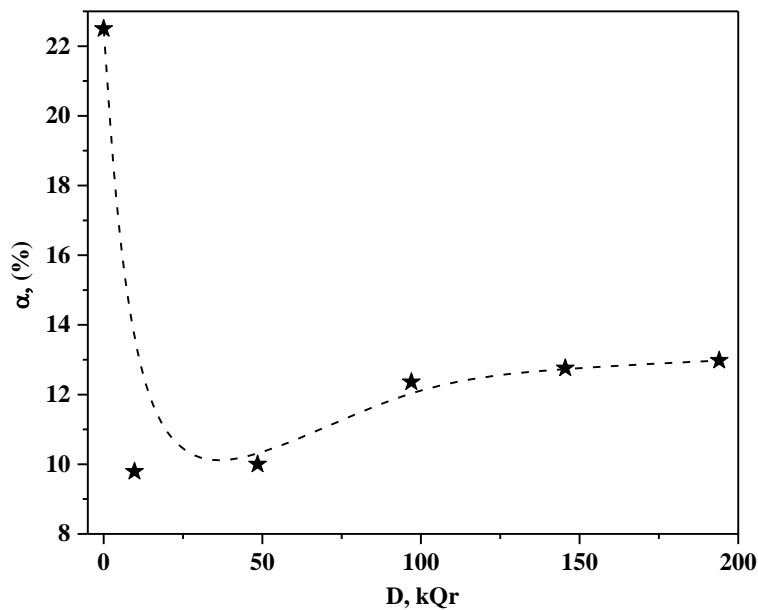
oksid dərinliyi müəyyən olunmuşdur. Oksidləşmə prosesində xəttlilik və stabil oblast müşahidə olunduğu kimi, həmin prosesin kinetikasi da səthdə baş verən kimyəvi reaksiyanın mexanizmi ilə izah olunur. Bir çox hallarda səthdə baş verən oksidləşmə B_6Si birləşməsi üçün $650 \leq T \leq 1000^\circ C$ temperatur intervalında Jander tənliyindən istifadə olunmaqla qurulmuşdur. Şəkil 12-də müxtəlif udulma dozalarında şüalandırılmış B_6Si birləşməsi üçün müxtəlif zamanlardan və temperaturdan asılı olaraq Jander ayrılıqları qurulmuşdur.

Müxtəlif udulma dozalarında şüalandırılmış B_6Si birləşməsi üçün $650 \leq T \leq 1000^\circ C$ temperatur intervalında Jander ayrılıqları iki hissəyə bölünür. $T=740^\circ C$ -ə qədər diffuziya zəif olur (passiv oksidləşmə), $T>740^\circ C$ -dən sonra isə oksidləşmə aktiv fazaya keçir. Yüksək udul-

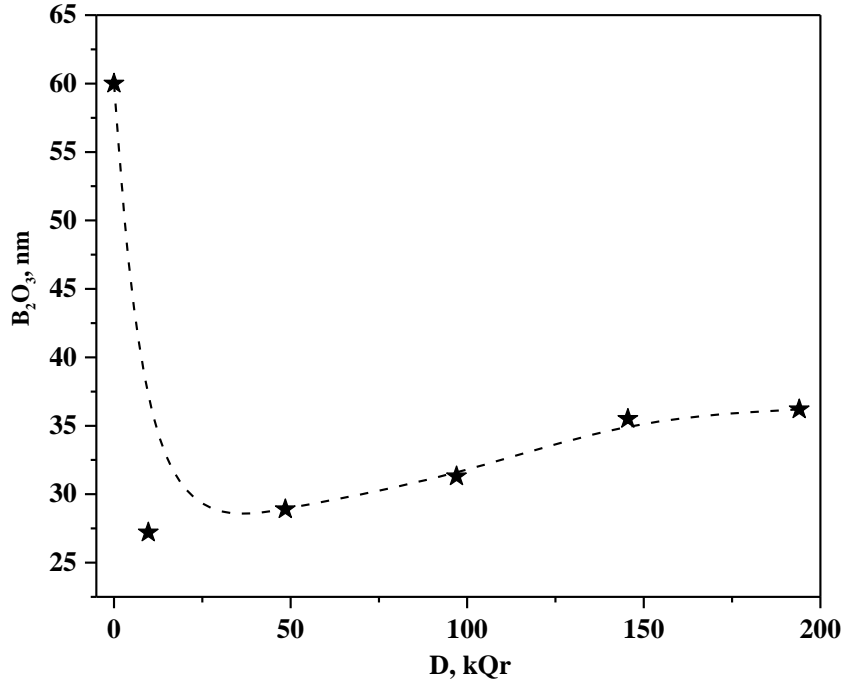
ma dozalarında və temperaturlarda oksidləşmə diffuziyasının daha böyük qiymət alması müəyyən olunmuşdur. Oksidləşmə reaksiyasında kütlənin artması ilə paralel B_2O_3 və BO_2 buxarlanma reaksiyası baş verir. Lakin buxarlanma reaksiyasının sürəti oksidləşmə reaksiyasının sürətindən zəif olduğu üçün gamma şüalanmanın yüksək udulma dozalarında ayrılıqlar daha böyük ədədi qiymətə malik olur. Şəkil 13-də B_4C birləşməsinin $950 \leq T \leq 1200 K$ temperatur intervalında və müxtəlif qamma udulma dozalarında, eksperiment zamanından asılı olaraq, oksidləşmə spektrləri verilmişdir. Şüalanmamış bor karbid nümunəsinin kütlə spektrinin oksidləşməsi eksperiment müddətindən asılıdır. Müxtəlif udulma dozalarında şüalandırılmış bor karbid nümunələrinin oksidləşmə prosesi zəif xarakterlidir.



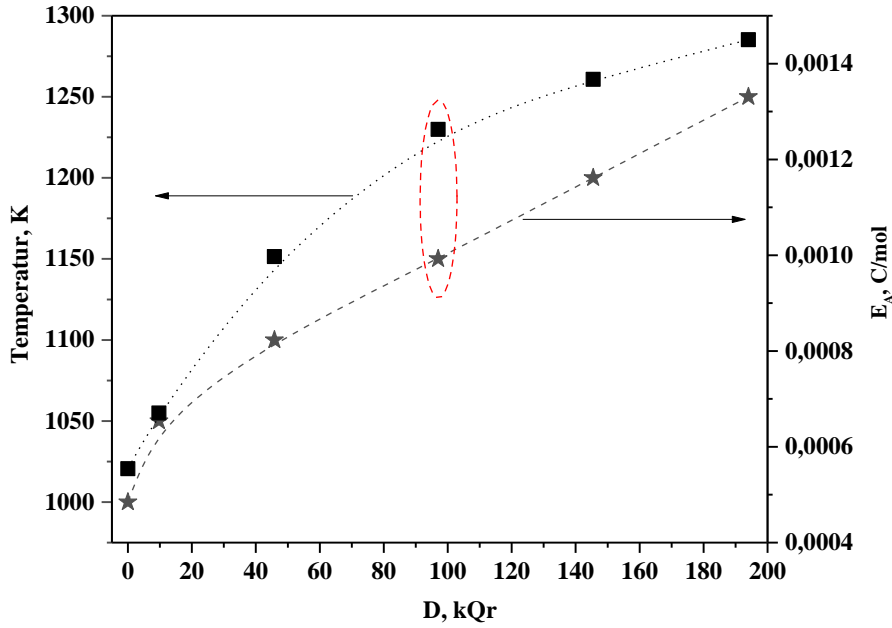
Şəkil 12. $650 \leq T \leq 1000^\circ C$ temperatur intervalında müxtəlif qamma şüalanma dozalarında Jander ayrılıqları.



Şəkil 13. $950 \leq T \leq 1250 K$ temperatur intervalında müxtəlif qamma şüalanma dozalarında bor karbid birləşməsinin oksidləşmə kinetikasi.



Şəkil 14. 950 ≤ T ≤ 1250 K temperatur intervalında müxtəlif qamma şüalanma dozalarında B₄C oksidləşmə dərinliyi.



Şəkil 15. Müxtəlif qamma udulma dozalarında B₄C nümunələrinin aktivləşmə enerjisi.

Yüksək udulma dozalarında oksidləşmə kinetikasının azalması məlum aktiv mərkəzlərin oksigen atomları ilə tam tutulmasıdır. Şüalanmadan sonra bor karbid birləşməsində oksidləşməsi daha çox “qeyri-izotermal oksidləşmə” xarakterlidir [34] və bütün udulma dozadan asılı olmayaraq oksidləşmə reaksiyası tamamlanır. Oksidləşmə kinetikasının temperaturdan, şüalanmanın udulma dozasından və zamandan asılılıqlarından alınan qiymətlər göstərir ki, əsas oksid təbəqəsi səth xarakterlidir. B₂O₃ oksid təbəqəsinin dərinliyi şüalanmanın udulma dozasından asılı olaraq ikili mexanizm üzrə baş verir. Şüalanmamış B₄C nümunəsində B₂O₃

oksid təbəqəsinin dərinliyi 60 nm ətrafında dəyişir (şəkil 14). Numunələrdə qamma şüalanmanın udulma dozasının artması ilə oksid təbəqəsinin dərinliyi azalır.

Şəkil 15-də aktivləşmə enerjisinin şüalanmanın udulma dozasından asılılığı bir daha yuxarıda qeyd olunan eksperimental nəticələri təsdiq edir. Müxtəlif udulma dozalarında yerinə yetirilmiş eksperimentlər üçün oksidləşmə dərəcəsi ilə aktivləşmə enerjisi arasında uyğunluq yaradılmışdır.

Şəkil 15-də temperatur və aktivləşmə enerjisinin qiyməti şüalanmanın udulma dozasından asılı olaraq artır. Oksid təbəqəsinin dərinliyi yüksək udulma do-

zalarında aktiv mərkəzlər tərəfindən oksigen atomlarının tutulmasından və oksidləşmə reaksiyasından asılıdır. Mürəkkəb mexanizimlə baş verən oksidləşmə reaksiyasında oksid təbəqəsinin aktivləşmə enerjisinin qiyməti bütün udulma dozalarında bir birinə yaxındır.

4. NƏTİCƏ

Yüksək təmizlik dərəcəsinə malik B₄C, BN, B₆Si və B₂O₃ birləşmələri enerjisi $E < 1$ MeV olan sürətli neytronlarla otaq temperaturunda $4.0 \times 10^{12} \text{n}/(\text{sm}^2 \times \text{san})$, $8.0 \times 10^{12} \text{n}/(\text{sm}^2 \times \text{san})$, $1.37 \times 10^{13} \text{n}/(\text{sm}^2 \times \text{san})$, $4.0 \times 10^{14} \text{n}/(\text{sm}^2 \times \text{san})$ və $1.0 \times 10^{15} \text{n}/(\text{sm}^2 \times \text{san})$ intensivliklərdə, 2.5 MeV enerjili xətti elektron sürətləndiricidə

$4.16 \times 10^{16} \text{1}/\text{sm}^2$, $1.20 \times 10^{17} \text{1}/\text{sm}^2$ və $1.03 \times 10^{18} \text{1}/\text{sm}^2$ intensivliklərdə və 167 MeV/u enerjili ¹³²Xe ionları ilə $5.0 \times 10^{12} \text{ion}/\text{sm}^2$, $5.0 \times 10^{13} \text{ion}/\text{sm}^2$ və $3.83 \times 10^{14} \text{ion}/\text{sm}^2$ intensivlikdə şüalandırılmışdır. Həmçinin, 1.17 MeV və 1.33 MeV enerjili xəttinə malik ⁶⁰Co mənbəyi ilə 9.7 kQr, 48.5 kQr, 97 kQr, 145.5 kQr və 194 kQr udulma dozalarında şüalandırılması yerinə yetirilmişdir. Termofiziki tədqiqatlardan müəyyən olunmuşdur ki, şüalanmış nümunələrin strukturunda defektlər formalaşır. Temperaturdan asılı olaraq B₄C və B₆Si nümunələrinin səthində B₂O₃ və SiO₂ oksid təbəqəsinin qalınlığı 60 nm və istilik tutumunun kinetikasi müəyyən olunmuşdur.

- [1] R.A. Andrievski. Russian Chemical Reviews, 2012, v.81, pp.549-559.
- [2] Y. Ben-Galim, U. Wengrowicz, A. Raveh, I. Orion. Gamma scintillator system using boron carbide for neutron detection/ Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2014, v.756, pp.62-67.
- [3] S. Chakraborty, D. Debnath, A.R. Mallick, P.K.Das. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2015, v.12, pp.568-576.
- [4] S. Chakraborty, D. Debnath, A.R. Mallick, R.K.Gupta, A. Ranjan, P.K. Das, D. Ghosh. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015, v.52, pp. 176-182.
- [5] L.T. Christopher et al. Journal of Physical Chemistry C, 2015, v.119, pp.13807-13813.
- [6] P. Chaudhari, A. Singh, A. Topkar, R. Dusane. Fabrication and characterization of silicon based thermal neutron detector with hot wire chemical vapor deposited boron carbide converter. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, v.779, pp.33-38.
- [7] H.K. Clark, J.L. Hoard. Journal of American Chemical Society, 1943, v.65, pp.2115-2119.
- [8] H.A.A. Abdelbagi, V.A.Skuratov, S.V.Motloun, E.G. Njoroje, M. Mlambo, T.T. Hlatshwayo, J.B.Malherbe. Effect of swift heavy ions irradiation on the migration behavior of strontium implanted into polycrystalline SiC. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2019, v.451, pp.113-121.
- [9] Mannab Tashmetov, Bekhzodjon Abdurakhimov, Matlab N. Mirzayev and To Xuan Thang. The effect of electron beam to nanocrystallites size, strain and structural parameters of the silicon carbide nanopowder, International Journal of Modern Physics B, 2019, vol. 33, No. 20, 1950223.
- [10] M.N. Mirzayev. Radiation Physics and Chemistry, 2021, v.180, pp.109244
- [11] M.N. Mirzayev. Simultaneous measurements of heat flow rate and thermal properties of nano boron trioxide under neutron irradiation at the low and high temperature. Vacuum, 2020, v.173, pp.109162.
- [12] M.N. Mirzayev. International Journal of Modern Physics B, 2020, v.34, pp.2050160.
- [13] M.N. Mirzayev, B.A. Abdurakhimov, E. Demir, A.A. Donkov, E. Popov, M. Yu. Tashmetov, I.G. Genov, T.T. Thabethe, K. Siemek, K. Krezhov, F. Mamedov, D.M. Mirzayeva, M.V. Bulavin, V.A. Turchenko, T.X. Thang, T.Z. Abdurakhmonov, P. Horodek. Physica B: Condensed Matter, 611, 2021, 412842.
- [14] M.N. Mirzayev, E. Popov, E. Demir, B. Abdurakhimov, D.M. Mirzayeva, V.N. Tiep, G.I. Georgiev, A.K. Mutali, M.B. Mamatova. Thermophysical behavior of nano boron trioxide under high intense electron beam irradiation. Advanced Physical Research, 2019, v.1, pp.63-69.
- [15] M.N. Mirzayev. Study thermodynamic assessment of the B-C and B-Si binary systems with swift heavy ions and high intense electron beam irradiation at the low temperature. Modern Physics Letters B, 2020, v.34, pp.2050395.
- [16] M.N. Mirzayev, B.A. Abdurakhimov, S.H.Jabarov, M.Yu. Tashmetov, E. Demir, N.V. Tiep, N.A. Ismayilova, Y.I. Aliyev, E. Popov, D.M. Mirzayeva, S.I. Karaaslan, G.I. Georgiev. International Journal of Modern Physics B, 2020, v.34, pp.2050008.
- [17] M.N. Mirzayev, E. Popov, E. Demir, B.A. Abdurakhimov, D.M. Mirzayeva, V.A. Skuratov, A.K. Mutali, V.N. Tiep, S. Biira, M.Yu. Tashmetov, K. Olejniczak, O. Kristavchuk. Journal of Alloys and Compounds, 2020, v.834, pp.155119.
- [18] M.N. Mirzayev, Kh. Mammadov, R.N. Mehdiyeva, R.G. Garibov, B.A. Skuratov, N.V. Tiep, E.B. Askerov, E. Demir, A.B. Tugrul, S.H. Jabarov. Journal of Radiation Researches, 2018, No2, 5, pp.173-178.
- [19] Ertuğrul Demir, Matlab N. Mirzayev, A. Beril Tugrul, Yury M. Gledenov, Vitali A. Turchenko, Ozan Yilmaz, Bülent Büyük and M. Lütfi Öveçoğlu. Investigations on surface morphologies, microstructure and thermal properties of tungsten-based composites, Modern Physics Letters B 33(19):1950216, 2019.

- [20] *M.N.Mirzayev, S.H.Jabarov, E.B.Asgerov, R.N.Mehdiyeva, T.T.Thabethe, S.Biira, N.V.Tiep.* Crystal structure changes and weight kinetics of silicon-hexaboride under gamma irradiation dose, *Results in Physics*. vol. 10, 2018, pp 541-545.
- [21] *M.N.Mirzayev, Kh.F.Mammadov, R.G.Garibov, E.B.Askerov.* Thermophysical properties of boron carbide irradiated by ionizing radiation, *High Temperature*, 2018, vol. 56, Issue 3, pp 374–377.
- [22] *F.G. Agayev, S.H. Jabarov, G.Sh. Ayyubova, M.N.Mirzayev, S.V. Trukhanov, E.L. Trukhanova, M.A. Darwish, S.V. Podgornaya, D.A Vinnik, T.P.Hoang, N.T. Dang, A.V. Trukhanov.* Structure and thermal properties of $BaFe_{11.1}In_{0.9}O_{19}$ hexaferrite, *Physica B: Condensed Matter*, 580, 2020, 411772.
- [23] *M.N.Mirzayev, R.N.Mehdiyeva, R.G.Garibov, N.A.Ismayilova, S.H. Jabarov.* Influence of gamma irradiation on the surface morphology, XRD and thermophysical properties of silicide hexaboride, *Modern Physics Letters B*, vol. 32, No. 14, 1850151, 2018.
- [24] *M.N. Mirzayev, R.N. Mehdiyeva, Kh.F.Mammadov, S.H.Jabarov, E.B.Asgerov.* *Physics of Particles and Nuclei Letters (Physics of Solid State and Condensed Matter)*, 2018, vol. 15, №. 6, pp. 673–677.
- [25] *R.F. Hashimov, F.A. Mikailzade, S.V.Trukhanov, N.M. Lyadov, I.R. Vakhitov, A.V. Trukhanov, M.N. Mirzayev.* Structure and thermal analysis of $Ba_{0.5}La_{0.5}MnO_3$ polycrystalline powder, *International Journal of Modern Physics B*, vol. 33, 2019, 1950244.
- [26] *M.N.Mirzayev, S.H.Jabarov, E.B.Asgerov, R.N.Mehdiyeva, T.T.Thabethe, S.Biira, N.V.Tiep.* X-ray diffraction and thermodynamics kinetics of SiB_6 under gamma irradiation dose, *Silicon*, 11 (5), 2499-2504.
- [27] *Matlab N. Mirzayev.* Oxidation kinetics of boron carbide ceramic under high gamma irradiation dose in the high temperature, *Ceramics International*, 2020, 46 (3), 2816-2822.
- [28] *M.N.Mirzayev, Kh.F.Mammadov, V.A.Skuratov, E. Demir, S.H. Jabarov, N.A. Ismayilova, S. Biira, B. Abdurakhimov, E. Popov.* *Journal of Alloys and Compounds*, volume 801, 2019, p. 151-157.
- [29] *E.P. Popov, A.N. Chernikov, A.I. Beskrovnyi, J. Waliszewski, M.N. Mirzayev.* *Journal of Physics: Conference Series* 1492 (1), 012054, 2020.
- [30] *Matlab Mirzayev, Ertugrul Demir, Khagani Mammadov, Ravan Mehdiyeva, Sakin Jabarov, A. Beril Tugrul, Saphina Biira, Nguyen Tiep, Thabsile Thabethe.* Thermodynamics kinetics of boron carbide under gamma irradiation dose, *International Journal of Modern Physics B*, 2019, vol. 33, No. 9, 1950073.
- [31] *M.N. Mirzayev, R.N. Mehdiyeva, S.Z. Melikova, S.H. Jabarov, T.T. Thabethe, S. Biira, M.A.Kurbanov, N.V. Tiep.* Formation of Color Centers and Concentration of Defects in Boron Carbide Irradiated at Low Gamma Radiation Doses, *Journal of the Korean Physical Society*, 2019, vol. 74, No. 4, pp. 363-367.
- [32] *F. Cataldo, S. Iglesias-Groth.* Neutron damage of hexagonal boron nitride. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2017, v.313, pp.261-271.
- [33] *E. Demir, M.N. Mirzayev, A.B. Tugrul, B.A.Abdurakhimov.* An experimental study on microstructure of tungsten alloys. *Surface Review and Letters*, 2020, v.27, pp.1950169.
- [34] *E. Demir, Y.M. Gledenov, A.B. Tuğrul, M.N.Mirzayev, V.A. Turchenko, O. Yilmaz, B. Büyük, E. Sansarbayar, M.L. Öveçoğlu.* Investigations on microstructure and thermal properties of tungsten-based composites. *Modern Physics Letters B*, 2019, v.33(19), pp.1950216.
- [35] *T. Mori, T. Nishimura.* Thermoelectric properties of homologous p- and n-type boron-rich borides. *Journal of Solid State Chemistry*, 2006, v.179, pp.2908-2915.
- [36] *A. Jay, D.O. Hardouin, J. Sjakste, N. Vast.* Theoretical phase diagram of boron carbide from ambient to high pressure and temperature. *Journal of Applied Physics*, 2019, v.125, pp.185902.
- [37] *E. Demir, M.N. Mirzayev, E.P. Popov, P. Horodek, I.G. Genov, K. Siemek, D.M. Mirzayeva, V.A. Turchenko, M. Bulavin, A.I. Beskrovnyi, A.H. Valizade, H.V. Akhundzada, S.I. Karaaslan,* Effects of high-energetic $^3He^+$ ion irradiation on tungsten-based composites, *Vacuum*, 184, 2021, 109934.
- [38] *Y.I. Aliyev, P.R. Khalilzade, Y.G. Asadov, T.M. Ilyasli, F.M. Mammadov, N.A. Ismayilova, M.N. Mirzayev, S.H. Jabarov, N.T. Dang,* Behavior of thermal properties of $AgCu_{1-x}Fe_xS$ compounds under non-isothermal conditions, *International Journal of Modern Physics B*, 33 (28), 1950339, 2020.
- [39] *V.A. Abdurahmanova, N.M. Abdullaev, Sh.S. Ismayilov, M.N. Mirzayev,* The thermal properties of $SnSe$ and $Sm_{1-x}Ce_xSnSe_2$ ($x= 0.02-0.5$) compounds, *International Journal of Modern Physics B*, 34 (18), 2020, 2050167.
- [40] *Y.I. Aliyev, Y.G. Asadov, T.M. Ilyasli, F.M. Mammadov, T.G. Naghiyev, Z.A. Ismayilova, M.N. Mirzayev, S.H. Jabarov.* Structural aspects of thermal properties of $AgCuS$ compound, *Modern Physics Letters B*, 34 (05), 2020, 2050066.
- [41] *S.R. Azimova, N.M. Abdullayev, Y.I. Aliyev, M.N. Mirzayev, V.A. Skuratov, A.K. Mutali, S.H.Jabarov.* Study on the Thermodynamic Behavior of Sb-Te Binary Systems with Swift Heavy-Ions Irradiation at the High Temperatures, *Journal of the Korean Physical Society*, 77 (3), 240-246, 2020.

O.A. SƏMƏDOV, M.N. MİRZƏYEV

O.A. Samedov, M.N. Mirzayev

DEFECT FORMATION MECHANISM AND THERMOPHYSICAL EFFECT IN THE BINARY BORON COMPOUNDS UNDER SWIFT HEAVY ION, NEUTRON, ELECTRON AND GAMMA IRRADIATION

In the presented work, the mechanism of recombination of defects under the influence of different types of irradiations in the binary boron compounds in the temperature range $T = 300-1200\text{K}$ and the kinetics of the heat flux function depending on the temperature were determined. The formation of an oxide layer on the surface of B_4C and B_6Si compounds at high temperatures and the degradation of surface morphology in boron compounds under the influence of swift heavy ion flux were studied.

O.A. Самедов, М.Н. Мирзаев

МЕХАНИЗМ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В БИНАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ БОРА ПРИ БЫСТРОМ ТЯЖЕЛОМ ИОННОМ, НЕЙТРОННОМ, ЭЛЕКТРОННОМ И ГАММА-ОБЛУЧЕНИИ

В представленной работе определены механизм рекомбинации дефектов под действием различных видов облучения в бинарных соединениях бора в интервале температур $T = 300-1200\text{K}$ и кинетика функции теплового потока в зависимости от температуры. Исследовано образование оксидного слоя на поверхности соединений B_4C и B_6Si при высоких температурах и деградация морфологии поверхности в соединениях бора под действием потока быстрых тяжелых ионов.

Qəbul olunma tarixi: 25.01.2022