

**AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI**

*Əlyazması hüququnda*

**BOR ƏSASLI BİRLƏŞMƏLƏRİN STRUKTUR  
ÇEVİRİLMƏLƏRİNƏ VƏ TERMOFİZİKİ XASSƏLƏRİNƏ  
AĞIR İON, NEYTRON VƏ İONLAŞDIRICI ŞÜALARIN  
TƏSİRİ**

**İxtisas: 2225.01-Radiasiya materialşünaslığı**

**Elm sahəsi: Fizika**

**İddiaçı: Mətləb Nəbi oğlu Mirzəyev**

Elmlər doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün təqdim edilmiş  
dissertasiyanın

**AVTOREFERATI**

**BAKI-2022**

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

**Elmi məsləhətçi:** AMEA-nın müxbir üzvü, professor  
**Oqtay Əbil oğlu Səmədov**

**Rəsmi opponentlər:** AMEA-nın müxbir üzvü, professor  
**Oqtay Kazım oğlu Qasimov**

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

Fizika elmləri doktoru, professor  
**Rauf Mədət oğlu Sərdarlı**

Fizika elmləri doktoru, dosent  
**Rəfiqə Zabil qızı Mehdiyeva**

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının AMEA-nın Radiasiya Problemləri İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən **BED 1.21** saylı Dissertasiya Şurası

Dissertasiya şurasının sədri:

\_\_\_\_\_ Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor  
**Rəhim Səlim oğlu Mədətov**

Dissertasiya şurasının elmi katibi:

\_\_\_\_\_ Fizika üzrə fəlsəfə doktoru  
**Müslüm Əhməd oğlu Məmmədov**

Elmi seminarın sədri:

\_\_\_\_\_ Fizika elmləri doktoru, dosent  
**Mətanət Əhməd qızı Mehrabova**

## İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

**Mövzunun aktuallığı.** Radiasiya materilaşınalığının prioritet istiqaməti kristallik strukturda formalaşan radiasiya defektlərinin araşdırılması, müxtəlif növ hissəciklərlə daşınan kinetik enerjinin kristal quruluşa ötürülməsi, enerjinin strukturun həcmi boyu paylanma kinetikasının öyrənilməsi və baş verən prosesləri ümumi hadisələr fonunda tədqiq olunmasına əsaslanmışdır. Radiasiya proseslərinin təməl prinsipləri hadisələrin zəncirvari ardıcılıqlarına əsaslanır. Hadisələrin eyni zamanda baş vermə ehtimalı sönmüş prosesin xarici təsirlər vasitəsi ilə yeni mexanizmə keçməsi ilə təhlil olunur. Yüksək enerjili hissəciklərin kristallik quruluşa yerləşən atomlarla qarşılıqlı təsiri, kinetik enerjinin kristallik qəfəsin düyünlərində yerləşən atomlara ötürülməsi, ilk təsirə məruz qalmış atomlar kaskadının yaranması, kristallik strukturda atomların koordinat və istiqamət yerdəyişməsi, vakansiyaların, atomlararası düyünlərin, nöqtəvi defektlərin formalaşması və atomlararası yaxın və uzaq nizamlılığın pozulması kimi mürəkkəb mexanizimlə gedən proseslərin kinetikasından asılıdır.

Nüvə reaktorlarında neytron uducuların, optik qurğuların əsas elementlərini, həmçinin müxtəlif enerjili neytron və qamma şüaların qeyd edilməsi üçün detektorlar hazırlanmasında bor əsaslı materiallar geniş istifadə olunmaqdadır. Borlu birləşmələr üçün sadalanan bütün üstün xüsusiyyətlər və son illərdə çap olunan tədqiqat işlərindən alınan elmi nəticələrə əsaslanaraq dissertasiya işinin mövzusu dörd əsas kristal ( $B_4C$ ,  $BN$ ,  $B_6Si$  və  $B_2O_3$ ) üzərində qurulmuşdur. Tədqiqat işində geniş araşdırılmış bor karbid ( $B_4C$ ) kristalının dayanıqlı kimyəvi, fiziki və mexaniki xüsusiyyətlərə görə müasir nüvə texnologiyalarında geniş tətbiq olunmaqdadır. Termofiziki xassələrin kinetikasına görə bor karbid yüksək temperaturlarda dayanıqlı materiallardan hesab olunur. Unikal kristallik quruluşa malik olan bor karbid (kiçik sıxlıqda  $2.52 \text{ q/sm}^3$  yüksək mexaniki dayanıqlılıq) nüvə reaktorlarında “yanacaq materiallarının kinetikasını idarə edən “çubuqlar” kimi geniş istifadə olunur.  $B_4C$  müxtəlif aqressiv mühitlərdə yüksək kimyəvi aşınmaya dayanıqlı və hərbi sənayedə qoruyucu təbəqələrin hazırlanmasında

istifadə olunmaqdadır. BN və  $B_6Si$  kristalları neytron və qamma şüaların qeyd olunması və yüksək oksidləşməyə davamlı olduğunu nəzərə alaraq geniş temperatur intervalında effektiv detektor materialı kimi istifadəsi böyük maraq doğurmuşdur. Bor nitrid birləşməsinin SiC, ZrB, AlN keramik birləşmələrlə əmələ gətirdiyi kompozit birləşmələrin termofiziki xassələrinin (istilik tutumu, istilik keçiriciliyi, termodiffuziya əmsalı) yüksək olması onun tətbiq sahəsini daha da genişləndirir. Məsaməli quruluş strukturu formalaşdıran bor nitridin bor karbidlə əmələ gətirdiyi kompozit materialların oksidləşmə müqaviməti saf bor karbid nümunəsi ilə müqayisədə on dəfə çoxdur. Sadalanan kristalların mikrostruktur quruluşu və xassələri mühəndis tələbləri üçün olduqca əlverişlidir. Həmçinin qamma şüaları heksaqonal bor nitrid strukturunda kubik BN faza izlərinin yaratmasına, kristal quruluşun hibridləşmə formasını dəyişməsinə və yüksək temperaturalarda mürəkkəb termodinamik mexanizminin formalaşmasını yaradır. Bor silikat nümunəsinin kristal quruluşda vakansiyaların, sərbəst bor və silisium atomlarının yerdəyişmələrinin aktivləşmə enerjisi, Gibbs enerjisi, entalpiya və entropiyası mürəkkəb qanuna uyğunluqla dəyişməsi kristalların geniş temperatur intervalında istifadəsinə zəmin yaratmışdır.

Tədqiqat obyektlərindən olan  $Cmc2$  fəza quruluşlu  $B_2O_3$  kristalının nüvə texnologiyasında, günəş enerjisinin emal olunmasında, elektronik qurğularda və akustik-optik cihazlarda tətbiq sahələri mövcuddur. Bor oksid birləşməsinin üstün optik xüsusiyyətləri və baza matrisası kimi  $SiO_2$  və Si ilə əmələ gətirdiyi mürəkkəb kompozit birləşmələrin optik xassələrində və siqnalın ötürülmə effektivliyində yüksək nəticələr əldə olunmaqdadır. İonlaşdırıcı şüaların fokuslanması prosesində nano bor oksid hissəciklərindən və yüksək ötürmə xassəsinə malik optik liflərin hazırlanmasında geniş istifadə olunmaqdadır.  $B_2O_3$  kristalları bor silikatlarla müxtəlif molyar konsentrasiyalarda yartdığı birləşmələr yüksək refraktiv indeksə və aşağı dağılma xüsusiyyətlərinə malik optik linzalar üçün geniş istifadə edilməkdədir. Optik parametrlərin, yüksək intensivlikli neytron seli ilə şüalanma şəraitində bor oksid birləşmələrinin yeni funksional qrupları haqqında məlumat verən bir

sıra araşdırmalar göstərir ki, temperaturun təsiri altında termodinamik xassələrin dəyişməsinin öyrənilməsinə böyük ehtiyac yaranmışdır. Bütün aspektləri və qarşıya qoyulan problemlərin həll edilməsi üçün borlu birləşmələrdə temperaturdan asılı olaraq baş verən keçidlərin eksperimental tədqiqinin aparılması, müxtəlif şüalanmaların təsiri altında termofiziki effektlərin mexanizmini aydınlaşdırılmaq tədqiqat işinin əsas tərkib hissəsini təşkil edir.

Tədqiqat işinin orijinallığı ondan ibarətdir ki, seçilmiş obyektlər üzərində fərqli şüalanmanın (müxtəlif sel sıxlıqlarında və dəyişən enerjilərdə) təsirlərindən sonra kiçik və yüksək temperaturalarda termofiziki kinetikanın müqayisəli təhlili yerinə yetirilmiş və fəsilər üzrə fərqli şüalanmaların təsiri altında model struktur eksperimentləri yerinə yetirilmişdir.

**Dissertasiya işinin məqsədi** – sürətli neytronlar, yüksək enerjili ağır ionlar, elektron seli və qamma şüalarının təsiri altında bor əsaslı kristallarda baş verən struktur çevrilmələri, istilik funksiyasının dəyişmə mexanizmi, termodinamik funksiyalar, oksidləşmə kinetikasi və riyazi modelləşdirilmənin tədqiq edilməsindən ibarətdir.

**Tədqiqat işində göstərilmiş məqsədlərə nail olmaq üçün aşağıdakı məsələlərin həlli qarşıya qoyulmuşdur:**

1. Yüksək təmizlik dərəcəsinə malik tədqiqat materiallarının əldə edilməsi (US Research Nanomaterial, Inc., TX, USA və Sky Spring Nanomaterials, USA, Sigma–Aldrich);
2. Tədqiqat kristallarının struktur analizlərin yerinə yetirilməsi;
3. Enerjisi  $E < 1$  MeV olan sürətli neytronlarla kristalları otaq temperaturunda  $4.0 \times 10^{12}$  n/sm<sup>2</sup>,  $8.0 \times 10^{12}$  n/sm<sup>2</sup>,  $1.37 \times 10^{13}$  n/sm<sup>2</sup>,  $4.0 \times 10^{14}$  n/sm<sup>2</sup> və  $1.0 \times 10^{15}$  n/sm<sup>2</sup> sel sıxlığında şüalandırılması;
4. 2.5 MeV enerjili xətti elektron sürətləndiricidə  $4.16 \times 10^{16}$  sm<sup>2</sup>,  $1.20 \times 10^{17}$  sm<sup>2</sup> və  $1.03 \times 10^{18}$  sm<sup>2</sup> sel sıxlığında şüalandırılması;
5. 167 MeV enerjili <sup>132</sup>Xe<sup>26+</sup> ionları ilə  $5.0 \times 10^{12}$  ion/sm<sup>2</sup>,  $5.0 \times 10^{13}$  ion/sm<sup>2</sup> və  $3.83 \times 10^{14}$  ion/sm<sup>2</sup> sel sıxlığında şüalandırılması;
6. 1.17 MeV və 1.33 MeV enerji xəttinə malik <sup>60</sup>Co mənbəyi ilə 9.7 kQr, 48.5 kQr, 97 kQr, 145.5 kQr və 194 kQr udulma dozalarında şüalandırılması;
7. Şüalandırılmış kristalların quruluş analizinin yerinə yetirilməsi;

8. B<sub>4</sub>C, BN, B<sub>6</sub>Si və B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kristallarının Raman və İQ spektroskopik metodlarla öyrənilməsi;
9. Tədqiqat kristallarının sürətli ağır ionlarla şüalanmadan sonra atom qüvvə mikroskopu ilə səth morfolojiyasının analizi;
10. 167 MeV enerjili <sup>132</sup>Xe<sup>26+</sup> ionları ilə şüalandırılmış B<sub>4</sub>C, BN, B<sub>6</sub>Si və B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kristallarının “SRIM-kod” analizi;
11. 167 MeV enerjili <sup>132</sup>Xe<sup>26+</sup> ionları ilə şüalandırılmış B<sub>4</sub>C və BN, kristallarının molekulyar dinamikasının nəzəri əsaslarının öyrənilməsi;
12. B<sub>4</sub>C, BN, B<sub>6</sub>Si və B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kristallarının neytron, elektron, sürətli ağır ion seli və qamma şüaların təsiri altında baş verən termofiziki effektlərinin tədqiqi;

### **Tədqiqat obyektləri;**

1. Təmizlik dərəcəsi 99.9 %, xüsusi səth sahəsi 28 m<sup>2</sup>/q, hissəciklərin ölçüsü 1-3 mkm, toz halında sıxlığı 1.8 q/sm<sup>3</sup> olan romboedrik fəza quruluşlu (r-B<sub>4</sub>C) bor karbid mikro kristalları
2. Təmizlik dərəcəsi 99.8%, xüsusi səth sahəsi 76-120 m<sup>2</sup>/q, hissəciklərin ölçüsü 3-8 mkm, toz halında sıxlığı 2.29 q/sm<sup>3</sup> olan heksaqonal fəza quruluşlu (h-BN) bor nitrid mikro kristalları
3. Təmizlik dərəcəsi 99.5 %, xüsusi səth sahəsi 68 m<sup>2</sup>/q, hissəciklərin ölçüsü 40 mkm, toz halında sıxlığı 2.43 q/sm<sup>3</sup> olan heksaqonal fəza quruluşlu (h-B<sub>6</sub>Si) bor silikat mikro kristalları
4. Təmizlik dərəcəsi 99.99 %, xüsusi səth sahəsi 32 m<sup>2</sup>/q, hissəciklərin ölçüsü 80 nm, toz halında sıxlığı 2.6 q/sm<sup>3</sup> olan tetraqonal fəza quruluşlu (t-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) bor oksid nano kristalları

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

1. Sürətli neytronlarla nano bor oksid təbəqəsi üzərində zəyif kimyəvi qarşılıqlı təsirdə olan su molekullarının parçalanma mexanizminin əsasları verilmişdir.
2. Sürətli neytron selinin təsiri altında nano B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kristallarında kristallik ölçüsünün dəyişməsi müəyyən olunmuşdur.
3. Nano B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kristallarında fərqli sel sıxlıqlarında sürətli neytronlarla baş verən termik keçidlərin mexanizmi müəyyən olunmuşdur.
4. Bor nitrid mikro kristallarında 300≤T≤1300 K temperatur

intervalında sürətli neytronların təsiri altında Viqner enerjisinin kinetikasi öyrənilmişdir.

5. Yüksək enerjili elektron selinin təsiri altında bor karbid kristalının qəfəs parametirlərinin dəyişmə qanunauyğunluqları tədqiq olunmuşdur.

6.  $100 \leq T \leq 300K$  temperatur intervalında elektron selinin təsiri ilə  $B_4C$  və  $B_6Si$  kristallarında istilik keçiriciliyinin və termodiffuziyanın dəyişməsi tədqiq olunmuşdur.

7. 167 MeV enerjili sürətli  $^{132}Xe$  ionları ilə şüalandırılmış kristalların səth morfologiyasında qabarmaların paylanma dinamikası öyrənilmişdir.

8. Sürətli ağır ionların təsiri altında kristallarda struktur defektlərin riyazi əsaslarla molekulyar dinamikası hazırlanmışdır.

9. 167 MeV enerjili sürətli ağır  $^{132}Xe$  ionları ilə şüalandırılmış  $B_4C$ , BN,  $B_6Si$  və  $B_2O_3$  kristallarının  $300 \leq T \leq 1300K$  temperatur intervalında termodinamik funksiyaların dəyişmə kinetikasi müəyyən olunmuşdur.

10.  $B_4C$  kristalında qamma şüaların təsiri altında formalaşan rəng mərkəzlərin təbiəti öyrənilmişdir.

11. Qamma şüalanmanın təsiri altında  $B_4C$  və  $B_6Si$  kristallarında oksidləşmə mexanizmin kinetikasi və oksid təbəqəsinin dərinliyi müəyyən olunmuşdur.

12. Qamma şüalanmanın təsiri altında kristallarda element xəritələnmə, amorflaşma mexanizmi, atomlar arası məsafə və struktur parametirlərinin dəyişməsi təyin olunmuşdur.

**İşin praktiki əhmiyyəti:** Dissertasiya işinin praktik əhəmiyyəti ondan ibarətdir ki, bor kimyəvi elementinin keramik və oksid kristalları fərqli enerjili, dəyişən sel sıxlığına malik şüalanma metodları ilə termofiziki xassələri, səth morfologiyasının dinamikası, struktur analizləri və optik xassələrinin tədqiqi müqayisəli şəkildə həyata keçirilmişdir. Yerinə yetirilən tədqiqat işində müxtəlif şüalanmaların təsiri ilə aparılan təcrübələrdən (Raman və İQ spektroskopik, Atom Qüvvə Mikroskopu, Skanedic Elektron Mikroskopdan) aydın olur ki, bor birləşmələri göstərilmiş şüalanma növlərinin təsiri altında kifayət qədər radiasiyaya davamlı və praktik

olaraq prespektivlidir.

Dissertasiya işində qarşıya qoyulan məsələlərin həlli zamanı müəyyən olunmuşdur ki, temperaturdan asılı olaraq fərqli şüalanma şərtlərində B<sub>4</sub>C, BN və B<sub>6</sub>Si kristallarının səth deqredasiyasının dəyişmə mexanizmi zəif xarakterlidir. Geniş temperatur intervalından asılı olaraq borun keramik kristallarında oksidləşmə kinetikasi və oksid təbəqəsinin qalınlığı üçün dəqiq termofiziki şərtlər müəyyən olunmuşdur. Təyin olunmuş bütün termofiziki parametrlərə əsasən kristalların praktik temperatur intervalında işləmə qabiliyyəti, faydalı iş əmsalı və modernizasiya dövrünün dəqiq tarixinin öncədən söyləməyə imkan verir. Alınan nəticələr nüvə texnologiyalarında əlavə şüalanma şərtləri daxilində oksidləşmə mexanizmi, bor əsaslı detektor və uducu materialların istismar müddəti haqqında öncədən məlumat verməyə əsas yaradır.

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

1. Tədqiqat kristallarında struktur defektlərinin təbiəti və defekt əmələgəlməyi müxtəlif metodlarla öyrənilməsi;
2. Müxtəlif şüalanma şərtlərində kiçik temperaturlarda termofiziki parametrlərin dəyişmə qanunauyğunluqları;
3. Kristallik ölçünün şüalanma təsirləri altında dəyişməsi;
4. Vigner enerjisinin təbiəti və temperaturdan asılılığı kinetikasi;
5. Sürətli ağır ionlarla şüalanma zamanı səth morfologiyasında "qabarmalar"ın mexanizminin öyrənilməsi;
6. Defektlərin riyazi əsaslarla molekulyar dinamikası;
7. Qamma şüaların təsir altında formalaşan rəng mərkəzlərin təbiətinin öyrənilməsi;
8. Qamma şüaların təsir altında yüksək temperaturlarda oksidləşmə mexanizmi və oksid təbəqəsinin qalınlığı;
9. Şüalanmanın təsiri altında amorflaşma mexanizminin dəyişməsi;

#### **İşin aprobasiyası:**

Dissertasiya işi ayrı-ayrı materialları üzrə beynəlxalq və ölkədaxili konfranslarda məruzə və müzakirə edilmişdir.

1. M.N. Mirzayev, B.A. Skuratov, E. Demir, N.V. Tiep, E.B. Asgerov, S.H. Jabarov, Kh.F.Mammadov, R.N. Mehdiyeva, A.B. Tuğrul, R.G. Garibov, Study of atom dynamics of the (SS GRADE

321)+ $B_4C+Al_2O_3$  compounds under heavy ion irradiation, Radiation Processes and Their Applications, Baku, Azerbaijan, 13-15 November 2018.

2. M.N. Mirzayev, Kh.F. Mammadov, R.N. Mehdiyeva, S.H. Jabarov, E.B. Asgerov, S.M. Akberova, Changes crystal structure of silicon hexaboride irradiated under gamma ray, 18th International Conference on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, EFRE – 2018, September 16-22, Tomsk, Russia, 2018. p.528.

3. M.N. Mirzayev, Kh.F. Mammadov, R.N. Mehdiyeva, Microstructural, macroscopic length and lattice parameters changes in gamma-irradiated boron carbide. Modern Trends in Condensed Matter Physics, MTCMP – 2018, September 24-26, Baku, Azerbaijan, 2018, p.118.

4. M.N. Mirzayev, E. Demir, D.M. Mirzayeva, B. Abdurakhimov, Assessment of oxidation kinetics of boron carbide under gamma irradiation conditions, The Ninth International Conference "Modern Problems of Nuclear Physics and Nuclear Technologies", September 24-27, Tashkent, Uzbekistan, 2019, p. 262.

5. M.N. Mirzayev, Kh.F. Mammadov, D.M. Mirzayeva, V.A. Skuratov, E. Demir, E. Popov, Defects processes and formation of Wigner enthalpy in boron carbide under neutron irradiation, 7th International Conference on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE – 2020, September 14-25, Tomsk, Russia, 2020, p.459.

6. M.N. Mirzayev, E. Popov, A.S. Doroshkevich, E. Demir, F. Mamedov, I.G. Genov, R.N. Mehdiyeva, Z.A. Sharipov, Thermic and electrical analogy of  $B_4C$  and BN under different irradiation, Радиационная Физика Твёрдого Тела, Севастополь, 05-10 июля 2021 г. с.313-315.

7. Kh.F. Mammadov, M.N. Mirzayev, R. Garibov, G. Allahverdiyev, Study of the processes of changing the crystal structure of boron carbide after the destruction of a nuclear reactor as a result of earthquake, Natural disasters and human life safety, 2017, Baku, Azerbaijan

8. A. Dalcalı, I. Koçak, M.N. Mirzayev, E. Demir, V. Uglov, V. Shymanski, B. Büyük, Boron mine and assesment of regional

development (3rd International Regional Development and The Role of Universities Symposium) November 21-22, 2019, Bandırma, Balıkesir, Turkey

9. E.P. Popov, A.N. Chernikov, A.I. Beskrovnyi, J. Waliszewski, M.N. Mirzayev, Cryostat for cooling samples in the study of low-temperature structural and magnetic phase transitions by neutron diffraction, Journal of Physics: Conference Series 1492 (1), 012054, 2020.

10. Demir, M.N. Mirzayev, E. Popov, D.M. Mirzayeva, An experimental study on thermal properties of boron based compounds under ionization irradiation, Second International Scientific Conference of Young Scientists on “Multidisciplinary approaches in solving modern problems of fundamental and applied sciences (Natural sciences), 03–06 March 2020, Baku, Azerbaijan.

11. S. Makatsaria, L. Chkhartishvili, M. Mirzayev, N. Barbakadze, O. Tsagareishvili, I. Jinikashvili, R. Chedia, Nanopowder h-BN:Fe(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) as <sup>10</sup>B delivery agent in BNCT, ISBB2022, the 21st International Symposium on Boron, Borides and related materials related, from 5 to 9 September 2022, Paris, France.

12. N. Gogolidze, L. Chkhartishvili, M. Mirzayev, N. Barbakadze, O. Tsagareishvili, M. Buzariashvili, O. Lekasvili, R.Chedia, Preparation of sandwich-like B<sub>4</sub>C/W neutron-shield materials, ISBB2022, the 21st International Symposium on Boron, Borides and related materials related, from 5 to 9 September 2022, Paris, France.

**Nəşrlər:** Dissertasiya işinin əsas məzmunu dünyanın nüfuzlu elmi jurnallarında nəşr edilmiş 16 məqalə və 8 tezisdə, həmçinin ölkədaxili nəşr edilmiş 5 məqalə və 4 tezisdə öz əksini tapmışdır. Dissertasiya işinin əsas nəticələri 21 məqalə və 12 tezis olmaqla ümumilikdə 33 elmi əsərdə dərc olunmuşdur.

**Dissertasiya işinin quruluşu və həcmi.** Dissertasiya işi giriş, yeddi fəsil, nəticə və ədəbiyyat siyahısından ibarətdir. Təqdim olunan iş 333 səhifə, 145 şəkil və 42 cədvəldən və 413515 işarədən ibarətdir. İstifadə olunmuş ədəbiyyatların sayı müəllifin məqalələri də daxil olmaqla 308 saydadır.

## **DİSSERTASIYA İŞİN QISA MƏZMUNU**

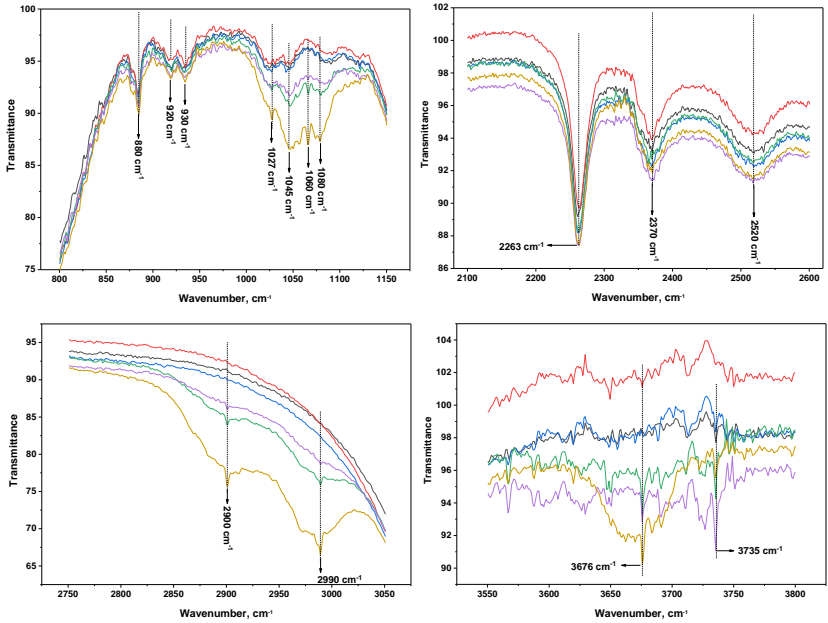
**Giriş** hissəsi dissertasiya işinin əsaslandırılması və aktuallığı, tədqiqat materiallarının çox funksiyalı xüsusiyyətləri, texnoloji olaraq praktik əhmiyyətliyi və müdafiə olunacaq mövzunun əsas müddəalarından ibarətdir.

Dissertasiya işinin **birinci fəslində** borun keramik birləşmələrinin kristallik quruluşu, formalaşma mexanizmi, müxtəlif tərkibli binar və kompozit strukturunun alınması, borun atom konsentrasiyasından asılı olaraq fərqli fəza modifikasiyalarının qısa icmalı və müxtəlif enerjili şüalanma mənbələri ilə aparılan eksperimental təcrübələr, fərqli intensivlikli ionların borlu kristalların atomlarına ötürüdüğü kinetik enerjinin strukturda paylanma qanunauyğunluqları öyrənilmişdir.

Dissertasiya işinin **ikinci fəslində** tədqiqat üçün seçilmiş kristalların nano və mikro halda sıxlığı, təmizlik dərəcəsi, hissəciyin ölçüsü, xüsusi səthin sahəsi, kristal strukturda kütlə nisbətləri, ərimə və buxarlanma temperaturu, kimyəvi sərtliyi və müxtəlif şüalanma metodları haqqında geniş məlumat verilmişdir. Quruluş analizi, fəza quruluşlarının təyini, kristal qəfəsdə atomlar arası məsafənin dəyişməsi, qəfəs parametrləri, səth morfologiyası, səth və həcmdə defektlərin təbiəti, şüalanmadan sonra səthdə formalaşan qabarmalar və amorflaşma mexanizminin öyrənilməsi məqsədi ilə infraqırmızı, Raman spektroskopik, SEM və Atom Qüvvət Mikroskopu analiz metodları haqqında məlumat verilmişdir.

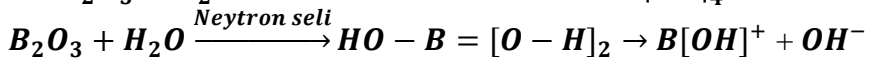
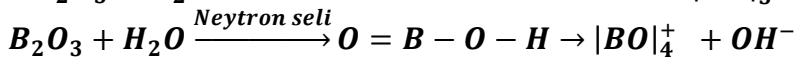
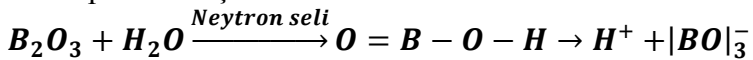
Dissertasiya işinin **üçüncü fəslində**  $B_4C$ ,  $B_6Si$ ,  $BN$  və  $B_2O_3$  kristalları implus rejimdə,  $E < 1$  MeV enerjili, sürətli neytronlarla  $4.0 \times 10^{12}$  n/sm<sup>2</sup>,  $8.0 \times 10^{12}$  n/sm<sup>2</sup>,  $1.37 \times 10^{13}$  n/sm,  $4.0 \times 10^{14}$  n/sm<sup>2</sup>,  $1.0 \times 10^{15}$  n/sm<sup>2</sup> sel sıxlığında şüalanmadan sonra tədqiqat materiallarının atom nüvələri ilə baş verən elastiki və qeyri elastiki qarşılıqlı təsir, defekt əmələgəlmə mexanizmində yüksək neytron selinin qəfəsin düyün nöqtələrində yerləşən atomlarla qarşılıqlı təsir ehtimalı geniş tədqiq edilmişdir. Rentgen struktur analizi ilə tədqiq olunmuş  $B_2O_3$  nano kristalının difraksiya spektri  $Cmc2$  fəza qrupuna,  $a=0.4613$  nm,  $b=0.7803$  nm və  $c=0.4129$  nm qəfəs parametrlərinə malik  $\beta$ - $B_2O_3$  modifikasiyaya uyğundur və müəyyən olunmuşdur ki, nano  $B_2O_3$  kristalında kristallik ölçüsü 90 nm bərabərdir. Şəkil 1-də

nano bor oksid kristalının müxtəlif hissələrdə  $4000 \text{ sm}^{-1}$  tezliyə qədər  $\text{BO}_3$ ,  $\text{BO}_4$ ,  $\text{B}(\text{OH})$  və  $\text{OH}$  qruplarının kiçik və böyük vibrasiya modaları verilmişdir. Böyük vibrasiya qrupuna daxil olan birinci funksional qruplarının  $630 \text{ sm}^{-1}$  və  $700 \text{ sm}^{-1}$  B-O-B modaları  $\text{BO}_3$  borat qruplarının müxtəlif bucaqlar altında əyilmə rəqslərinə, ikinci qrupa daxil olan tezliklər  $880 \text{ sm}^{-1}$ ,  $920 \text{ sm}^{-1}$ ,  $930 \text{ sm}^{-1}$ , və  $1195 \text{ sm}^{-1}$  isə  $\text{BO}_4$ , B-O dartılmış rəqslərinə uyğun gəlir.  $1027 \text{ sm}^{-1}$ ,  $1045 \text{ sm}^{-1}$ ,  $1057 \text{ sm}^{-1}$ ,  $1066 \text{ sm}^{-1}$  və  $1079 \text{ sm}^{-1}$  isə di-borat və tetra borat  $\text{BO}_4$  qrupunun B-O dartılmış rəqslərini xarakterizə edir.  $1253 \text{ sm}^{-1}$  və  $1470 \text{ sm}^{-1}$   $\text{BO}_{\text{sim}}$  B- $\text{O}_{\text{sim}}$  simmetrik dartılmış piro və orto borat qruplarının modaları müşahidə olunmamışdır. Kiçik tezliklərdə  $2263 \text{ sm}^{-1}$ ,  $2369 \text{ sm}^{-1}$ , və  $2519 \text{ sm}^{-1}$  müşahidə olunan funksional qruplar B-(OH) rəqs modaları ilə üst üstə düşür. Neytron şüalanmanın təsiri hərəkət modalarının intensivliyini artırır və yeni  $2900 \text{ sm}^{-1}$ ,  $2989 \text{ sm}^{-1}$ ,  $3676 \text{ sm}^{-1}$ , və  $3735 \text{ sm}^{-1}$  funksional qrupların yaranmasına səbəb olur. Neytron selinin  $1.37 \times 10^{13} \text{ n/sm}^2$  qiymətindən başlayaraq OH funksional qruplarını aydın müşahidə etmək mümkündür. Neytron selinin təsiri altında nümunələrdə elastiki səpilmə, qeyri-elastiki, (n, 2n), (n,  $\gamma$ ) və radiasiya tutulması nəticəsində nano kristal  $\text{B}_2\text{O}_3$  quruluşunda müxtəlif kimyəvi və fiziki çevrilmələr baş verir. Məhz, neytron selinin təsiri ilə nüvələr arasındakı qarşılıqlı təsir prosesi,  $\text{B}^{10}$  izotopu ilə baş verən çevrilmələr və elastiki səpilmə nəticəsində sistemə verilən enerjinin miqdarı xətti artır. Artan enerji miqdarı hidrat və hidroksid qrupunun sərbəst, parçalanmış fazalarını yaradır ki, onları aydın müşahidə etmək olur. Şüalanmanın selindən asılı olaraq yaranan yeni effektlər udulan enerji ilə paralel xəttidir və artır. Neytron şüalanmanın  $1.37 \times 10^{13}$ - $1.0 \times 10^{15} \text{ n/sm}^2$  qiymətlərində hidroksid qrupu kristal quruluşda anion və kation halda qalmaqda davam edir. Tədqiqatlardan məlum olur ki, yüksək kimyəvi aktivliyə malik nano  $\text{B}_2\text{O}_3$  kristalı radiasiyaya davamlı  $[\text{OH}]^-$  hidroksid qrupunu saxlaya bilir.



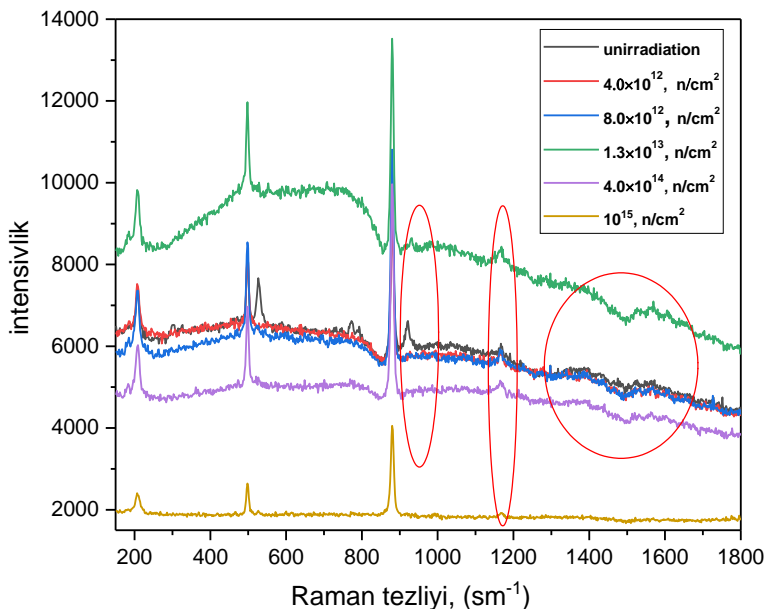
Şəkil 1. İlkin və müxtəlif sel sıxlıqlarında, otaq temperaturunda sürətli neytronlarla şüalanmış nano  $B_2O_3$  kristalinin infraqırmızı spektrləri; (qara-ilkin, qırmızı- $4.0 \times 10^{12}$  n/sm<sup>2</sup>, göy- $8.0 \times 10^{12}$  n/sm<sup>2</sup>, yaşıl- $1.37 \times 10^{13}$ , cəhrayı- $4.0 \times 10^{14}$  n/sm<sup>2</sup> və sarı - $1.0 \times 10^{15}$  n/sm<sup>2</sup>).

Neytronun  $B^{10}$  izotopu ilə qarşılıqlı təsirdən əlavə 2.4 MeV enerjinin ayrılması zamanı neytron selinin enerji itgisi hidrogen nüvəsi və su molekulları üçün maksimum qiymətə çatır. Neytronun enerjisi  $B_2O_3$  quruluşunda formalaşan  $B(OH)_3$  və HOBÖ birləşmələrində hidrogen və su molekullarına aşağıdakı mexanizimlə ötürülür və parçalanma prosesi baş verir.



Yaranmış  $H^+$  atomlarının bəziləri həcmdə neytron selinin təsiri ilə formalaşmış aktiv mərkəzlər tərəfindən tutulur. Digər tərəfdən  $H^+$  atomları kimyəvi rəbitəyə daxil olaraq molekulyar  $H_2$ -ə çevrilir və parçalanma məhsulu kimi ayrılır. Neytron şüalanmadan

sonra mövcud yeni və yaranmış qruplarda atomlararası kimyəvi rabitənin qüvvə sabitinin ən böyük qiyməti OH funksional qrupları üçün, ən kiçik qiymət isə  $\text{BO}_4$  dartılmış qrupları üçün müəyyən olunmuşdur. Yüksək intensivlikli neytron selinin təsiri altında yeni B-O kovalent kimyəvi rabitənin formalaşması və zəncirvari proses zamanı bor atomunun bir p-elektronu oksigen atomuna ötürməklə oksidləşmə reaksiyasına məruz qalırlar və onların reduksiya reaksiyasının xüsusiyyətləri üstünlük təşkil edir. Strukturda B-(OH) kimyəvi rabitələrin yaranması neytron şüalanması nəticəsində meydana gələn funksional qrupların (anion  $[\text{OH}]^-$ ) B atomuna elektron verməsi ilə əlaqədardır. Şəkil 2-də otaq temperaturunda müxtəlif neytron selinin təsiri altında nano  $\text{B}_2\text{O}_3$  birləşməsinin  $207 \text{ sm}^{-1}$ ,  $498 \text{ sm}^{-1}$ ,  $527 \text{ sm}^{-1}$ ,  $883 \text{ sm}^{-1}$ ,  $921 \text{ sm}^{-1}$ , və  $1165 \text{ sm}^{-1}$  tezliklərdə Raman pikləri müşahidə edilmişdir. Məlum tezliklər və yaxud kimyəvi rabitələr  $883 \text{ sm}^{-1}$ ,  $921 \text{ sm}^{-1}$  və  $1165 \text{ sm}^{-1}$  bor turşusunu və B-O rabitəsini xarakterizə edir.

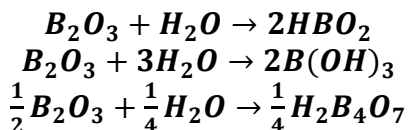


Şəkil 2. Müxtəlif neytron selinin təsiri altında nano  $\text{B}_2\text{O}_3$  kristalının Raman spektrləri.

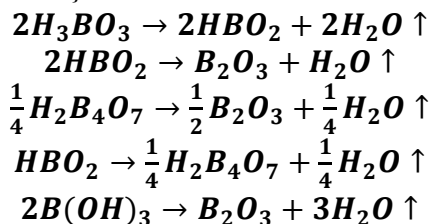
498  $\text{sm}^{-1}$  və 1165  $\text{sm}^{-1}$  ilə qeyd olunan piklər  $\text{B}_2\text{O}_3$  fazasının B-O-B uyğun rəqslərinin mövcudluğunu göstərir. Raman spektrlərində neytron selindən asılı olaraq 207  $\text{sm}^{-1}$ -də əlavə yeni qrup rəqslərini meydana gəlir. Sürətli neytronlarla müxtəlif sel sıxlığında şüalandırılmış borlu birləşmələrinin istilik sel funksiyası, istilik tutumu və termodinamik funksiyaların dəyişməsi tədqiq olunmuşdur.  $4.0 \times 10^{12}$  n/ $\text{sm}^2$ ,  $8.0 \times 10^{12}$  n/ $\text{sm}^2$ ,  $1.37 \times 10^{13}$ ,  $4.0 \times 10^{14}$  n/ $\text{sm}^2$  və  $1.0 \times 10^{15}$  n/ $\text{sm}^2$  şüalandırılmış  $\text{B}_2\text{O}_3$  nümunəsinin  $100 \leq T \leq 800\text{K}$  temperatur intervalında istilik sel funksiyasının kinetikasını üç hissəyə bölünür.

- $422 \leq T \leq 443\text{K}$  - $\text{HBO}_2$  və  $\text{B}(\text{OH})_3$  nümunələrinin parçalanma reaksiyası
- $456 \leq T \leq 600\text{K}$  - $\text{H}_2\text{O}$  və OH qruplarının parçalanma reaksiyası
- $T \geq 600\text{K}$  sabit temperatur intervalı və yaxud dayanıqlı oblast

Temperaturun 443K qiymətinə qədər dublet endo effektlər meydana gəlir, 456K -dən sonra istilik sürəti daha mürəkkəb və yaxud çox pikli şəkildədir. Yekun proses sabit temperatur aralığına keçiddir. Nəzərə alsaq ki,  $\text{B}_2\text{O}_3$  kristalının sintez və saxlanma şəraitindən asılı olaraq normal atmosferdə havadan su molekulları ilə müxtəlif “thermochemical” (aşağıda qeyd olunmuş keçid mexanizmləri üzrə) kimyəvi reaksiyalara daxil olur.

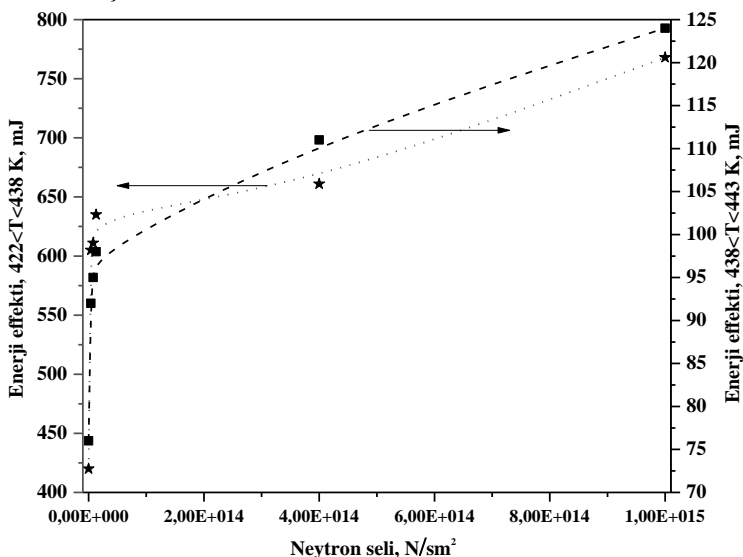


Temperatur faktorunun təsiri nəticəsində isə aşağıdakı parçalanma reaksiyaları baş verir.



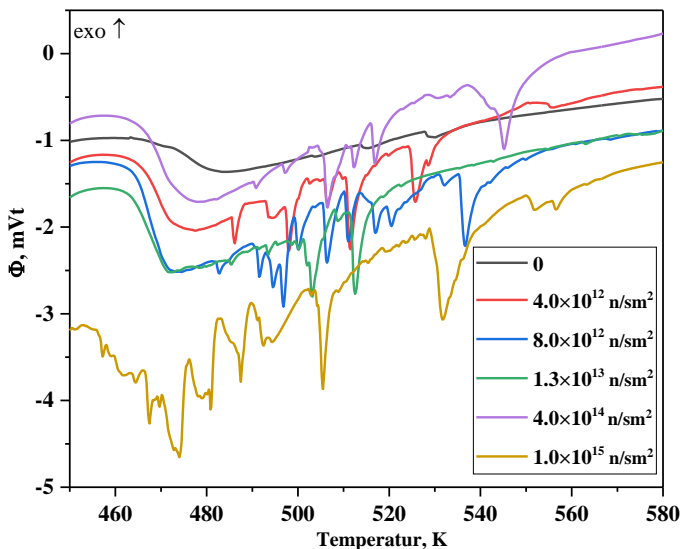
Şüalanmamış və neytron selinin təsiri altında şüalanmış bor oksid kristalında baş verən hidratatsiya və dedidratatsiya reaksiyalarının mexanizminin mürəkkəb olması aydın görünməkdədir.

Nümunələrdə dublet effektlər 422K-də  $\text{HBO}_2 \rightarrow \text{B}_2\text{O}_3$  və 438K-də boric acid  $\text{B}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{B}_2\text{O}_3$  mexanizmləri üzrə baş verən parçalanma reaksiyalarını (keçidləri) göstərir. Əsas parçalanma məhsulu OH qrupunun və struktur suyun ayrılması ilə gedən reaksiyalardır. Nano bor oksid kristalının səhində parçalanma reaksiyasını xarakterizə edən dublet effektlərin sahələri neytron selindən asılı olaraq artır. Şüalanmamış kristallarda formalaşmış pikin intensivliyi müxtəlif sel sıxlıqlarında şüalandırılmış kristallarla müqayisədə 1.614 dəfə kiçikdir. Effektiv sahəsi və neytron selinin artması kinetik prosesin tamamlanması üçün böyük miqdarda enerji tələb olduğunu göstərir. Neytron selindən sonra sərbəst halda OH qrupu və radikalların sayı artır ki, nəticədə temperaturun təsiri altında qarşılıqlı təsirdə olan kimyəvi rabitələrin sürətli fazada parçalanması baş verir. Şəkil 3-də neytron selindən asılı olaraq nümunələrdə  $422 \leq T \leq 438\text{K}$  və  $438 \leq T \leq 443\text{K}$  temperatur intervalında dublet effektlərdə parçalanma reaksiyası üçün tələb olunan enerjinin dəyişməsi verilmişdir.



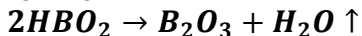
Şəkil 3.  $422 \leq T \leq 438\text{K}$  və  $438 \leq T \leq 443\text{K}$  temperatur intervalında şüalanmamış və müxtəlif neytron seli ilə şüalandırılmış  $\text{B}_2\text{O}_3$  nano kristalında enerji effektləri.

Aydın görünür ki, neytron selindən asılı olaraq  $4.0 \times 10^{12}$ - $1.37 \times 10^{13}$  n/sm<sup>2</sup> sel intervalında çevrilmə enerjisi bir-birinə yaxındır. Lakin,  $n \geq 4.0 \times 10^{14}$  n/sm<sup>2</sup> başlayaraq çevrilmə enerjisi xətti artır. Bir daha aydın olur ki, mürəkkəb mexanizimlə baş verən çevrilmə reaksiyasında neytron seli sərbəst halda su molekullarının parçalanmasını və hidrooksid qruplarının sayını artırır. Yüksək neytron selində su buxarlarının və OH qruplarının parçalanma reaksiyası tamamlanmır və enerjinin dəyişməsi stabil olur. Şəkil 4-də  $450 \leq T \leq 580$ K temperatur intervalında neytron selindən asılı olaraq B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kristalında ardıcıl və müxtəlif növ qarşılıqlı təsirdə olan fərqli funksional qrupların mürəkkəb mexanizimlə baş verən parçalanma reaksiyalarının kalorimetrik spektrləri verilmişdir.



Şəkil 4.  $450 \leq T \leq 580$ K temperatur intervalında şüalanmamış və müxtəlif neytron seli ilə şüalandırılmış B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kristalında istilik selinin dəyişməsi.

Şəkil 4-dən aydın görünür ki, yüksək neytron seli parçalanma mərkəzlərinin sayını artır və  $450 \leq T \leq 580$ K temperatur intervalında yüksək kimyəvi aktivliyə malik nano bor oksid kristalının səthində formalaşan B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> → H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> reaksiya məhsulunda çoxlu endo effektlər formalaşır.

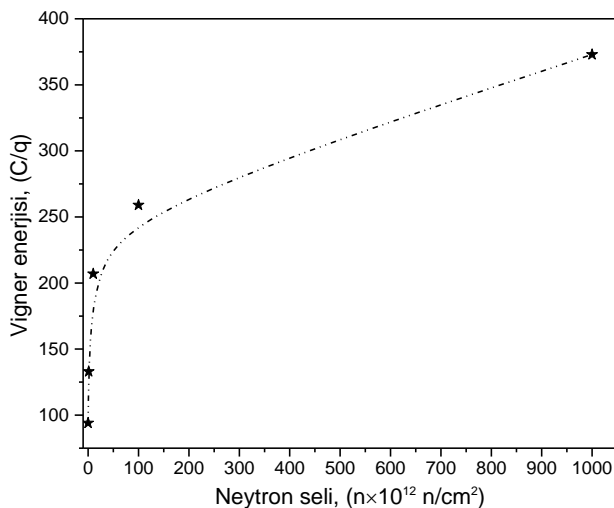


Neytron selinin artması ilə yeni endo mərkəzlər formalaşır. Neytron şüalanmanın təsiri ilə formalaşmış yeni endo mərkəz temperaturun təsiri altında hidrat və hidrooksid qrupunun parçalanma fazasını təcrübi olaraq göstərir.

Şüalanmamış nümunədə mərkəzi piki 503K, 515K, və 530K temperatura uyğun endo effektlərin sayı şüalanmadan sonra daha da artır. Şüalanma selindən asılı olaraq endo effektlərin temperaturun kiçik 457K və böyük 556K qiymətlərinə doğru dəyişməsi yuxarıda söylənilən fikirləri təsdiq edir. İstilik tutumunun temperatur asılılığı göstərir ki, 100K temperaturda kristalların istilik tutumu şüalanmamış nümunə üçün  $0.310 \text{ C/K} \times \text{q}$  müxtəlif neytron seli ilə şüalandırmadan ( $4.0 \times 10^{12} \text{ n/sm}^2$ ,  $8.0 \times 10^{12} \text{ n/sm}^2$ ,  $1.37 \times 10^{13} \text{ n/sm}^2$ ,  $4.0 \times 10^{14} \text{ n/sm}^2$  və  $1.0 \times 10^{15} \text{ n/sm}^2$ ) sonra uyğun olaraq  $0.315 \text{ C/K} \times \text{q}$ ,  $0.317 \text{ C/K} \times \text{q}$ ,  $0.322 \text{ C/K} \times \text{q}$ ,  $0.326 \text{ C/K} \times \text{q}$ , və  $0.333 \text{ C/K} \times \text{q}$  kimi dəyişir. Lakin temperaturun 600K qiymətində kristalın istilik tutumu şüalanmamış nümunə üçün  $0.458 \text{ C/K} \times \text{q}$ , neytron selinin təsiri ilə  $0.483 \text{ C/K} \times \text{q}$ ,  $0.488 \text{ C/K} \times \text{q}$ ,  $0.497 \text{ C/K} \times \text{q}$ ,  $0.501 \text{ C/K} \times \text{q}$  və  $0.513 \text{ C/K} \times \text{q}$  qədər artır.

Həmin fəsildə bor nitrid üçün aparılan struktur tədqiqatlarla borun altıbucaqlı faza (002), (100), (101), (102), (004) və (110) müstəviləri, fəza qrupu P-6 və qəfəs parametrləri  $a=2.5092 \text{ nm}$ ,  $c=6.6762 \text{ nm}$ .  $\alpha=90^\circ$ ,  $\gamma=120^\circ$  müəyyən edilmişdir. Bor nitrid kristalının  $400 \leq T \leq 1300 \text{ K}$  temperatur intervalında əsas pik mərkəzləri  $5^\circ \text{ C/dəq}$  istilik sürəti ilə təsirsiz Ar qazının axını altında tədqiq edilmişdir. Temperaturun 400K qiymətinə qədər istilik seli funksiyası dəyişmiş, bununla birlikdə, Viqner enerjisinin kinetikasi bir bölgəni əhatə edir.  $770 \leq T \leq 1220 \text{ K}$  temperatur intervalında Viqner enerji təyin olunur. DSC analiz nəticələri (oksidləşmə reaksiyası daxil) göstərir ki, bor nitridin kristal stukturunda sintez şəraitindən və yaxud digər təsirlərdən asılı olaraq həcmdə və yaxud səthində xarakterik təbii defektlər formalaşır. Defektlərin formalaşma mexanizmindən və onların miqراسiyasından asılı olaraq Viqner effektləri fərqli temperatur intervalında baş verir. Təcrübi nəticələr göstərir ki, şüalanma selinin qiymətinin artması bor nitrid kristalında toplanan enerjinin miqdarı

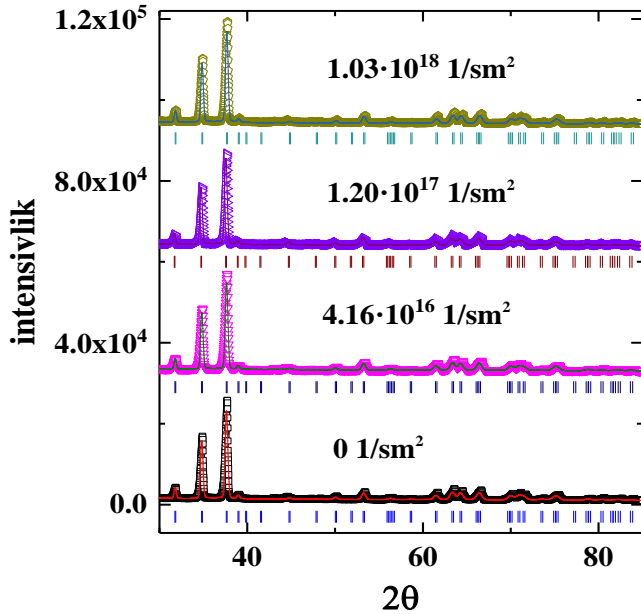
artır. Şəkil 5–də müxtəlif sel sıxlıqlı neytronlarla şüalanma zamanı BN kristalında toplanan enerjisinin asılılığı verilmişdir. Neytron selinin bor və azot nüvələrindən elastik səpilmə və radiasiya tutulması nəticəsində kristal quruluşunda müxtəlif növ defekt mərkəzlər formalaşdırır. Neytron selinin  $B^{10}$  radioizotopu ilə qarşılıqlı təsiri prosesində  ${}^2\text{He}^4$  ionunun üç enerjili xətt boyunca (1.47 MeV, 1.78 MeV və 2.05 MeV),  ${}^3\text{Li}^7$  ionunun iki enerjili xətti (1.01 MeV və 0.84 MeV), 0.48 MeV qamma enerjili xətti,  ${}^1\text{H}^3$  ionunun iki enerjili (2.72 MeV və 191 keV) və 573 keV enerjili deuteriumun BN kristal quruluşunda böyük miqdarda defekt mərkəzlər formalaşdırır. Əlavə olaraq, neytron selinin  ${}^{14}\text{N}$  nüvəsi ilə qarşılıqlı təsiri zamanı 40 keV  ${}^{14}\text{C}$  və 580 keV enerjili  ${}^1\text{H}$  proton izotoplarının alınması da öz növbəsində yeni növ defektlər yaradır. Həmçinin neytron selinin artması ilə kristal quruluşu verilən enerjinin miqdarı artır. Böyük miqdarda defekt mərkəzlər böyük miqdarda enerjinin toplanmasını yaradır. Şüalanmamış kristallarda defektlər hesabına toplanan enerjinin miqdarı 94.49 C/q olduğu halda  $8.0 \times 10^{12}$  n/sm<sup>2</sup> dən  $4.0 \times 10^{14}$  n/sm<sup>2</sup> qədər olan neytron selində toplanan enerjinin qiyməti 133.106 C/q dən 259.364 C/q qədər artır.



Şəkil 5. BN kristalında neytron selindən asılı olaraq toplanan enerjinin dəyişməsi.

Lakin maksimum neytron seli ilə  $1.0 \times 10^{15}$  n/sm<sup>2</sup> şüalanma göstərir ki, toplanan enerjinin qiyməti daha sürətli artaraq 373.609 C/q-a qədər artır. Bir daha təcrübi olaraq alınır ki, yüksək seldə şüalanma yüksək miqdarda Viqner enerjisinə ekvivalentdir.

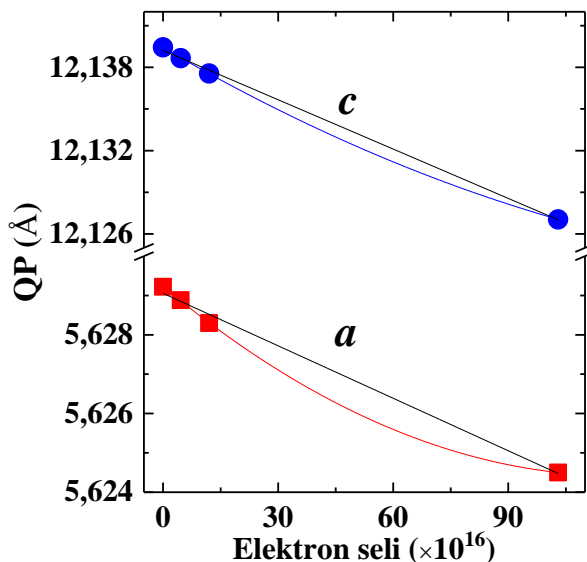
Dissertasiya işinin **dördüncü** fəslində tədqiqat kristalları 2.5 MeV enerjili, yüksək  $4.16 \times 10^{16}$  sm<sup>2</sup>,  $1.20 \times 10^{17}$  sm<sup>2</sup> və  $1.03 \times 10^{18}$  sm<sup>2</sup> elektron seli ilə otaq temperaturunda şüalandırılmışdır. Tədqiqat materiallarının quruluş strukturunda yerləşən atomları ilə elektron selinin mümkün elastiki və qeyri-elastiki qarşılıqlı təsir mexanizminin nəzəri və təcrübi əsasları analiz edilmiş və kristalın həcmə ötürülən enerjinin mexanizmi müəyyən edilmişdir. Şüalandırılmış nümunələrin quruluş strukturunda baş verən radiasiya effektləri,  $100 < T < 300$  K temperatur intervalında kristalların istilik seli funksiyasının dəyişməsi, istilik tutumunun təyini və termofiziki parametrlərin öyrənilməsi verilmişdir.



Şəkil 6. B<sub>4</sub>C mikro kristallarının otaq temperaturunda, normal atmosfer təzyiqində və müxtəlif elektron seli ilə şüalandırılmadan sonra alınmış rentgen difraksiyası spektrləri.

Şəkil 6-da  $B_4C$  kristalının otaq temperaturunda və müxtəlif elektron seli ilə şüalandırılmadan sonra alınmış rentgen difraksiyası spektrləri verilmişdir. Spektrlərin analizindən məlum olmuşdur ki, normal şəraitdə və otaq temperaturunda bor karbid R-3m fəza qruplu romboedrik simmetriyalı kristal quruluşa malikdir. Qəfəs parametrləri:  $a = 5.62922 \text{ \AA}$  və  $c = 12.13944 \text{ \AA}$  kimi təyin olunmuşdur.

Şüalanmamış,  $4.16 \times 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ ,  $1.20 \times 10^{17} \text{ sm}^{-2}$  və  $1.03 \times 10^{18} \text{ sm}^{-2}$  seldə şüalandırılmış kristalın rentgen difraksiyası spektrlərinin analizi göstərmişdir ki, göstərilən intervalında  $B_4C$  birləşməsinin kristal quruluşunda faza çevrilmələri baş vermir. Bütün spektrlər R-3m fəza qrupuna və romboedrik simmetriyaya uyğun gəlir. Yalnız difraksiya maksimumlarının absis oxu boyunca müəyyən qədər sürüşməsi və piklərin intensivliklərində dəyişmə müşahidə edilmişdir ki, bu da elektron şüalanmasının təsiri ilə qəfəs parametrlərinin və atom koordinatlarının qismən dəyişməsinə uyğun gəlir. Şəkil 7-də qəfəs parametrlərinin şüalanma selindən asılı olaraq dəyişməsi verilmişdir.



Şəkil 7. Bor karbid kristalının otaq temperaturunda elektron seli ilə şüalanmadan sonra qəfəs parametrlərinin dəyişməsi.

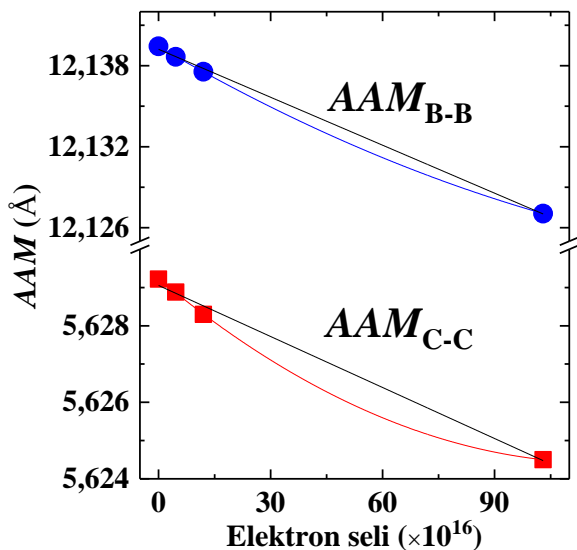
Şüalanma seli artdıqca  $a$  və  $c$  qəfəs parametrlərinin qiymətlərində xətti (qara xətlər) funksiyaya oxşar olaraq:  $a_i = a_0 - k_i D$  qanunu ilə azalma baş verir.  $a$  parametri üçün:  $a = 5.63 - 4.44 \cdot 10^{-5} \cdot D \cdot 10^{16}$ ,  $c$  parametri üçün isə:  $c = 12.14 - 1.18 \cdot 10^{-4} \cdot D \cdot 10^{16}$  qiymətləri alınmışdır. Şüalandırma selinin qiymətinin artması ilə qəfəs parametrlərinin qiymətlərində azalma müşahidə olunur ki, bu da elektron selinin təsiri ilə kristal daxilindəki energetik səviyyələrin həyacanlaşması nəticəsində rabitələrin əvəzlənməsi kimi izah etmək olar. Qamma kvantlarla şüalanmış bor karbidin şüalanma dozası artdıqca, qəfəs parametrlərinin qiymətlərində artma baş verir və müəyyən dozadan sonra atomlar arası rabitələr qırılaraq kristal quruluşa malik fazadan lokal amorf fazaya keçid baş verir. Lakin, tədqiqatlar zamanı müəyyən edildi ki, elektron seli qamma şüalardan fərqli təsirə malik olurlar. Əksinə qəfəs parametrlərinin qiymətlərində azalma baş verir. Bu da onunla əlaqədardır ki, elektron şüalar atomlar arası rabitələri dəyişmə mexanizmini (rəngli xətlər effekti) yaradır.

Cədvəl 1. Fərqli intensivlikli elektron seli ilə şüalandırılmış bor karbid kristalında atom koordinatları.

Şüalanmamış				$4.16 \times 10^{16} \text{ sm}^2$			
Atom	$x$	$y$	$z$	Atom	$x$	$y$	$z$
B1	0.441	0.558	0.049	B1	0.441	0.557	0.049
C11	0.441	0.558	0.049	C11	0.441	0.557	0.049
B2	0.504	0.495	0.19117	B2	0.504	0.495	0.1911
B3	0	0	0	B3	0	0	0
C1	0	0	0.12339	C1	0	0	0.1232
B11	0	0	0.05628	B11	0	0	0.0549
$1.20 \times 10^{17} \text{ sm}^2$				$1.03 \times 10^{18} \text{ sm}^2$			
Atom	$x$	$y$	$z$	Atom	$x$	$y$	$z$
B1	0.441	0.557	0.04399	B1	0.441	0.557	0.0435
C11	0.441	0.557	0.04399	C11	0.441	0.557	0.0435
B2	0.504	0.494	0.19085	B2	0.504	0.493	0.1907
B3	0	0	0	B3	0	0	0
C1	0	0	0.12322	C1	0	0	0.1231 2
B11	0	0	0.053	B11	0	0	0.053

Şəkil 7-də qəfəs parametrlərinin qeyri xətti asılılıqları göstərir ki, elektron şüasının müəyyən qiymətində qərarlaşma baş vermə ehtimalı

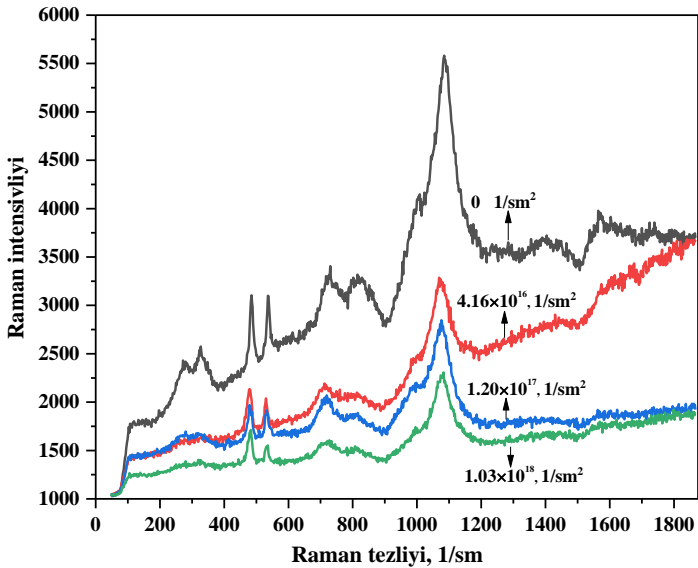
var və həmin nöqtədə kristal quruluşda mövcud olan bütün defektlər temperaturun təsiri ilə rekombinasiya olunaraq rekristalizasiya oluncaqdır. Şüalandırılmadan əvvəl və sonra bor karbid kristalında müxtəlif kristalloqrafik mövqelərdə yerləşən atomların koordinatları göstərilmişdir (cədvəl 1.). Alınmış qiymətlərdən məlum olur ki, bəzi atomlar öz ideal mövqələrində dayandıqlarına görə elektron şüası onlara təsir edə bilmir. Lakin, öz ideal mərkəzlərindən müəyyən qədər sürüşmüş halda dayanmış atomlar elektron şüasının təsiri ilə öz koordinatlarını müəyyən qədər dəyişirlər ki, bu da yekunda atomlar arası məsafələrin və buna uyğun olaraq qəfəs parametrlərinin dəyişməsinə gətirib çıxarır. Atomlar arası məsafələrin orta qiymətləri üçün alınmış asılılıqlardan müəyyən edilmişdir ki, qəfəs parametrlərinin qiymətlərinin şüalanma selindən asılılığında olduğu kimi, şüalanma selinin qiyməti artdıqca, atomlar arası məsafələrin qiymətlərində də azalma müşahidə edilir. Həmçinin şüalanma seli artdıqca B – B, B – C və C – C atomlar arası məsafələrin orta qiymətlərində xətti (qara xətlər) funksiyaya oxşar olaraq:  $d_i = d_0 - k_i D$  qanunu ilə azalma baş verir (şəkil 8).



Şəkil 8. Atomlar arası məsafənin şüalanma selindən asılılığı.

B – B atomları üçün:  $d_{B-B} = 5.63 - 4.44 \cdot 10^{-5} \cdot D \cdot 10^{16}$ , B – C atomları üçün:  $d_{B-C} = 5.63 - 4.44 \cdot 10^{-5} \cdot D \cdot 10^{16}$  və C – C atomları üçün isə:  $d_{C-C} = 5.63 - 4.44 \cdot 10^{-5} \cdot D \cdot 10^{16}$  ifadələri alınmışdır.

Tədqiq olunmuş **fəsil**də bor karbid kristalında elektron selinin təsir altında raman spektrləri tədqiq olunmuşdur.  $B_{12}$ ,  $B_{11}C$  icosahedra, C-B-C və C-B-B zəncirlərinin fərqli tezlikdə dinamikası və qəfəsin hərəkəti haqqında daha dolğun məlumat əldə etmək mümkündür. Qrup nəzəriyyəsinə görə  $(B_{12})CBC$  və yaxud  $(B_{12})CCC$  struktur şəklində formalaşmış bor karbid kristalında mövcud on bir (11) aktiv Raman modalarında beşi ( $A_{1g}$ ), altısı isə ( $E_g$ ) simmetriya tipindədir.



Şəkil 9. Bor karbid kristalında şüalanmamış və müxtəlif elektron selində şüalandırılmış Raman spektrləri.

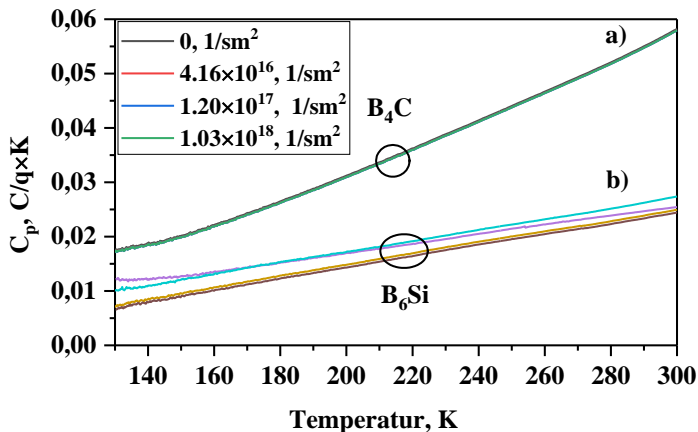
Şəkil 9-da bor karbid kristalının şüalanmamış və müxtəlif elektron selində şüalandırılmış Raman spektrləri verilmişdir. Müəyyən olunmuşdur ki, şüalanmamış bor karbid kristalında 11 Raman-aktiv modası mövcuddur. Raman aktiv modalarının spektrləri borun digər strukturlu birləşmələri ( $B_{10.37}C$ ,  $B_{8.52}C$ ,  $B_{7.91}C$ ,  $B_{6.3}C$  və  $B_{4.3}C$ ) ilə müqayisə edilmiş və müəyyən olunmuşdur ki, tədqiq etdiyimiz  $(B_{12})CBC$  nümunəsi daha böyük kristallik quruluşa

malikdir. Struktur analiz nəticələri bir daha göstərdi ki, bor və karbon atomları 6.5:1 nisbətindədir və  $B_{13}C_2$  struktur şəklində formalaşmışdır. Yayılmış effektlər bor karbid kristalında 270, 323, 730, 820, 1007, 1087, 1395 və 1574  $sm^{-1}$  Raman tezliklərində müşahidə olunmuşdur. Yayılmış spektrlərin daha çox amor fazaya və yaxud qismən pozulmuş kristal struktur haqqında məlumat verir. Raman spektrlərindən 270/323  $sm^{-1}$ , 730/817  $sm^{-1}$  və 1004/1084  $sm^{-1}$  üç növdə dublet piklər müşahidə olunmuşdur. Dublet piklər  $A_{1g}$  simmetriya tipinə malik olan üç B-C icosahedranın ekvatorial beş bucaqlı formasını dəqiq modalarıdır. B-B Raman modalarının daha aktiv fazası isə 1072-1084  $sm^{-1}$  müşahidə olunmaqdadır.

Aydın müşahidə olunur ki, yüksək elektron sel sıxlığında B-B rəqs modaları tamamilə pozulmuş haldadır. Lakin 485  $sm^{-1}$  və 536  $sm^{-1}$  Raman modları bor karbidin kristalında  $B_{11}C$  zəncirli quruluşun rəqslərinə uyğun gəlir. Şüalandırılmış nümunələrin Raman spektrlərindən aydın görünür ki, yayılmış bütün spektrlər tamamilə degredasiya halına keçir. Amor fazada olan olan struktur daha yüksək dərəcəli amorf fazaya keçid etmiş olur. İntensiv 485  $sm^{-1}$  və 536  $sm^{-1}$  spektrlərin intensivliyi şüalanmamış kristal ilə müqayisədə yeddi dəfə, yarım eni isə dəyişmədən qalır.

Eyni zamanda **fəsildə** şüalanmada sonra ilk tədqiq olunan bor karbid kristalı  $100 \geq T \geq 146K$  temperatur intervalında istilik selinin ötürülməsi kiçik sürətli olduğu halda,  $146 \geq T \geq 300 K$  daha aktiv fazada dəyişir, yəni iki fazalı istilik ötürülmə mexanizmi baş verir. Bor silikat üçün istilik selinin kinetikasi bölgələrə bölünür. Buna baxmayaraq, müxtəlif atom konsentrasiyaları mövcud bor karbid termodinamik cəhətdən 10-2000K temperatur aralığında Gibbs əmələgəlmə enerjisi karbon konsentrasiyasının bir funksiyası kimidir və bor silisid birləşmələri üçün termofizik kinetikanın olduğu məlumdur. Lakin bor silikat birləşməsi üçün istiliyin ötürülməsi və selinin dəyişməsi eyni mexanizmi ilə gedir. Xətti qanuna uyğunluqla dəyişən kinetikada faza keçidi müşahidə olunmursa baş verən bütün termo fiziki proseslərin mexanizmi xüsusi istilik tutumu üzərində qurulur və bir-biri ilə əlaqəlidir. Şəkil 10-də  $100 \leq T \leq 300K$  temperatur intervalında bor karbid and bor silikat kristalları üçün müxtəlif şüalanmalardan sonra

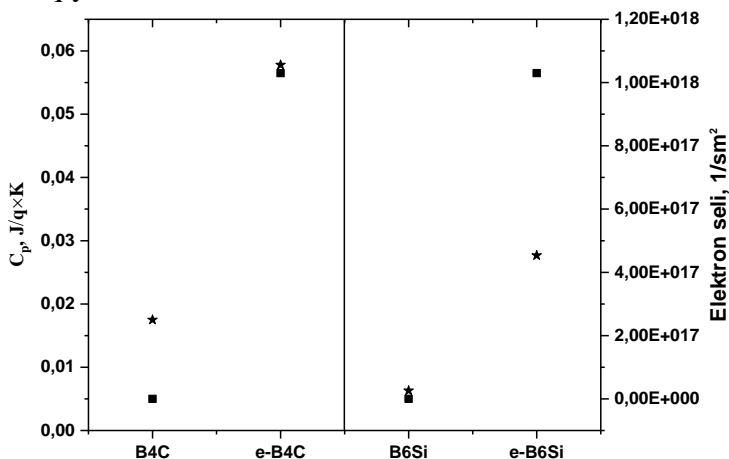
xüsusi istilik tutumunun temperatur asılılığı verilmişdir. Müəyyən olunmuşdur ki, şüalanma enerjisi və selindən asılı olmayaraq bor karbid kristalının xüsusi istilik tutumunun dəyişmə kinetikasi  $T \leq 146\text{K}$  temperaturlarda fərqli,  $T \geq 146\text{K}$  temperaturlarda isə daha sürətli mexanizmlə artır. Alınan eksperimental nəticələr söyləməyə əsas verir ki, kiçik temperaturlarda istilik selinin bor karbid kristalında ötürülməsi ikili mexanizmlə baş verir.



Şəkil 10. Müxtəlif sel sıxlığında şüalanmış bor karbid və bor silisid kristallarında  $100 \geq T \geq 300\text{K}$  temperatur intervalında xüsusi istilik tutumu.

Kiçik temperaturlarda fonon-fonon qarşılıqlı təsiri ilə ötürülən istilik seli ikili formatda özünü ehtiva edir. İstilik selinin temperatur asılılığında baş verən kinetika, istilik tutumunun temperatur asılılığında da özünü göstərir. İstilik tutumunun temperatur asılılığından aydın görünür ki, bor karbid kristalı elektron selinin təsiri altında  $100\text{K}$  temperaturda xüsusi istilik tutumu  $0.0170\text{-}0.0176\text{ C/K} \times q$  intervalında dəyişir. Bor silikat kristalı üçün xüsusi istilik tutumunun mexanizmi bor karbid kristalından bir qədər fərqlənir. Bor silikat kristalında istilik selinin ötürülmə mexanizmi xəttidir. Kiçik temperaturlarda fonon-fonon qarşılıqlı təsirinə ötürülməsi yalnız bir mexanizmdir. Bor silikat kristalından hər iki şüalanmanın təsiri altında  $100\text{K}$  temperatur ətrafında nümunələrin xüsusi istilik tutumu  $0.005627\text{-}0.0129\text{ C/K} \times q$  intervalında dəyişir. Lakin bu bor karbid

kristalı ilə müqayisədə olduqca kiçik qiymətdir. Bu şəkildə hər iki kristalında alınmış qiymətlər onların kristal quruluş və sıxlıq faktoru ilə bağlıdır. Sıxlığın böyüməsi ilə keramik nümunələrdə kiçik temperaturalarda fanon fanon qarşılıqlı təsiri daha böyükdür və bu daha çox xətti funksiya ilə ifadə olunur. Məhz müxtəlif sıxlıqlara malik bor karbid və bor silikat kristalında müşahidə olundu. Hər bir şüalanma üçün xüsusi istilik tutumunun kinetikasi şəkil 11-də verilmişdir. Xüsusi istilik tutumunun dəyişmə kinetikasi göstərir ki, bor karbid birləşməsi  $100 \leq T \leq 300K$  temperatur intervalında elektronlarla şüalandırıldıqda qiyməti 3.48 dəfə artır. Bor silikat üçün isə elektronlarla şüalandırıldıqda istilik tutumunun qiyməti 4.40 dəfə artır. Bütün təcrübələr göstərir ki, bor silikat kristalında xüsusi istilik tutumunun qiyməti daha sürətlə artır.

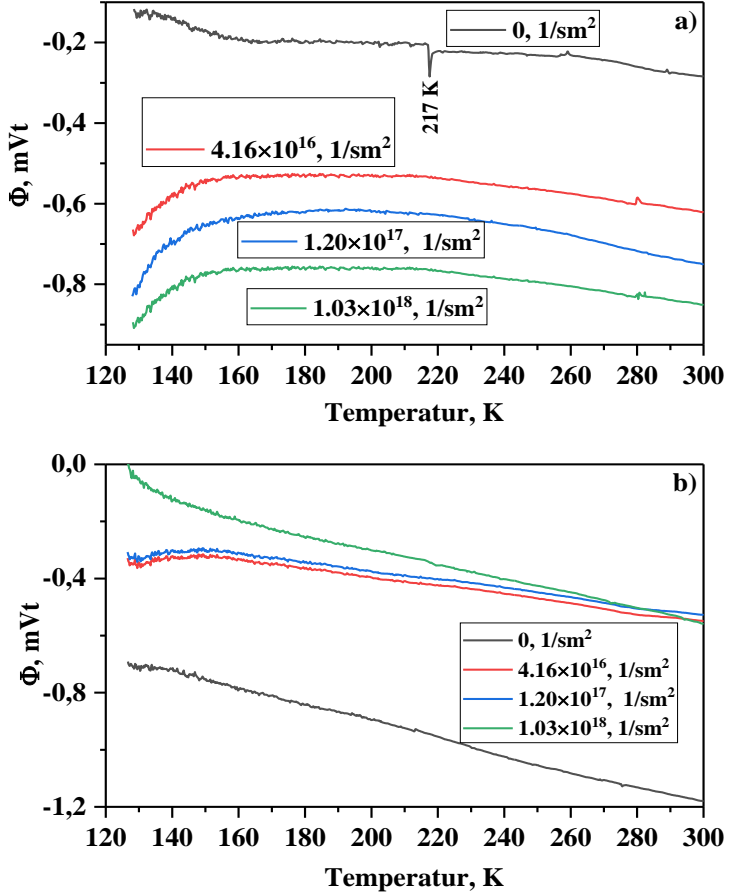


Şəkil 11. B<sub>4</sub>C və B<sub>6</sub>Si kristallarında  $100 \leq T \leq 300K$  temperatur intervalında xüsusi istilik tutumunun kinetikasi.

Şəkil 12-də  $100 \leq T \leq 300K$  temperatur intervalında bor nitrid və bor oksid kristalları yüksək enerjili elektronlarla şüalanmadan sonra istilik sel funksiyasının spektrləri göstərilmişdir. Bor nitrid və bor oksid kristalları fərqli elektron selində istilik selinin kinetikasi iki bölgəyə bölünür.

- $125 \leq T \leq 150K$  fərqli mexanizmlə istilik seli funksiyasının qiyməti azalır
- $150 \leq T \leq 300K$  xətti mexanizmi

Bor nitrid kristalında müxtəlif elektron selinin təsiri altında istilik selinin yayılma mexanizmi göstərir ki, bütün şüalanma qiymətlərində istiliyin ötürülməsi eyni mexanizm ilə baş verir. 150K-dən sonra istilik prosesi xətti bir funksiya və istilik axını funksiyası verilmiş temperatur aralığında dəyişir. Əlavə olaraq, elektron selinin təsiri altında bor oksidə istilik selinin dəyişməsi bor nitrid kristalında olduğu kimi baş verir.



Şəkil 12. Bor nitrid a) və bor oksid b) kristallarında istili seli funksiyası müxtəlif elektron seli ilə ( $4.16 \times 10^{16} \text{ sm}^2$ ,  $1.20 \times 10^{17} \text{ sm}^2$  və  $1.03 \times 10^{18} \text{ sm}^2$ ) şüalanmadan sonra.

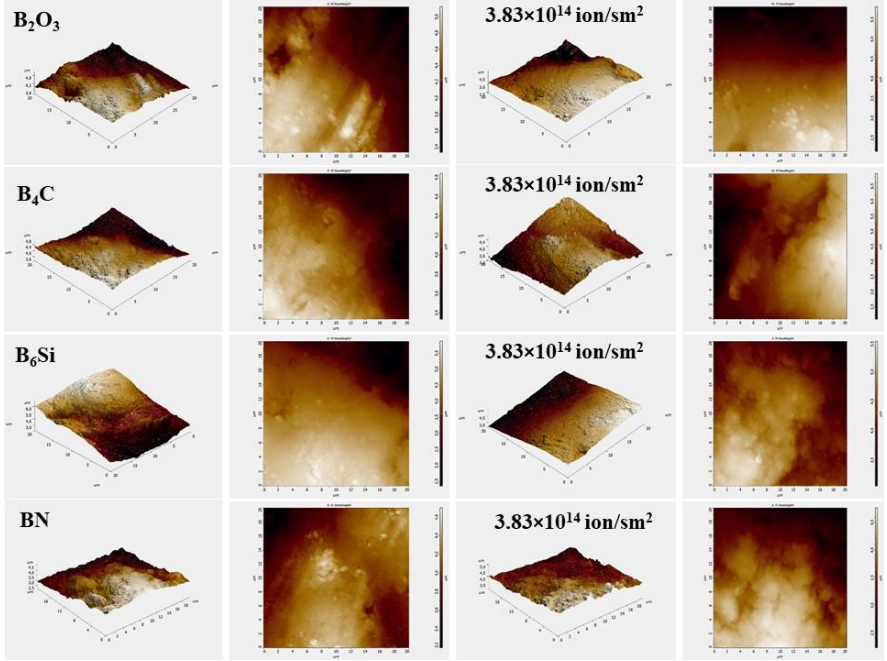
Yalnız şüalanmamış bor oksid kristalında istilik selinin funksiyası xətti şəkildə dəyişir ki, bu da istilik tutumunun xətti artmasını göstərir.  $T \leq 150\text{K}$  və  $T \geq 150\text{K}$  temperatur interval ikili mexazimz istilik seli üçün kvant region kimi qeyd etmək olar. Müəyyən olunmuşdur ki, elektronun sel sıxlığından asılı olmayaraq bor nitrid və bor oksid kristalında xüsusi istilik tutumunun dəyişmə kinetikasi baş verən istilik sel mexanizmi ilə eynidir. Alınan təcrübi nəticələr söyləməyə əsas verir ki, daha kiçik temperaturlarda istilik selinin bor nitrid kristalında ötürülməsi ikili mexanizmlə baş verir. İstilik tutumunu temperatur asılılığından aydın görünür ki, bor nitrid kristalları elektronların təsiri altında 120 K temperatur ətrafında nümunələrin xüsusi istilik tutumu çox kiçikdir. Həmçinin müəyyən olunmuşdur ki, şüalanma növündən və şüalanma selindən asılı olmayaraq bor oksid kristalı üçün xüsusi istilik tutumunun mexanizmi bor nitrid kristalından bir qədər fərqlənir. Bor oksid kristalında istilik selinin ötürülmə mexanizmi xəttidir. Kiçik temperaturlarda fonon-fonon qarşılıqlı təsirinin ötürülməsi yalnız bir mexanizmidir. Bor oksid kristalı hər iki şüalanmanın təsiri altında 300 K temperatur ətrafında xüsusi istilik tutumu bor nitrid nümunəsi ilə müqayisədə olduqca kiçik qiymətdir.

Məhz müxtəlif sıxlıqlara malik bor nitrid və bor oksid kristallarında təcrübi müşahidə olunmuşdur. Təcrübələr göstərir ki, bor oksid kristalında xüsusi istilik tutumunun qiyməti isə daha sürətlə artır. Həm də ağır ionlarla şüalanmadan sonra istilik tutumunun daha aktiv fazada dəyişməsi, müqayisəli bütün eksperimental təcrübələrdə bir birinə tamamilə təsdiqlənmiş olur. Şüalanmamış bor karbid kristalı üçün 120K temperaturda istilik keçiriciliyinin qiyməti  $0.0247 \text{ Vt/sm} \times \text{K}$ ,  $4.16 \times 10^{16} \text{ sm}^2$ ,  $1.20 \times 10^{17} \text{ sm}^2$ ,  $1.03 \times 10^{18} \text{ sm}^2$  intensivliklərdə şüalandırmadan sonra bor karbid üçün istilik keçiriciliyinin qiyməti  $0.0243 \text{ Vt/sm} \times \text{K}$ ,  $0.02420 \text{ Vt/sm} \times \text{K}$  və  $0.02401 \text{ Vt/sm} \times \text{K}$  müəyyən olunmuşdur.  $T \leq 146\text{K}$  qiymətindən sonra bor karbidin istilik selinin qiymətində kiçik artım müşahidə olunur, 300K temperaturda istilik keçiriciliyinin qiyməti  $4.16 \times 10^{16} \text{ sm}^2$ ,  $1.20 \times 10^{17} \text{ sm}^2$ ,  $1.03 \times 10^{18} \text{ sm}^2$  sel sıxlığı üçün  $0.0844 \text{ Vt/sm} \times \text{K}$ ,  $0.0827 \text{ Vt/sm} \times \text{K}$  və  $0.08 \text{ Vt/sm} \times \text{K}$ -ə bərabərdir. Bor silikat kristalında 120-

300 K temperatur intervalında istilik keçiriciliyinin qiyməti 0.0175-0.035 Vt/sm×K,  $4.16 \times 10^{16}$  sm<sup>2</sup>,  $1.20 \times 10^{17}$  sm<sup>2</sup>,  $1.03 \times 10^{18}$  sm<sup>2</sup> sel sıxlığı üçün 0.015-0.0412 Vt/sm×K, 0.010-0.0322 Vt/sm×K, 0.009-0.0335 Vt/sm×K intervalında dəyişməsi müəyyən olunmuşdur. Yüksək enerjili elektronlarla şüalanmış bor karbid və bor silisid kristallarında termik diffuziyası araşdırılmış və müəyyən olunmuşdur ki, tədqiqat kristallarında termik diffuziyanın dəyişməsi çox kiçikdir. Termik diffuziyanın qiyməti 100-300 K temperatur intervalında bor karbid kristalı üçün 0.791-0.806 sm<sup>2</sup>/san,  $4.16 \times 10^{16}$  sm<sup>2</sup>,  $1.20 \times 10^{17}$  sm<sup>2</sup>,  $1.03 \times 10^{18}$  sm<sup>2</sup> sel üçün 0.808-0.794 sm<sup>2</sup>/san, 0.798-0.716 sm<sup>2</sup>/san, 0.767-0.690 sm<sup>2</sup>/san müəyyən olunmuşdur. Digər tərəfdən termik diffuziyanın qiyməti 188K-də müxtəlif elektron selində maksimum 0.819-0.810 sm<sup>2</sup>/san qiymətinə bərabərdir. Həmçinin 100-300 K temperatur intervalında bor silikat kristalı üçün termik difuziyanın qiymətinin 0.576-0.591 sm<sup>2</sup>/san,  $4.16 \times 10^{16}$  1/sm<sup>2</sup>,  $1.20 \times 10^{17}$  sm<sup>2</sup>,  $1.03 \times 10^{18}$  sm<sup>2</sup> sellərdə 0.577-0.579 sm<sup>2</sup>/san, 0.54-0.559 sm<sup>2</sup>/san, 0.44-0.566 sm<sup>2</sup>/san təyin olunmuşdur. Tədqiq olunan temperatur intervalında termik diffuziyanın qiyməti bor karbid və bor silikat üçün azalması qeyd olunmuşdur ki, fonon-fonon qarşılıqlı təsir mexanizmi ilə izah olunmuşdur.

**Beşinci** fəsildə, B<sub>4</sub>C, B<sub>6</sub>Si, BN və B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tədqiqat kristalları 167 MeV enerjili, <sup>132</sup>Xe<sup>26+</sup> sürətli ağır ionları ilə müxtəlif  $5.0 \times 10^{12}$  ion/sm<sup>2</sup>,  $5.0 \times 10^{13}$  ion/sm<sup>2</sup> və  $3.83 \times 10^{14}$  ion/sm<sup>2</sup> sel sıxlıqlarında otaq temperaturunda yüksək vakuum şəraitində şüalandırılmışdır. Ağır ionların tədqiqat nümunələrinin səthində nüfuz etmə dərinliyi riyazi modelləşdirilməsi və molekulyar dinamikası tədqiq olunmuş, səth morfologiyasının struktur mexanizmi ətraflı araşdırılmışdır. Geniş temperatur intervalında argon (Ar) mühtündə isitilik selinin funksiyası, istilik tutumunun kinetikasi və termodinamik funksiyaların analizi yerinə yetirilmiş və alınmış termofiziki parametirlərin qiymətləri üçün müqayisəli təhlil aparılmışdır. Şəkil 13-də B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, B<sub>4</sub>C, B<sub>6</sub>Si və BN kristallarının ilkin və yüksək enerjili <sup>132</sup>Xe<sup>26+</sup> ionları ilə şüalanmadan sonra 2D və 3D səth morfologiyası təsvirləri verilmişdir. Şüalanmayan nümunələrdə səthdə əmələ gələn mikrostrukturun maksimal ölçüsü  $4.8 \pm 0,5$  µm bərabərdir. Həmçinin, ilkin strukturun

2D morfologiyasında görüldüyü kimi, qabarmaların paylanma dinamikası zəifdir.

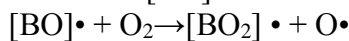
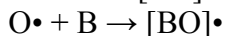
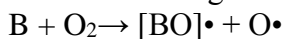


Şəkil 13.  $3.83 \times 10^{14}$   $\text{ion}/\text{sm}^2$  intensivlikdə  $167 \text{ MeV } ^{132}\text{Xe}^{26+}$  ionları ilə şüalanmış  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{B}_6\text{Si}$  və  $\text{BN}$  nümunələrin səth morfologiyası.

$167 \text{ MeV } ^{132}\text{Xe}^{26+}$  ionları ilə şüalanmadan sonra mikrostrukturda hissəciklərin paylanması həm qabarma sahəsinə, həm də qabarmaların hissəcik ölçüsünə görə artır. Nümunələrin səthində fərqli yerlərdə hissəciklərin ilkin nümunədə müxtəlif ölçülü qabarma və şüalanmadan sonra hissəciklərin ölçüləri artır. Şüalanması zamanı iri qabarmalar kiçik və orta qabarmalar tərəfindən “adsorbsiya edilmişdir”. Çox təbəqəli nümunələr üçün bu proses “qabarmaların qarşılıqlı keçid effektləri” adlanır. Nəticədə, müxtəlif ölçülü radiasiya qabarmaları daha böyük təsirlənmiş qabarmaların formalaşmasına təsir edir. Nümunələrdə səthdə qabarmanın artması səthdə baş verən istilik prosesləri nəticəsində baş verir. Jonsan yaxınlaşmasına görə silindirik formalaşan hissəciklərin ölçüsü Jonsan parametrinə

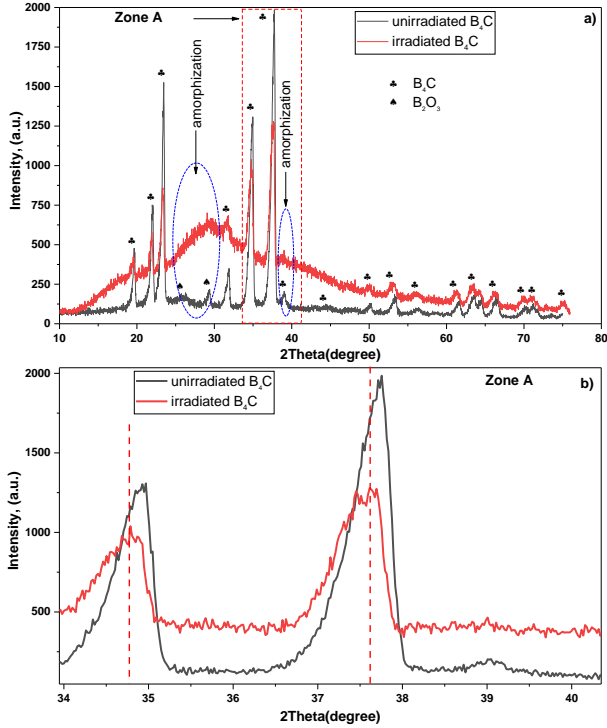
bərabərdir. Tədqiqatlar göstərir ki, kristalların səthində qabarmaların böyümə sürəti şüalanmamış nümunələrdə 2.2 dəfə böyükdür. 167 MeV  $^{132}\text{Xe}^{26+}$  ionlarla şüalandırılmış kristallarda qabarmaların böyümə sürəti müəyyən olunmuşdur. İon şüalanma zamanı səthdə qabarmanın yaranmasında payı olan mikro strukturun dislokasiyası və yaxud “çoxqatlı dislokasiyanın əmələ gəlməsi” ilə bağlıdır. Dislokasiya mikro strukturda iki (impulsu şüalanma və davamlı şüalanma) mexanizmlə formalaşır. Qabarmaların təsiri altında isə struktur qəfəsin parametrlərində genişlənmə prosesi baş verir.

$\text{B}_4\text{C}$  kristalında sürətli ağır  $^{132}\text{Xe}^{26+}$  ionları ilə şüalanmasından sonra struktur dəyişikliklərini təhlil etmək üçün XRD eksperimental metodologiyasından istifadə olunmuşdur.  $^{132}\text{Xe}$  ionlarının nüfuz etmə diapazonu rentgen şüaları tərəfindən kifayət qədər yaxşı görünür. Şəkil 14-də 167 MeV enerji sürətli ağır  $^{132}\text{Xe}^{26+}$  ionları ilə şüalanmamış və şüalanmamış  $\text{B}_4\text{C}$  rentgen spektrlərinin yerdəyişməsinə göstərilmişdir. Şüalanmamış  $\text{B}_4\text{C}$  kristalı üçün alınan piklərin təhlili nümunənin rombedral kristal quruluşa uyğunluğu təyin olundu. Romboedral kristal quruluşun  $R\bar{3}m$  fəza qrupuna aid olması müəyyən olunmuşdur. Şüalanmamış kristal üçün qəfəs parametrləri aşağıdakılardan ibarətdir:  $a = 5.62922 \text{ \AA}$  və  $c = 12.13944 \text{ \AA}$ , alınan qiymətlər nəzəri hesablamalar və əvvəlki nəticələrlə əlaqələndirilir. Bundan əlavə, şüalanmamış bor karbid kristalının səthində aktiv bor mərkəzləri tərəfindən tutulan oksigen atomları ilə xarakterizə olunan B-O kovalent rabitələri mövcuddur. Oksigen atomlarının tutulması aşağıdakı mexanizmlə göstərilə bilər.



$\text{B}_4\text{C}$  kristalı  $^{132}\text{Xe}^{26+}$  ionları ilə  $3.83 \times 10^{14} \text{ ion/sm}^2$  seldə şüalandırdıqdan sonra kristal strukturunun dəyişdiyi müşahidə olunmuşdur. Şüalanmış kristalın qəfəs parametrləri eyni ilə  $a=5.65747 \text{ \AA}$  və  $c=12.19866 \text{ \AA}$  kimi alınmışdır. Şüalanmamış kristal ilə müqayisədə qəfəs parametrlərinin dəyişməsi şüalanma ilə qəfəsin qismən deqedasiyasını göstərir. Yəni şüalanma pik genişlənməsinə və  $26^\circ$  və

29° 2-teta mövqeyi ətrafında piklərin yox olmasına gətirib çıxarı (Şəkil 14a).



Şəkil 14. B<sub>4</sub>C kristalının <sup>132</sup>Xe<sup>26+</sup> ionları ilə  $3.83 \times 10^{14}$  ion/sm<sup>2</sup> seldə şüalandırdıqdan sonra rentgen difraksiyası spektrləri.

2-teta qiymətinin 26° və 29° piklərində mövcud zəif qarşılıqlı təsirdə olan B-O kimyəvi rabitələrin ionların təsiri altında deqradasiyası baş verir. Aşağı teta dəyərində (x oxu) doğru cüzi pik sürüşmə də müşahidə olunur. Müşahidə olunan pik genişlənmə B<sub>4</sub>C-nin qismən amorfizasiyasına aid edilə bilər. Pik mövqeyində dəyişiklik kristal quruluşda qəfəs pozğunluğuna (qəfəs genişlənməsi) və ion şüalanmasının gətirdiyi daxili struktur təzyiqi hesabına yaranır (Şəkil 14b - Zona A). Pik yerdəyişməsi və intensivliyin azalması atomların kristal strukturda koordinatlarından kənara çıxması (defekt kaskadının əmələ gəlməsi) və yüksək enerjili ion axınlarının təsiri altında kristal quruluşunun deqradasiyası və ya amorflaşması ilə xarakterizə olunur. Cədvəl 2-də pikin yerdəyişməsi, piklərin yox

olması, şüalanmış bor karbidində tam enin yarım maksimum genişlənməsi və kristallit ölçüsünün azalması ağır ion tərəfindən ötürülən yüksək kinetik enerjiyə görə kiçik nanokristal mərkəzlərinin formalaşması verilmişdir.

Cədvəl 2.  $3.83 \times 10^{14}$  ion/cm<sup>2</sup> sel sıxlığında 167 MeV enerji sürətli ağır  $^{132}\text{Xe}^{26+}$  ionlar ilə şüalanmamış və şüalanmamış bor karbid kristalının kristalilik ölçüsü.

K	$\lambda(\text{Å})$	PV	PV	YE	$^{132}\text{Xe}^{26+}$	L (nm)	$^{132}\text{Xe}^{26+}$ L (nm)
0.94	1.54178	19.61	←19.51	0.31	0.42 ↑	26.78	19.84 ↓
		21.97	←21.86	0.33	0.37 ↑	25.45	22.56 ↓
		23.4	←23.3	0.34	0.39 ↑	24.82	21.56 ↓
		29.29	-	0.39	-	21.86	-
		31.77	←31.49	0.51	1.98 ↑	17.02	4.36 ↓
		34.82	←34.69	0.49	0.52 ↑	17.92	16.76 ↓
		37.63	←37.5	0.51	0.56 ↑	17.3	15.65 ↓
		38.0	-	0.59	-	14.89	-
		50.05	-	0.76	-	12.1	-
		53.25	←53.02	0.79	1.01 ↑	11.74	9.2 ↓
		61.51	←61.3	0.81	0.63 ↓	11.94	15.3 ↑
		63.48	←63.33	1.03	1.54 ↑	9.5	6.34 ↓
66.38	←66.21	1.04	1.06 ↑	9.51	9.35 ↓		

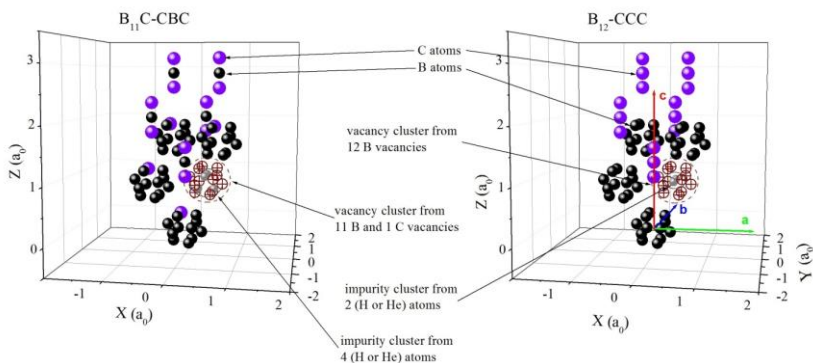
Kristallik ölçünün qiyməti  $61.3^\circ$  2-teta vəziyyətində yalnız bor karbid pikinə uyğun artır. Hesab olunur ki, ion effekti nəticəsində kiçik miqdarda yeni B-C ikosahedron əmələ gəlir. XRD nəticələri göstərdi ki, B<sub>4</sub>C strukturunun müəyyən hissələrində deqredasiya olunmayan B<sub>4</sub>C kristal strukturunda qismən amorfizasiya baş verir. Həmçinin difraksiyası piklərində şüalanmadan sonra həcmi defektlərin sayında artım müşahidə olunur. Artan vakansiya klasterində pozitronun ömrü ( $\tau$ ) hesablanmış və nəzəri B<sub>4</sub>C hidrogen və helium atomları ilə implantasiya edildikdə defekt davranışı öyrənilmişdir. Bor karbidin iki

konfigurasiyası tədqiq edilmişdir - $B_{11}C_p$ -CBC və  $B_{12}$ -CCC, burada  $C_p$ , C-nin B-ikosahedronunda qütb vəziyyətdə olduğunu bildirir.

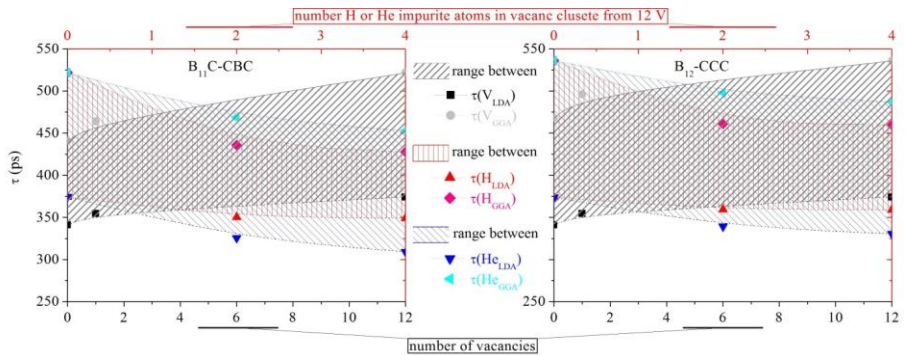
Cədvəl 3. Nöqtəvi defektlərin, hidrogen və helium implantasiyasının  $\tau$  üçün hesablanmış qiymətlər.

<b><math>B_{11}C</math>-CBC</b>			<b><math>B_{12}</math>-CCC</b>		
<b>Vakansiyazız və sərbəst atomlar</b>	<b>LDA <math>\tau</math> (ps)</b>	<b>GG A <math>\tau</math> (ps)</b>	<b>Vakansiyazız və sərbəst atomlar</b>	<b>LD A <math>\tau</math> (ps )</b>	<b>GGA <math>\tau</math> (ps)</b>
bulk	341	441	bulk	348	468
3H interstitials	286	334	3H interstitials	312	386
3He interstitials	258	355	3He interstitials	280	394
1 $V_B$	354	464	1 $V_B$	363	496
1 $V_C$	354	464	1 $V_C$	363	496
1 $V_B$ in center of the chain	354	464	1 $V_C$ in center of the chain	363	496
1 $V_C$ +11 $V_B$	374	522	12 $V_B$	374	536
1 $V_C$ +11 $V_B$ 1H nearly to C atom	373	516	12 $V_B$ 1H nearly to C atom	373	580
1 $V_C$ +11 $V_B$ with 2H in center cluster	350	436	12 $V_B$ with 2H in center cluster	359	461
1 $V_C$ +11 $V_B$ 2H nearly to C	372. 2	515	12 $V_B$ 2H nearly to C	372 .7	532
1 $V_C$ +11 $V_B$ with 4H in center cluster	349	428	12 $V_B$ with 4H in center cluster	359	460
1 $V_C$ +11 $V_B$ with 2He in center cluster	326	469	12 $V_B$ with 2 He in center cluster	339	498
1 $V_C$ +11 $V_B$ with 4He in center cluster	309	453	12 $V_B$ with 4 He in center cluster	330	487

XRD-dən alınan məlumatları, xüsusən də qəfəs parametrlərini nəzərə alaraq, materialın  $B_{11}C$ -CBC formasında olma ehtimalının daha yüksək olduğunu güman etmək olar. Nəticələr cədvəl 3-də təqdim olunur.  $\tau$  üçün hesablanmış nəticələr ( $B_4C$ -də ideal qəfəs strukturu üçün) ədəbiyyat nəticələri ilə yaxşı uyğunlaşır. Bu qiymətlərin kifayət qədər aşağı elektron sıxlığının gözlənilməsi ikosahedrlərdən kənar yerlərdə pozitronun anıqlanması nəticəsində yaranması hesab edilə bilər. İonlarla və yaxud neytronlarla şüalanmadan sonra boş klaster tipli defektlərin əmələ gəlməsi gözlənilir. Burada bu cür vakansiya klasterlərini ədədi olaraq modelləşdirmək və cədvəl 3-dəki qiymətlər  $\tau$ -nin vakansiya həcmlərinin və onlara implantasiya edilmiş H/He atomlarının artımından asılılığını verir. Şəkil 15-də göstərilən ən yaxın bor atomlarının ardıcıl olaraq defekt mövqeyinə çıxarılması ilə yaradılan boş klasteri ilə  $B_4C$  strukturunun yaradılmış defekt ən böyük həcmi təmsil edir.



Şəkil 15.  $B_4C$  kristalında H və He atomları ilə 12 vakansiyada formalaşan nöqtə defektlərin vəziyyəti.



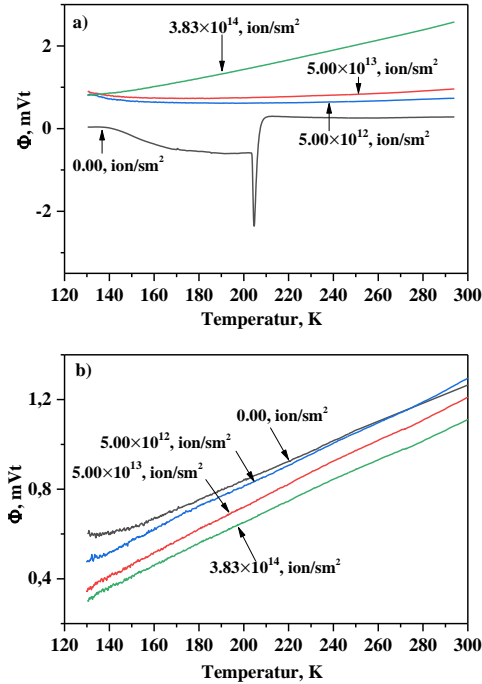
Şəkil 16.  $\tau$  və vakansiyaların sayı və yaxud 12 vakansiya klasterində H və He atomları arasında funksional asılılıqlar. LDA və GGA metodlarının  $\tau$  funksiyaları arasında diapazon aralığı.

İmplantasiya olunmuş H və He atomlarının  $B_{11}C-CBC$  strukturunda  $B_{12}-CCC$  ilə müqayisədə daha aşağı  $\tau$  dəyərə malik olması  $B_4C$ -nin daha fiziki cəhətdən optimallaşdırılmış versiyasının  $B_{11}C-CBC$  olduğunu təsdiqləyir. Ədəbiyyatda əsasən spektrin Doppler genişlənməsi nəzərə alınır, lakin  $\tau$  nəticələri bir növ nəzərə alınmır. Tədqiqat işində bu çatışmazlığı aradan qaldırmağa çalışmışıq.

Şəkil 16-da  $\tau$  vakansiyaların və  $\tau$ -yə daxil olan defektlərin sayı təqdim olunmuşdur.  $B_{12}-CCC$ -yə salınan və ya əlavə edilən atomların növündən asılı olmayaraq,  $\tau$ -də kiçik bir dəyişmə müşahidə edildi. Müvafiq olaraq, H və ya He defektlərin doyması ilə  $\tau$  arasındakı fərq təxminən 20 ps-dir. Müqayisə  $B_{11}C-CBC$  ilə eyni şərtlərdə aparılırsa, eyni dəyişmə üçün təxminən iki dəfə böyük qiymət alınacaqdır.  $B_{12}-CCC$ -də LDA və GGA arasındakı diapazon  $B_{11}C-CBC$ -dən daha genişdir. Bu,  $B_{11}C-CBC$  modifikasiyasının fiziki optimallaşdırılmasına daha yaxşı yaxınlaşma kimi şərh olunur. Eksperimental nəticələr LDA və GGA nəticələri arasında təqdim olunan diapazonlar eynilik təşkil edir. Bütövlükdə nisbətən kiçik bir dəyişmə diapazonu o deməkdir ki,  $B_4C$  kristalındakı defekt növü elektron sıxlığında cüzi dəyişiklik yaradır. Eyni zamanda, belə bir nəticəyə gəlmək olur ki, kiçik temperatur qradienti olan ərazilərdə  $B_4C$  komponenti ilə hazırlanmış materiallar reaktorun divarlarından helium və ya hidrogenin çıxarılması üçün uyğun ola bilər. Bu qənaətdə gəlmək üçün əsas səbəb  $B_4C$  materialının aşağı elektron sıxlığı və

böyük sərbəst həcmələri ilə bağlıdır.

Təqdim olunan **fəsilədə** 167 MeV enerjili  $^{132}\text{Xe}$  ionları ilə otaq temperaturunda bor nitrid, bor silikat, bor karbid və bor oksid kristalları  $5.0 \times 10^{12}$  ion/sm<sup>2</sup>,  $5.0 \times 10^{13}$  ion/sm<sup>2</sup> və  $3.83 \times 10^{14}$  ion/sm<sup>2</sup> seldə şüalanmadan sonra istilik sel funksiyası və istilik tutumu tədqiq olunmuşdur. Ağır ionların hədəf nümunələrlə qarşılıqlı təsiri və səth morfologiyasında baş verən defektəmələgəlmə mexanizminin temperatur kinetikasi ən effektiv öyrənilməsi aşağı temperatur qiymətlərində tədqiq edildiyi üçün tədqiqat materiallarının əsas istiqaməti məhz bu temperatur intervalına yönəldilmişdir. İstilik selinin funksiyası olan DSC əyriləri şüalanmamış bor nitrid və bor oksid kristalları üçün müxtəlif hallarda mövcud spektrləri şəkil 17-də verilmişdir.

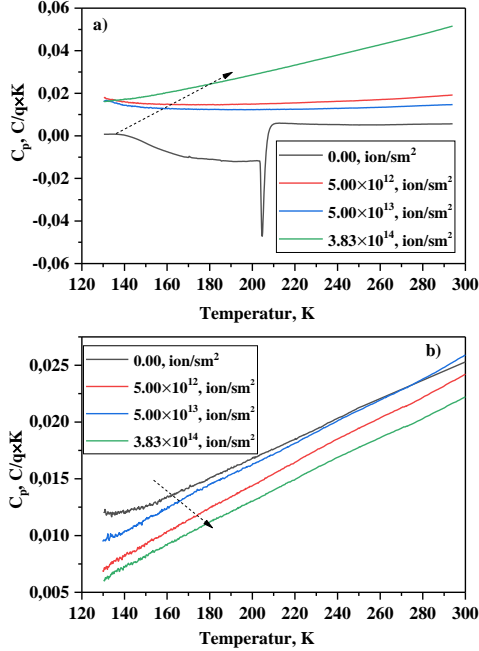


Şəkil 17.  $120 \leq T \leq 300 \text{K}$  temperatur intervalında  $5.0 \times 10^{12}$  ion/sm<sup>2</sup>,  $5.0 \times 10^{13}$  ion/sm<sup>2</sup> və  $3.83 \times 10^{14}$  ion/sm<sup>2</sup> sel sıxlığında şüalandırılmış bor nitrid a) və bor oksid b) kristallarının istilik selinin temperatur asılılığı.

Alınmış spektrlərdə istilik selinin termik kinetikasının analiz edilməsi və istilik funksiyasının temperaturdan asılı olaraq  $120 \leq T \leq 300\text{K}$  verilmiş aralıqda təhlili aparılmışdır. Hər iki tədqiqat nümunəsində istilik selinin qiyməti  $-2 \text{ mW}$  ilə maksimum  $2 \text{ mW}$  arasında dəyişir. İstilik selinin başlanğıc və son qiymətləri, istilik sürəti (nümunənin arqon mühitində qızma sürəti), kütləsi və kalibirləşmə faktorlarını nəzərə alsaq istilik kinetikasının mexanizmi haqqında müəyyən analitik fikirlər söyləmək mümkündür. Bor nitrid və bor oksid kristallarında DSC kinetikasi müxtəlif sel sıxlıqlarına malik ağır ionları ilə şüalandırıldıqdan sonra termik region olaraq heç bir hissələrə ayrılmır. Lakin şüalanmamış bor nitrid kristalında mərkəzi piki  $217\text{K}$ -ə uyğun gələn və  $135\text{K}$ -dən  $190\text{K}$ -ə qədər olan temperatur intervalında istilik selinin qiyməti artır həmin temperatur intervalında kristalın xüsusi istilik tutumu monoton şəkildə artır. Amma mərkəzi piki  $217\text{K}$  olan faza keçidinin xüsusi istilik tutumunun yox, həmin effektin bir sıra termofiziki parametrlərinin (xüsusi istilik tutumu  $3.02 \text{ C/q} \times \text{K}$ , aktivləşmə enerjisi  $0.23 \text{ C} \times \text{mol}$  və entalpiyası  $0.0213 \text{ C/q}$ ) dəyişməsinə göstərmək olar. Şüalanmadan sonra mərkəzi piki  $217\text{K}$  olan effektlərin termofiziki parametrlərinin qarşılıqlı müqayisəsi göstərir ki, ağır ionların təsiri altında baş verən kinetika daha mürəkkəb mexanizimlə dəyişir. Şüalanmamış bor nitrid kristalında istiliyin ötürülməsi və selinin dəyişməsi hər iki şüalanmadan sonra tamamilə fərqlənir.

Bor nitrid və bor oksid kristalında  $120 \geq T \geq 300\text{K}$  temperatur intervalında istilik selinin ötürülməsi fərqli fazalarda dəyişir. Fərqli fazada dəyişən istilik kinetikasi xüsusi istilik tutumu ilə izah edilir. Şüalanmış kristal üçün alınmış spektrlərindəki kinetika xətti qanunauyğunluq ilə dəyişir və baş verən bütün termofiziki proseslər mexanizmi istilik tutumu ilə izah olunur.  $120 \leq T \leq 300\text{K}$  temperatur intervalında  $5.0 \times 10^{12} \text{ ion/sm}^2$ ,  $5.0 \times 10^{13} \text{ ion/sm}^2$  və  $3.83 \times 10^{14} \text{ ion/sm}^2$  selində şüalandırılmış bor nitrid və bor oksid birləşmələrinin xüsusi istilik tutumunun temperatur asılılığı verilmişdir (şəkil 18). Şüalanmamış bor nitrid kristalında istilik tutumunun qiyməti  $T \leq 210\text{K}$  temperatur aralığında artdığı müşahidə olunmuşdur. Mərkəzi piki  $217\text{K}$  uyğun gələn faza keçidində şüalanmamış nümunənin istilik

tutumunun qiyməti 0.007-0.013 C/q×K intervalında dəyişir.



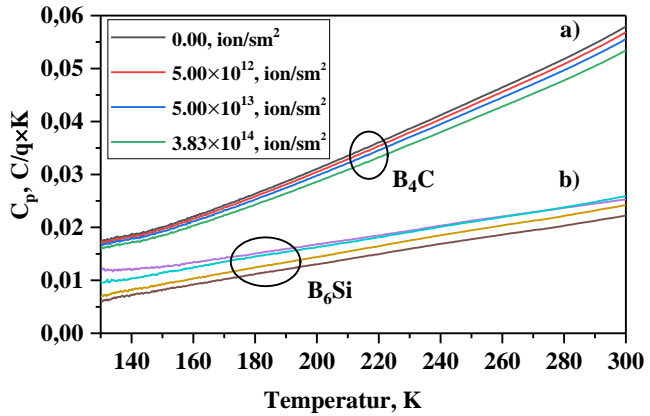
Şəkil 18.  $120 \leq T \leq 300$  K temperatur intervalında  $5.0 \times 10^{12}$  ion/sm<sup>2</sup>,  $5.0 \times 10^{13}$  ion/sm<sup>2</sup> və  $3.83 \times 10^{14}$  ion/sm<sup>2</sup> sel sıxlığında şüalandırılmış bor nitrid a) və bor oksid b) kristalının xüsusi istilik tutumunun temperaturdan asılılığı.

Həmçinin ağır ionla şüalanmadan əvvəl xüsusi istilik tutumunun qiyməti 0.0053 C/q×K qədər artır və 200 K-dən başlayaraq 300 K-dək olan temperatur intervalında sabit qiymətin alır. Lakin  $5.0 \times 10^{12}$  ion/sm<sup>2</sup> və  $5.0 \times 10^{13}$  ion/sm<sup>2</sup> intervalda istilik tutumunun qiymətinin dəyişməsi kiçikdir və qeyd olunmuş temperatur intervalında xüsusi istilik tutumunun qiyməti 0.0127 C/q×K və 0.0153 C/q×K aralığında artır.  $3.83 \times 10^{14}$  ion/sm<sup>2</sup> şüalanma halında istilik tutumunun qiyməti 0.0165 C/q×K - 0.0515 C/q×K aralığında dəyişir. Aydınır ki, istilik tutumunun qiyməti şüalanmamış,  $5.0 \times 10^{12}$  ion/sm<sup>2</sup> və  $5.0 \times 10^{13}$  ion/sm<sup>2</sup> sel sıxlıqlarında şüalanmış nümunələrdə sabitdir. Müəyyən olunmuşdur ki,  $5.0 \times 10^{12}$  ion/sm<sup>2</sup>,  $5.0 \times 10^{13}$  ion/sm<sup>2</sup> və  $3.83 \times 10^{14}$  ion/sm<sup>2</sup> sel sıxlığına malik ağır ionlarla şüalandırılmış bor oksid kristalının xüsusi istilik tutumunun qiymətini

$120 \leq T \leq 300\text{K}$  temperatur intervalında aşağıdakı kimi qeyd etmək mümkündür.

- Şüalanmamış bor oksid kristalı;  $0.0125 \leq C_p \leq 0.0262 \text{ C/q} \times \text{K}$
- $5.0 \times 10^{12} \text{ ion/sm}^2$ ;  $0.0099 \leq C_p \leq 0.025 \text{ C/q} \times \text{K}$
- $5.0 \times 10^{13} \text{ ion/sm}^2$ ;  $0.007 \leq C_p \leq 0.024 \text{ C/q} \times \text{K}$
- $3.83 \times 10^{14} \text{ ion/sm}^2$ ;  $0.006 \leq C_p \leq 0.022 \text{ C/q} \times \text{K}$

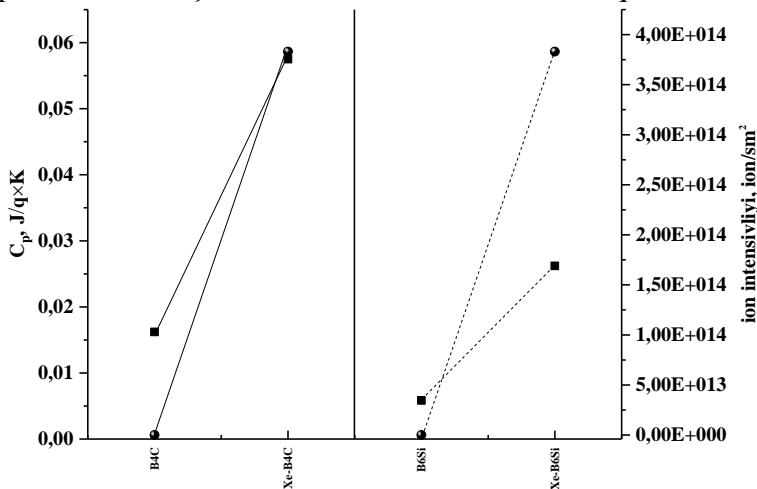
Bor nitrid və bor oksid kristalında istilik tutumunun dəyişməsinin kinetikasının, sürətli ağır ionlarla şüalandıqda dəyişən istilik mexanizminə bənzədiyi müəyyən edilmişdir. Əldə edilən təcrübə nəticələri aşağı temperaturda bor nitridə istiliyin ikili mexanizm vasitəsi ilə baş verdiyini göstərir. Eksperimental araşdırmalarımızda bor karbid kristalında ağır ionlarla şüalanmadan sonra  $120 \geq T \geq 146\text{K}$  temperatur intervalında istilik selinin ötürülmə mexanizmi kiçik sürətli,  $146 \geq T \geq 300\text{K}$  daha aktiv fazada baş verir. Həmçinin  $\text{B}_6\text{Si}$  kristalı üçün istilik selinin ötürülməsi bor karbidə baş verən mexanizmlə eynilik təşkil etməkdədir. Xətti qanuna uyğunluğuna görə dəyişən kinetikada faza dəyişikliyi müşahidə olunmur, istilik selinin qiyməti  $\text{B}_6\text{Si}$  üçün  $-1.4 \text{ mW}$ ,  $\text{B}_4\text{C}$  üçün isə  $3.0 \text{ mW}$  qədər azdır. Bütün termofiziki proseslər müəyyən intervalda dəyişən istilik tutumu üzərində qurulur və bir -biri ilə qarşılıqlı əlaqəlidir. Şəkil 19 -da bor karbid və bor silikat kristalları üçün  $120 \leq T \leq 300\text{K}$  temperatur intervalında müxtəlif şüalanmalarda  $5.0 \times 10^{12} \text{ ion/sm}^2$ ,  $5.0 \times 10^{13} \text{ ion/sm}^2$  və  $3.83 \times 10^{14} \text{ ion/sm}^2$  xüsusi istilik tutumunun temperatur asılılığı göstərilmişdir. İstilik selinin temperaturdan asılılığı kinetika istilik tutumunun temperaturdan asılılığında təzahürünü əks etdirir. İstilik tutumunun temperatur asılılığından aydın olur ki,  $\text{B}_4\text{C}$  müxtəlif sel sıxlıqlı ionların təsirinə məruz qaldıqda  $120\text{K}$  temperaturda  $0.0170-0.0176 \text{ C/q} \times \text{K}$  bərabərdir. Bununla belə, yüksək enerjili ağır ionlarla şüalanmış bor karbidə xüsusi istilik tutumunun qiyməti  $0.016 \text{ C/q} \times \text{K}$ -ə dəyişir. Proses ağır ionlarla qarşılıqlı təsir mexanizminin kinetikasi ilə bağlıdır ki, səth morfologiyasının amorfizasiyası istilik yayılmasının kinetikasına təsir edir. Həmçinin müəyyən edilmişdir ki,  $\text{B}_6\text{Si}$  kristalları şüalanmamış və şüalanma selindən asılı olmayaraq, istilik keçiricilik mexanizmi bor karbidən bir qədər fərqlənir.



Şəkil 19.  $120 \leq T \leq 300 \text{ K}$  temperatur intervalında  $5.0 \times 10^{12}$   $\text{ion/sm}^2$ ,  $5.0 \times 10^{13}$   $\text{ion/sm}^2$  və  $3.83 \times 10^{14}$   $\text{ion/sm}^2$  sel sıxlığında şüalandırılmış bor karbid a) və bor silikat b) kristallarının xüsusi istilik tutumunun temperatur asılılığı.

$\text{B}_6\text{Si}$  kristalında istiliyin paylanma mexanizmi xəttidir. Xüsusi istilik tutumunun kinetikasi  $\text{B}_4\text{C}$  və  $\text{B}_6\text{Si}$  üçün şəkil 20-də verilmişdir. Xüsusi istilik tutumunun dəyişməsinin kinetikasi göstərir ki, bor karbid birləşməsi  $120 \leq T \leq 300 \text{ K}$  temperatu intervalında sürətli ağır ionlara məruz qaldıqda 3,59 dəfə artırır. Bor silisium tədqiqat kristalı üçün, xüsusi istilik tutumunun ağır ionlar tərəfindən 4,42 dəfə artır. Təcrübələr bor silisium kristalında xüsusi istilik tutumunun qiymətinin daha sürətlə artdığını göstərir. Bundan əlavə, bütün eksperimental təcrübələrdə ağır ionlar ilə şüalanmadan sonra daha aktiv fazada xüsusi istilik tutumunun dəyişməsi bir-birini tam şəkildə tamamlayır. Şüalanmamış bor karbid kristalı üçün istilik keçiriciliyinin qiymətləri  $120\text{-}300 \text{ K}$  temperatur intervalında  $0.0206 \text{ Vt/sm} \times \text{K}$ -dən  $0.0674 \text{ Vt/sm} \times \text{K}$ -a qədər artır.  $120\text{-}300 \text{ K}$  temperatur intervalında müəyyən olunmuşdur ki, Xe ağır ionları ilə şüalanma zamanı bor karbid üçün  $5.0 \times 10^{12}$   $\text{ion/sm}^2$ ,  $5.0 \times 10^{13}$   $\text{ion/sm}^2$  və  $3.83 \times 10^{14}$   $\text{ion/sm}^2$  sellərdə istilik keçiriciliyi  $0.0193\text{-}0.0659 \text{ Vt/sm} \times \text{K}$ ,  $0.0188\text{-}0.0645 \text{ Vt/sm} \times \text{K}$  və  $0.0181\text{-}0.0619 \text{ Vt/sm} \times \text{K}$  aralığında artır. Bununla belə, ağır ion şüalanması altında bor silisid nümunəsi üçün istilik keçiriciliyinin qiymətləri şüalanmamış kristalı üçün  $120 \text{ K}$ -dən  $300 \text{ K}$ -ə qədər olan temperatur intervalında  $0.014\text{-}$ dən  $0.026 \text{ Vt/sm} \times \text{K}$

-ə qədər artır.  $5.0 \times 10^{12}$  ion/sm<sup>2</sup>,  $5.0 \times 10^{13}$  ion/sm<sup>2</sup> və  $3.83 \times 10^{14}$  ion/sm<sup>2</sup> sel sıxlığında şüalanmış bor silisid kristalı üçün 120-300K temperatur intervalında istilik keçiriciliyi 0.0112-0.026 Vt/sm×K, 0.005-0.024 Vt/sm×K və 0.006-0.022 Vt/sm×K qiymətlərinə malik olmuşdur. Bor karbid və bor silisid şüalanma nəticəsində əmələ gələn dəşiklər C-C və Si-Si atomları arasında rəqs edir. Məsələlərin paylanma mexanizminə görə onlar C-C və Si-Si zəncirləri, həmçinin bor karbon qovşağındakı ikosahedral zəncir boyunca hərəkət edirlər. Bir fazalı bor əsaslı birləşmələrdə dəşiklərin hərəkəti yalnız iki karbon atomu və interikoshadera zənciri arasında dəyişir. Yüksək temperaturda keçid mexanizmi bor karbid birləşməsi üçün istilik keçiriciliyinin 0.1-dən 0.01 Vt/sm×K qədər azaldığı daha aydındır. Ancaq təcrübələrimizdə kiçik temperaturalarda keçiricilik mexanizmi tamamilə fərqlidir.



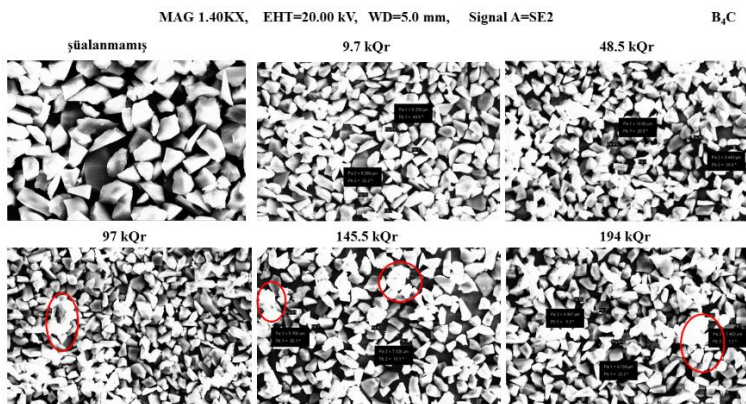
Şəkil 20. Müxtəlif sel sıxlığında ağır ionlarla şüalanmış B<sub>4</sub>C və B<sub>6</sub>Si kristallarında xüsusi istilik tutumunun  $120 \leq T \leq 300$  K temperatur intervalında kinetikasi.

Quruluş strukturuna görə, aşağı temperaturda istilik keçiriciliyi qəfəs parametrlərinin dinamikasından asılıdır. Şüalanmadan sonra bor karbid və bor silisid kristallarında istilik keçiriciliyinin qiyməti artır. Bu zaman şüalanmadan sonra istilik daşımada karbon və silisium atomları ətrafında əmələ gələn radikallar iştirak edir. Şüalanmadan sonra B<sub>4</sub>C və B<sub>6</sub>Si kristalında

istilik keçiriciliyi artır, istilik daşıyıcısı şüalanmadan sonra karbon və silisium atomları ətrafında yaranan radikallar da iştirak edir. Lakin kiçik temperaturlarda rekombinasiya sürəti daha zəif olduğu üçün bu aydın nəzər çarpmır. Əlbəttə ki, istilik keçiriciliyi pozulmuş quruluş strukturu ilə ötürülür. Həmdə kiçik temperaturlarda rekombinasiya sürətinin önəmli faktor olduğu nəzərə alınmalıdır. Həmçinin nəzərə alınmalıdır ki, kiçik temperaturda rekombinasiya dərəcələri mühüm amildir və amorf strukturda termik daşımının kiçik sürəti, strukturda təkrarlanan zəncirvari davranışdan asılıdır. Buna baxmayaraq,  $T \geq 179\text{K}$  kiçik temperaturda ağır ionlarla  $5.0 \times 10^{12}$  ion/sm<sup>2</sup>,  $5.0 \times 10^{13}$  ion/sm<sup>2</sup> və  $3.83 \times 10^{14}$  ion/sm<sup>2</sup> şüalandırılmış bor karbid üçün termodiffuziya qiyməti müvafiq olaraq 0.475 sm<sup>2</sup>/san, 0.462 sm<sup>2</sup>/san və 0.397 sm<sup>2</sup>/san qədər azalır. Bor silisid kristalında müxtəlif ağır ionlarla fərqli sellərdə termodiffuziya qiyməti 0.35-0.47 sm<sup>2</sup>/san, 0.36-0.46 sm<sup>2</sup>/san və 0.38-0.49 sm<sup>2</sup>/san olmuşdur.

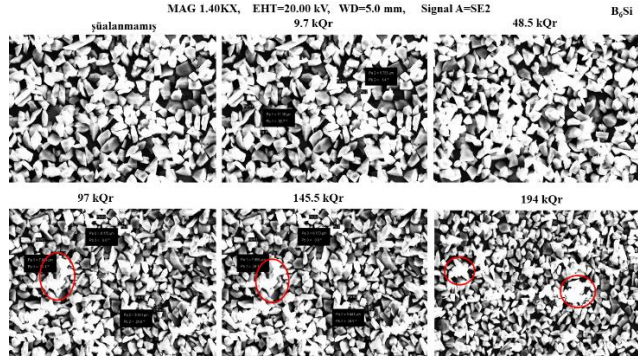
Dissertasiya işinin **altıncı** fəslində B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, B<sub>4</sub>C, B<sub>6</sub>Si və BN kristalları 1.25 MeV enerji xəttinə malik doza gücü D=0.27 Qr/san olan <sup>60</sup>Co izotopu ilə 9.7 kQr, 48.5 kQr, 97 kQr, 145.5 kQr və 194 kQr udulma dozalarında şüalandırılmış və differensial scanedici kalorimetrik metod ilə termofiziki xassələri öyrənilmişdir. Qamma şüalanmanın kiçik və yüksək udulma dozalarından asılı olaraq termodinamik funksiyalar, kristallik quruluşda energetik səviyyələrin artmasının rəng mərkəzləri ilə izahı, amorflaşma fazasına keçid, nümunədə yaranmış aktiv mərkəzlər, kristal üzərində yaranan oksid təbəqələrinin qalınlığı və formalaşmış defektlərin kinetik əsaslandırılması verilmişdir. Qamma udulma dozalarında asılı olaraq Janderson ayrılığının B<sub>4</sub>C və B<sub>6</sub>Si kristallik quruluşlarında temperaturdan asılı olaraq dəyişməsi geniş təhlil edilmişdir. Şəkil 21-24- də təmizlik dərəcəsi 99.5% bor karbid, 99,8 % bor silikat, 99.2% bor nitrid və bor oksid birləşməsinin müxtəlif dozalarında şüalandırılmış nümunələrin səth morfolojiyası göstərilmişdir. Xüsusi laboratoriya şəraitdə tətqiq olunan kristallarda karbon nazik təbəqələrin üzərinə 1-3 mm qalınlığında bircins paylanma şərti ilə əlavə edilərək yüksək vakuum səviyyəsində olan eksperimental kameraya yerləşdirilir. SE2 detektoru vasitəsi ilə elektron selinin

enerjisi səth relyefinə görə kiçik addımlarla artırılır, hissəciklərin paylanması və ölçü paylanması haqqında müfəssəl məlumat əldə olunur. Şüalanma dozasından asılı olaraq amorflaşma izlərinə rast gəlinir, 97 kQr, 145.5 kQr və 194 kQr qırmızı dairələrlə qeyd olunmuşdur. Kiçik udulma dozalarında amorflaşma izlərinə rast gəlinmir. Bor karbid üçün müəyyən olunmuşdur ki, mikro kristalların ölçüləri 5-7  $\mu\text{m}$  intervalında dəyişir. Bor karbid nümunəsinin malik olduğu xüsusi sərtlik dərəcəsi, aktiv səth tərəfindən atmosferdən absorbsiya olunmuş su molekullarının birləşdirilməsi verilmiş ölçüdə müşahidə olunmur və hissəciklər tamamilə bir birindən fərqli şəkildə yerləşir.



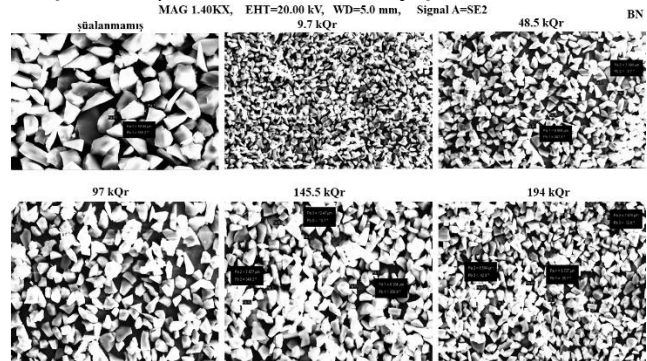
Şəkil 21. B<sub>4</sub>C kristalında 9.7 kQr, 48.5 kQr, 97 kQr, 145.5 kQr və 194 kQr udulma dozalarında şüalandırılmış səth morfologiyası.

Şəkil 22-də B<sub>6</sub>Si kristalında SE2 detektoru ilə 20.00 keV elektronlar ilə alınmış səth morfologiyası verilmişdir. Səth morfoloji xüsusiyyətinə görə silisium borid kristalında hissəciklərin paylanması müxtəlifdir. Şəkildən aydın müşahidə olunur ki, bor və onun müxtəlif birləşmələrində spiral şəkilli formalaşma yoxdur. Spirall şəkilli formalaşma daha çox ortorombik birləşmələrdə rast gəlinir.



Şəkil 22. B<sub>6</sub>Si kristalında 9.7 kQr, 48.5 kQr, 97 kQr, 145.5 kQr və 194 kQr udulma dozalarında şüalandırılmış səth morfologiyası.

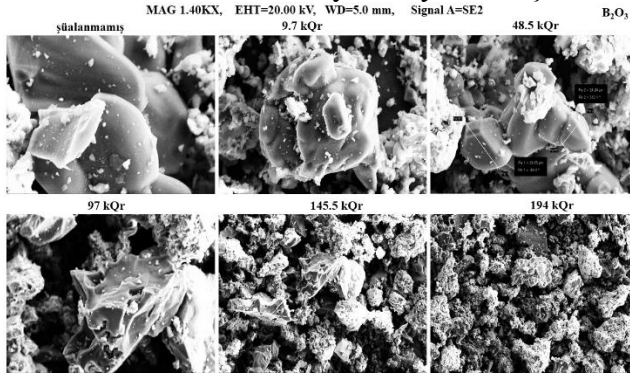
Bor karbid kristalında fərqli olaraq bor silikat birləşməsində 48.5 kQr qamma udulma dozəsindən başlayaraq amorflaşma izlərinə müşahidə olunur. Qamma şüaların təsiri altında amorflaşma mexanizmi bor karbid kristalında fərqli olaraq daha zəif fazada baş verir. Böyüdülmüş sahədə, seçilmiş nöqtələrdə aparılan ölçü təyini göstərir ki, B<sub>6</sub>Si kristalında heç də hissəciklər eyni ölçüdə olmayıb müxtəlif ölçülərdə səth boyu paylanmışdır. Bor silikat mikro kristalların orta ölçü 5-80 µm intervalında dəyişir.



Şəkil 23. BN kristalında 9.7 kQr, 48.5 kQr, 97 kQr, 145.5 kQr və 194 kQr udulma dozalarında şüalandırılmış səth morfologiyası.

Digər tərəfdən bor nitrid kristalında səth morfologiyası bor karbid və bor silikatda olduğu ilə eynilik təşkil edir (şəkil 23). Seçilmiş nöqtələrdə aparılan ölçü təyini göstərir ki, bor-nitrid kristalında heçdə hissəciklər eyni ölçüdə olmayıb müxtəlif ölçülərdə səth boyu paylanmışdır. Bor-nitridə

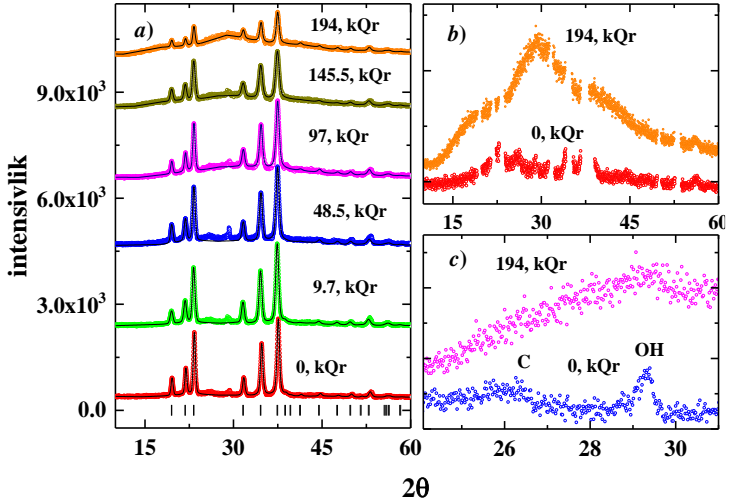
ölçü  $52 \div 120$   $\mu\text{m}$  intervalındadır. Amorflaşma fazasının formalaşması müşahidə olunmur. Şəkil 24-də nano ölçülü  $\text{B}_2\text{O}_3$  kristalında səth morfologiyası qamma şüalanma dozəsindən asılı olaraq verilmişdir. 500 nm intervalında tədqiq olunmuş sahədə 9.7 kQr-48.5 kQr doza intervalında kristalların səthində nəzərə çarpaçaq dəyişiklik baş vermir. 97 kQr udulma dozəsindən başlayaraq 194 kQr maksimum udulma dozəsində səthin deqredasiya mexanizmi atomar səviyyədə laylı pozulmuş strukturun formalaşma mexanizmi yaradır. Aparılan təcrübələrlə müəyyən olunmuşdur ki, kristallarda ölçü 32  $\mu\text{m}$  başlayaraq maksimum 120  $\mu\text{m}$  ölçülü hissəciklərə rast gəlinir. SEM tədqiqatlarından məlum olmuşdur ki, bor silikat, bor karbid, bor nitrid və bor oksid kristallarında hissəciklərin ölçülərin paylanması müxtəlifdir. Həmçinin müəyyən olunmuşdur ki, kristallarda aparılan tərkib analizi zamanı kiçik nisbətlərdə qatışıq elementlərin olması aşkar edilib. SEM tədqiqatlarından müəyyən olunmuşdur ki, 145.5 kQr qamma şüalarla şüalandırıldıqdan sonra səthdə amorflaşma izlərinə rast gəlinir və 194 kQr udulma dozələrindən sonra amorflaşma aydın şəkildə seçilir. Bor karbid kristalı üçün 100  $\mu\text{m}$  seçilmiş hissədə elementlərin xəritələnmə analizi yerinə yetirilmişdir.



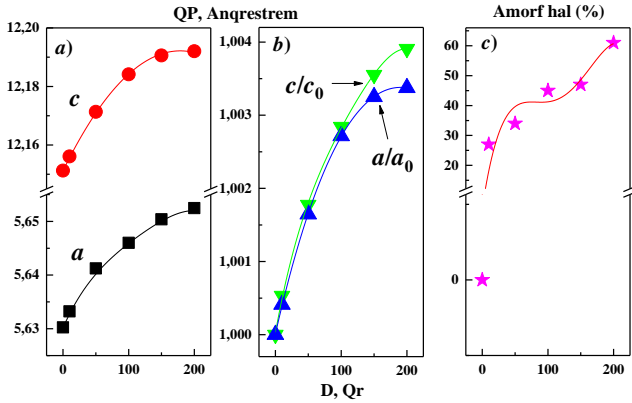
Şəkil 24.  $\text{B}_2\text{O}_3$  kristalında 9.7 kQr, 48.5 kQr, 97 kQr, 145.5 kQr və 194 kQr udulma dozələrində şüalandırılmış səth morfologiyası.

Şüalanmamış və fərqli müddətlərdə şüalanmış kristallarda səthdə hissəciklərin və kimyəvi elementlərin dəyişmə dinamikası verilmişdir. Şüalanmamış kristalda elementlərin xəritələnməsində hissəciklərin və elementlərin paylanması homogen formaya yaxın olmasına baxmayaraq, seçilmiş zaman intervalında şüalandırılmış kristallarda elementlərin

xəritələnməsi fərqlidir. İlk baxışdan səthdə hissəciklərin paylanması daha çox heterogen şəkildə olması aydın formada seçilir. Şüalanmadan sonra elementlərin xəritələnməsində əsas mexanizmin şüalanma müddətinin artması ilə C, Si, Ca və O elementlərinin daha çox birləşməsi yəni bir hissədə və yaxud müxtəlif hissələrdə geniş şəkildə toplanmasıdır. SEM tədqiqatlarından alınan nəticələrdən əlavə B<sub>4</sub>C və B<sub>6</sub>Si kristallarında struktur analizləri yerinə yetirilmişdir. Şüalanmadan əvvəl və müxtəlif udulma dozalarında şüalandırıldıqdan sonra B<sub>4</sub>C kristal quruluşunun rentgen difraksiyası spektrləri şəkil 25.a-da verilmişdir. Difraksiya spektrlərindən B<sub>4</sub>C kristal quruluşu *R-3m* fəza qruplu romboedrik simmetriyaya malikdir ki, bu da əvvəlki tədqiqat nəticələrinə uyğun gəlir. 194 kQr udulma dozasında şüalandırılma zamanı alınmış difraksiya spektrlərdən görünür ki, şüalanma dozası artdıqca spektrlərin fonunda dəyişiklik baş verir. Bu da, şüalanmanın təsiri ilə kristal quruluşun dağılmasına və amorflaşmanın baş verməsinə uyğun gəlir. Şəkil 25.b-də şüalanmamış və ən yüksək şüalanma dozasında alınmış spektrlərin fonlarının müqayisəsi göstərilmişdir. Rentgen difraksiyası spektrlərində 25-30° intervalında B<sub>4</sub>C birləşməsinin struktur quruluşuna aid olmayan maksimumlar müşahidə edilmişdir (Şəkil 25.c). Analiz nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, bu maksimumlar grafit və O-H qruplarına uyğun gəlirlər. Qrafitə uyğun gələn difraksiya pikləri 97 kQr şüalanmadan sonra, hidroksid qruplarına uyğun gələn difraksiya pikləri isə 194 kQr şüalanmadan sonra müşahidə olunmur. Normal atmosfer şəraitdə və otaq temperaturunda B<sub>4</sub>C kristalının qəfəs parametrlərinin qiymətləri  $a = 5.630(2) \text{ \AA}$  və  $c = 12.151(4) \text{ \AA}$  müəyyən edilmişdir. Qrafikdən göründüyü kimi 194 kQr udulma dozasına qədər strukturda quruluş faza keçidi baş verməmiş, yalnız qəfəs parametrlərinin qiymətlərində artma müşahidə edilmişdir ki, bu da qamma şüalarının təsiri ilə atomlar arası rabitələrin qırılması kimi izah edilir. Qəfəs parametrlərinin şüalanmanın udulma dozasından asılılıqları şəkil 26.a-da verilmişdir. Əyriyədən görünür ki, şüalanmanın kiçik dozalarında qəfəs parametrlərinin qiymətləri daha yüksək sürətlə artmasına baxmayaraq, 145.5 kQr udulma dozasında şüalanmadan sonra qəfəs parametrlərinin qiymətlərinin artma sürəti stabilləşir.



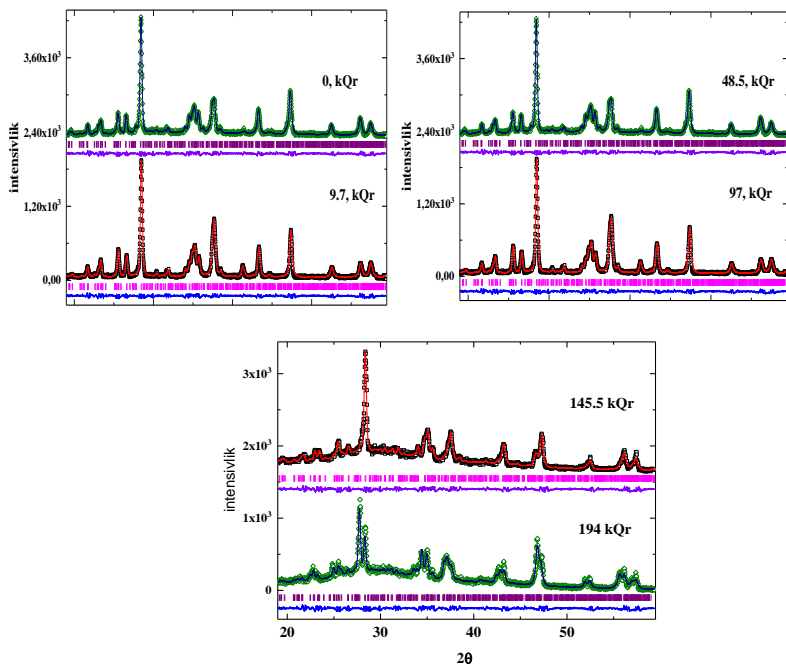
Şəkil 25. a) Müxtəlif udulma dozalarında şüalandırılmış  $B_4C$  kristalının otaq temperaturunda və normal atmosfer şəraitində rentgen difraksiyası spektrləri, b) Şüalanmamış və 194 kQr şüalanmış  $B_4C$  kristalının rentgen difraksiyası spektrlərinin fonu, c) Grafit və hidroksid qrupunun rentgen difraksiyası spektrləri.



Şəkil 26. a)  $B_4C$  kristalını qəfəs parametrləri, b)  $B_4C$  birləşməsinin nisbi qəfəs parametrləri, c)  $B_4C$  kristallarında amorflaşma mexanizminin şüalanma dozasından asılılığı.

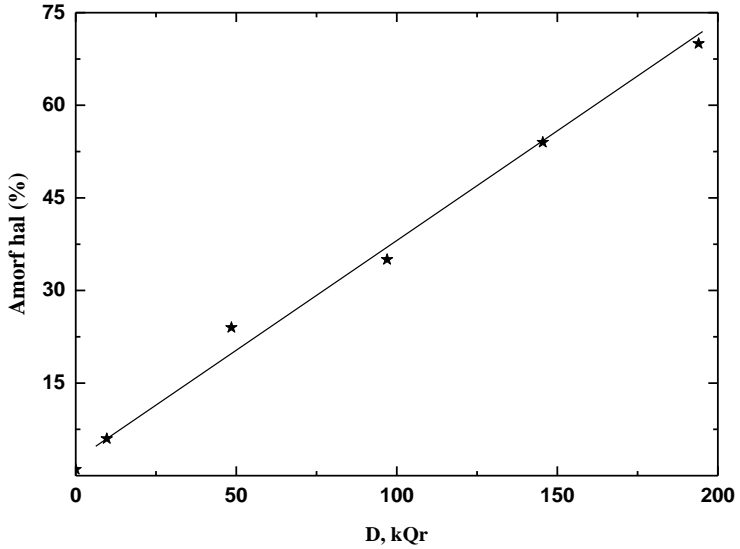
Hesab etmək olar ki, artıq 97 kQr udulma dozalarında şüalanma kristal qəfəsdə destabilizasiya, atomlar arası rabitələrin dağılması və struktur

dəyişikliyinə səbəb olur. 145.5 kQr udulma dozalarında şüalanmadan sonra bu proseslərdə stabilləşmə gedir. Qəfəs parametrlərin qiymətlərinin şüalanmadan asılılığından alınmışdır ki,  $c$  parametrinin qiyməti (0.39 %)  $a$  parametrinin qiymətinə (0.33 %) nəzərən daha çox artır. Bu hadisə onunla bağlıdır ki, uzun rabitələr daha zəif olduqlarına görə, xarici təsirlər nəticəsində qırılmağa daha çox meyilli olurlar. Qısa rabitələr ilə daha yüksək enerjiyə malik olduqlarına görə xarici təsirlərə qarşı da davamlılıq müşahidə etdirirlər. Qəfəs parametrlərinin şüalanmanın dozasında asılı olaraq dəyişmə mexanizmini daha aydın şəkildə göstərmək məqsədi ilə şəkil 26.b-də qəfəs parametrlərinin  $a/a_0$  və  $c/c_0$  nisbi qiymətlərinin şüalanmanın dozasından asılılıqları verilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, şüalanmanın dozası artdıqca piklərin genişlənməsi və fonun yaranmasına səbəb olur. Rentgen difraksiyası spektrlərində fonun sahəsinin tam inteqralı metodu ilə amorflaşmanın faiz nisbətinin şüalanmanın dozasından asılılığı təyin edilmişdir (şəkil 26.c). Alınan nəticələrdən aydın olur ki, 194 kQr udulma dozalarında şüalandırılmadan sonra  $B_4C$  kristallarında tam amorflaşma baş verməmiş, 38% kristal quruluş saxlanılmışdır.  $B_6Si$  kristalında otaq temperaturunda qamma kvantları ilə müxtəlif udma dozalarında şüalanması həyata keçirilmiş və şüalanmadan əvvəl və sonra nümunələr üçün alınmış struktur spektrləri şəkil 27-də göstərilmişdir. Şüalanmamış  $B_6Si$  kristalı üçün alınmış spektrlərdən aydın olur ki, birləşmə kristallik struktura malikdir. Şüalanmamış kristal üçün qəfəs parametrlərinin qiymətləri  $a = 14.0605(5)$  Å,  $b = 18.0279(2)$  Å və  $c = 9.2692(7)$  Å şəklindədir. Nəticələr göstərdi ki, normal atmosfer təzyiqində və otaq temperaturunda  $B_6Si$  kristalı  $Pnmm$  fəza qrupuna, ortorombik kristal quruluş simmetriyasına malikdir. Şüalanmamış bor silikat üçün alınmış eksperimental nəticələr digər tədqiqat nəticələri ilə eynilik təşkil edir.  $0 \leq D \leq 97$  kQr udulma doza intervalında qamma ilə şüalanmış kristalında difraksiya piklərində intensivliyin dəyişməsi müşahidə edilmişdir.  $B_6Si$  məxsus piklərin intensivliyində  $0 \leq D \leq 97$  kQr udulma dozasında spektrin dalğalanması müşahidə edildi.



Şəkil 27. 9.7 kQr, 48.5 kQr, 97 kQr, 145.5 kQr və 194 kQr qamma şüalanma ilə udulma dozalarında  $B_6Si$  kristalı üçün difraksiya spektrləri.

Piklərin intensivliyindəki dəyişiklik nümunələrin kristal struktur dəyişiklikləri ilə izah etmək olar. Verilmiş şüalanmalarda kristal struktur  $Pnnm$  fəza qrup simmetriyasını saxlayır. Bu azalma 1.2 MeV enerjili qamma kvantların təsiri altında baş verir və qəfəs parametrlərinin qiymətləri dəyişir (bəzi atomların ideal vəziyyətinə aiddir).  $D \geq 145.5$  kQr udulma dozısından başlayaraq  $B_6Si$  strukturunda qismən amorfizasiya mexanizmi başlayır. Nümunədə amorflaşma dərəcəsinə müəyyən etmək üçün şüalanmamış kristalın piklərinin hesabına formalaşan sahə şüalanmış kristalların piklərinin sahələrinə bölünür. Həmçinin  $D \geq 145.5$  kQr-dən sonra qamma adsorbsiya dozası artırıqda, spektrlərin bəzi difraksiya intensivliyi azalır. Şəkil 28-də qamma şüalanma dozısından asılı olaraq  $B_6Si$  kristalında amorfizasiya dərəcəsi göstərilmişdir. 145.5 kQr udulma dozusunda amorfizasiya dərəcəsi 54%, 194 kQr adsorbsiya dozası üçün 69 % müşahidə edilmişdir.



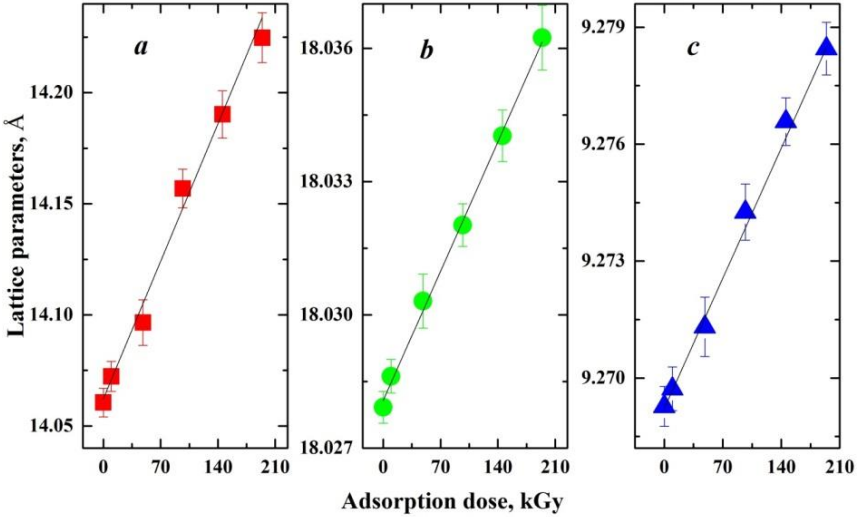
Şəkil 28. Qamma şüalanma dozəsindən asılı olaraq amorfizasiyası dərəcəsi.

Ritveld metodu ilə  $B_6Si$  kristalının qəfəs parametrləri hesablanmış, qamma şüalanmanın udulma dozalarından asılı olaraq qəfəs parametrlərinin qiyməti  $a=0,164 \text{ \AA}$ ,  $b=0,009 \text{ \AA}$ ,  $c=0,09 \text{ \AA}$ -ə qədər artır və kristal strukturun həcmi  $V=30,9 \text{ \AA}^3$  qiymətinə çatır. Şüalanmış  $B_6Si$  kristalda elementar qəfəsinin müşahidə olunan parametrlərinin və həcmnin dəyişməsi cədvəl 4-də verilmişdir.

Cədvəl 4. Müxtəlif udulma dozalarında şüalandırılmış  $B_6Si$  kristalında qəfəs parametrləri və həcmi.

Udulan doza, (kQr)	Qəfəs parametrləri və həcmi			
	$a, \text{ \AA}$	$b, \text{ \AA}$	$c, \text{ \AA}$	$V, \text{ \AA}^3$
0	14.060(6)	18.027(9)	9.269(2)	2349.(6)
9.7	14.072(2)	18.028(6)	9.269(7)	2351.(8)
48.5	14.096(5)	18.030(3)	9.271(3)	2356.(4)
97	14.156(9)	18.032(2)	9.274(2)	2367.(5)
145.5	14.190(2)	18.034(2)	9.276(5)	2373.(9)
194	14.224(7)	18.036(2)	9.278(4)	2380.(5)

Cədvəl 4-də alınan nəticələr göstərir ki, şüalanma dozası ilə qəfəs parametrləri artır, şüalanmamış kristal üçün qəfəs parametri 14.060 Å, 48,5 kQr və 194 kQr şüalanmadan sonra qəfəs parametrləri müvafiq olaraq 14,096 Å və 15,224 Å-ə intervalında dəyişir. Şüalanma dozasının artması ilə kristalın həcmi şüalanmadan əvvəl 2349 Å<sup>3</sup>-dən 48.5 kQr-də şüalanmadan sonra müvafiq olaraq 2356 Å<sup>3</sup> və 2380 Å<sup>3</sup>-ə qədər artmışdır. Qəfəsin həcmnin və parametrlərinin artması materialın xarici faktorların təsirini göstərir. B<sub>6</sub>Si kristalı qamma udma dozəsindən asılı olaraq a, b və c qəfəs parametrlərinin dəyişmə mexanizminin şəkil 29 -də verilmişdir.



Şəkil 29. B<sub>6</sub>Si qəfəs parametrlərinin adsorbsiya dozadan asılılıqları. Xətlər eksperimental məlumatların xətti funksiyalar polinomları ilə interpolasiyasıdır.

Şüalanma əmsalları aşağıdakı tənlik vasitəsi ilə hesablanmışdır.

$$K_i = \left( \frac{1}{a_{i0}} \right) \left( \frac{da_i}{dD} \right)_{P,T}$$

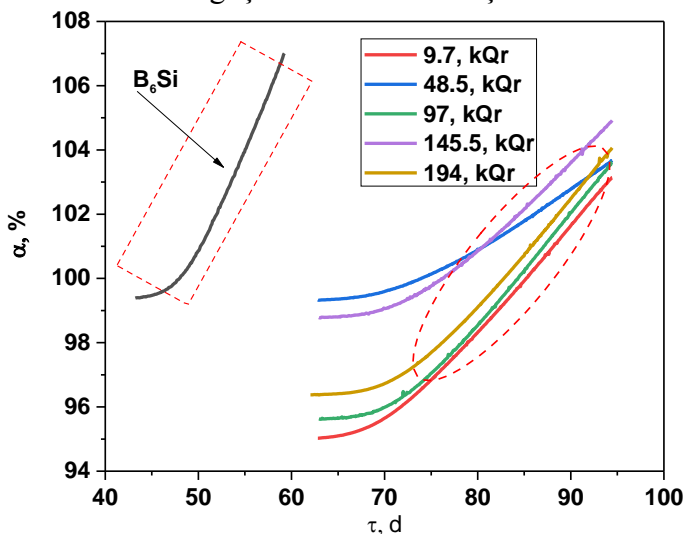
Hardaki,  $K_i$  genişlənmə əmsalı,  $a_{i0}$  şüalanmamış kristalın qəfəs parametrləri,  $a_i$  şüalanmış kristalın qəfəs parametrləri və  $D$  qamma şüalanma hesabına udulan doza qəbul edilir. Nəticədə  $K_i$  üçün alınan qiymətlər (qəfəs parametrlərini xətti genişlənməsi)  $k_a = 6.2 \times 10^{-5} \text{ kQr}^{-1}$ ,  $k_b = 2.3 \times 10^{-6} \text{ kQr}^{-1}$ , and  $k_c = 5.2 \times 10^{-6} \text{ kQr}^{-1}$  kimi təyin olunmuşdur. Sonuncu qrafikdən də görüldüyü kimi, qamma şüalanmasının udulma dozasının

artması  $B_6Si$  qəfəsinin həcmnin artması ilə nəticələnir. Bundan əlavə, qəfəsin həcmi  $V_0 = 2349$ . (6)  $\text{Å}^3$  dən  $V_{194 \text{ kQr}} = 2380$ . (5)  $\text{Å}^3$  dək artması qəfəsin həcmnin 1.31% faiz artımına göstərir. Qəfəs strukturunda qamma şüalanmasının təsiri nəticəsində faza keçidinin baş vermədiyi aydın olmuşdur. Qamma şüalanmanın intensivliyi və enerjisi atomların qəfəsdəki koordinatlarını dəyişir və uzaq nizamlılıq qanunauyğunluğu pozulur. Yüksək udulma dozasında qamma şüalanması kristalda miqrasiya edə bilən müxtəlif nöqtəvi defektlər və aktiv mərkəzlər formalaşır ki, növbəti paraqrafda bu haqqda geniş məlumat verilmişdir.

Qamma şüalarla şüalanmış  $B_4C$  kristalı (diametri 7 mkm, qalınlığı 200-500 nm və skan sürəti 600 nm/dəq) optik udma ölçüləri UV-V Gary 50 Scan spektrofotometrindən istifadə etməklə aparılmışdır. Optik udma spektrləri 200-800 nm dalğa uzunluğu intervalında toplanmışdır. F tip rəng mərkəzlərinin udma zolaqlarının 460 nm və M rəng mərkəzlərinin 700 nm müşahidə olunur.  $B_4C$  nümunəsinin əsas spektrindən 212 nm, 300 nm, 374 nm və 434 nm dalğa uzunluğunda aktivləşmə enerjisi 1.89 eV olan  $F^+$  rəng mərkəzləri müşahidə edilmişdir. Eyni udulma spektrində aktivləşmə enerjisi 0.1 eV ilə 561 nm və 648 nm-də iki M rəng mərkəzləri aşkar edilmişdir. 48.5 kQr qamma şüalandırıldıqdan sonra  $F^+$  rəng mərkəzlərinin udulmasını xarakterizə edən piklərin intensivliyi artır. Qamma şüalanma dozasının artması ilə  $F^+$  rəng mərkəzlərinin udulma spektrləri 145.5-dən 194 kQr-ə qədər artır. Bu artım yüksək şüalanma dozalarında daha sürətli olmuşdur. Bu təcrübədə aşağı qamma şüalanma dozalarında rəng mərkəzində F-dən  $F^+$ -a dəyişiklik baş vermədi, çünki şüalanma bütün nümunələr üçün otaq temperaturunda aparılıb. Həmçinin fəsilədə eksperimental tədqiqatlarda keramik materialların yüksək temperaturlarda oksidləşmə mexanizmi öyrənilmişdir.

$B_6Si$  birləşməsində oksidləşmə şüalanmamış və 9.7 kQr, 48.5 kQr, 97 kQr, 145.5 kQr, və 194 kQr udulma dozalarında şüalandırılmış kristal üçün uyğun olaraq  $T \geq 650^\circ C$  başlayır. Lakin  $T \leq 650^\circ C$  oblastında şüalanmanın udulma dozasından asılı olaraq kristalların kütləsində fərqli miqdarlarda parçalanmalar müşahidə olunur ki, bu da atmosfer şəraitində kristalların səthi tərəfindən asorbsiya olunmuş su buxarlarının parçalanması ilə bağlıdır. Oksidləşmə dərəcəsi udulma dozasından asılılığı əsasən iki hissədən ibarətdir; Qeyri izotermal oblast  $650 \leq T \leq 740^\circ C$  temperatur intervalında və

izotermal  $T \geq 740^\circ\text{C}$  başlayır. Oksidləşmənin kritik temperaturu nümunə üçün 9.7 kQr, 48.5 kQr, 97 kQr, 145.5 kQr və 194 kQr udulma dozalarında  $970^\circ\text{C}$  temperaturuna uyğundur. Qeyri izotermal oblastda kiçik miqdarda oksidləşmə faizi göstərir ki, oksidləşmə mexanizmi passiv xarakterlidir.  $\text{B}_6\text{Si}$  hissəciklərinin səthində maye  $\text{B}_2\text{O}_3$  təbəqəsinin formalaşması izotermal oblastda daha aktiv şəkildə baş verir. Şüalanmamış nümunədə oksidləşmə 3.5 % təşkil edirsə 194 kQr şüalandırılmış kristallarda 8.2 % bərabərdir. Eksperimental nəticələr göstərir ki, iki mexanizimli oksidləşmə prosesi baş verir. Kritik temperaturdan sonra  $\text{B}_6\text{Si}$  hissəciklərində aktiv fazada oksidləşmə prosesi tamamlanır. Oksidləşmə prosesinin kinetikasının və aktivləşmə enerjisinin təyini üçün prosesin zamandan asılılığı müxtəlif udulma dozalarında müəyyən olunmalıdır.  $\text{B}_6\text{Si}$  birləşməsi üçün zamandan asılı olaraq müxtəlif udulma dozalarında temperaturun artması ilə oksidləşmə dərəcəsinin asılılığı şəkil 30-də verilmişdir.

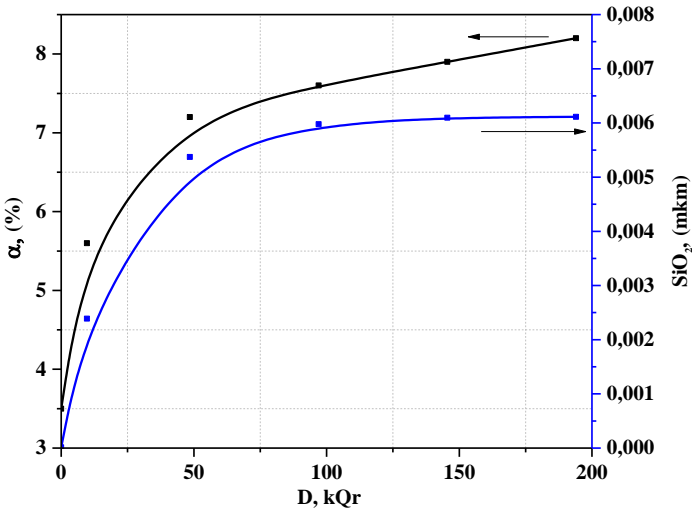


Şəkil 30.  $\text{B}_6\text{Si}$  nümunəsinin müxtəlif qamma şüalanma dozalarında  $650 \leq T \leq 1000^\circ\text{C}$  temperatur intervalında oksidləşmə dərəcəsinin zamandan asılılığı

$T \leq 650^\circ\text{C}$  qiymətlərdə bütün udulma dozalarında oksidləşmə dərəcəsinə qiymət təqribən bir-birinə bərabərdir. Həmçinin  $\text{B}_2\text{O}_3$  ərimə temperaturunda ( $T=450^\circ\text{C}$ ) kiçik qiymətlərdə oksidləşmə müşahidə olunmur. Çünki  $450 \leq T \leq 650^\circ\text{C}$  temperatur intervalı kristalda termik stabil

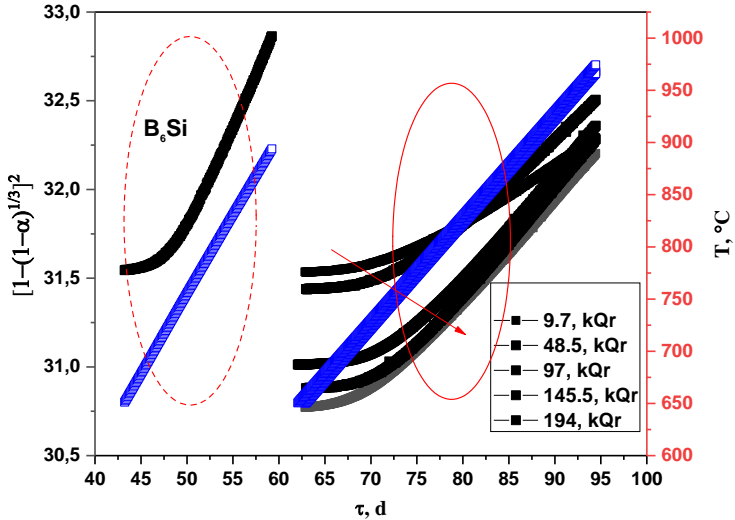
oblatdır və istilik selinin sürəti nümunədə hər hansı dinamik dəyişiklik yaramır. Şüalanmadan sonra B<sub>6</sub>Si kristalında T≤650°C kiçik temperaturda oksidləşməsi daha çox “qeyri izotermik oksidləmə” xarakterlidir. Lakin T≥740°C zamanın 70 dəqiqəsindən sonra udulma dozasından asılı olmayaraq bütün oblat 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 sürətinin təyini və kritik həddin səviyyəsini müəyyən edir. Səthdə yaranan oksidləşmə dərinliyi şüalanmanın udulma dozası və temperaturdan önəmli dərəcədə asılı olduğu kimi kristalın molyar kütləsindən, kimyəvi çevrilmədən sonra yaranan birləşmələrin molyar kütləsindən, hissəciyin xüsusi səth sahəsi və hissəciyin ölçüsündən asılıdır. Oksidləşmə reaksiyasında B<sub>6</sub>Si-dən B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> və SiO<sub>2</sub> kimyəvi keçidləri nəzərə alsaq səthdə yaranan oksid dərinliyini və hər bir udulma dozası üçün yaranan oksid dərinliyi hesablamaq olar. Şəkil 31-də oksidləşmə dərəcəsi və oksidləşmə dərinliyinin şüalanmanın udulma dozasından asılılığı verilmişdir.



Şəkil 31. 650≤T≤1000°C temperatur intervalında oksidləşmə dərəcəsi və oksidləşmə dərinliyi ilə qamma şüalanma dozasının əlaqəsi.

Gözlənilədiyi kimi oksidləşmə dərəcəsi və oksidləşmə dərinliyinin şüalanmanın udulma dozəsindən və temperaturdan asılı olaraq  $\alpha_\gamma + \alpha_T$  ikili mexanizm üzrə baş verir. Şüalanmanın 97 kQr udulma dozəsindən sonra həm oksidləşmə dərəcəsinə həm də səthdə yaranan oksid təbəqəsində stabil oblast başlayır. Bu asılılıq deməyə əsas verir ki,  $B_6Si$  birləşməsi üçün 97 kQr oksid təbəqəsi və oksidləşmə dərəcəsi üçün kritik həddir. Lakin şüalanmamış fərqli materiallarda “kritik hədd” faktor özünü müxtəlif qiymət və dərinliklərdə saxlayır. Həmçinin xüsusi səth sahəsinin oksidləşmə dərəcəsinə önəmli dərəcədə əhəmiyyətli faktor olması və maddənin kimyəvi cəhətdən təmizlik dərəcəsinin yüksək olması oksidləşmə amilinə ciddi təsir göstərir. Oksidləşmə prosesində xəttlik və stabil oblast müşahidə olunduğu kimi, həmin prosesin kinetikasi səthdə baş verən kimyəvi reaksiyanın mexanizmi ilə izah olunur.



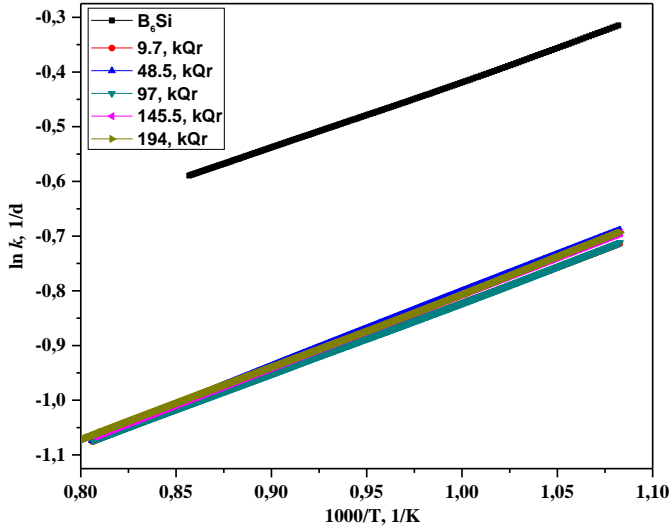
Şəkil 32.  $650 \leq T \leq 1000^\circ C$  temperatur intervalında müxtəlif qamma şüalanma dozalarında Jander əyriləri

Bir çox hallarda səthdə baş verən oksidləşmə təbəqəsinin mexanizmi müxtəlif qanuna uyğunluqlarla baş verir. Fiziki-kimyəvi proseslərdə kinetikanın izah olunmasında  $k$ -diffuziya sürəti əmsalından istifadə olunmaqla prosesin kinetikasi qurulur.  $B_6Si$  birləşməsi üçün  $650 \leq T \leq 1000^\circ C$  temperatur intervalında oksidləşmə kinetikasi Jander tənliyindən istifadə olunmaqla qurulmuşdur.

$$\left[1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{3}}\right]^2 = kt$$

Burada  $\alpha$ -oksidləşmə dərəcəsi,  $k$ - diffuziya sürətinin əmsalı and  $t$ - reaksiya müddəti. Şəkil 32 müxtəlif udulma dozalarında şüalandırılmış  $B_6Si$  birləşməsi üçün zamandan və temperaturdan asılı olaraq Jander ayrıləri qurulmuşdur. Göründüyü kimi müxtəlif udulma dozalarında şüalandırılmış  $B_6Si$  kristalı üçün  $650 \leq T \leq 1000^\circ C$  temperatur intervalında Jander ayrıləri iki hissəyə bölünür. Zamandan asılı olaraq temperaturun  $740^\circ C$  qeyri-xətti hissədə zəif diffuziyanın yəni passiv oksidləşmənin, xətti hissə isə oksidləşmə diffuziyasının aktiv fazada baş verdiyini xarakterizə edir. Yüksək udulma dozalarında və temperaturlarda oksidləşmə diffuziyasının daha böyük qiymət alması müəyyən olunmuşdur. Əlavə olaraq oksidləşmə reaksiyasında kütlənin artması ilə paralel  $B_2O_3$  və  $BO_2$  buxarlanma reaksiyası baş verir. Lakin buxarlanma reaksiyasının sürəti oksidləşmə reaksiyasının sürətindən zəyif olduğu üçün qamma şüalanmanın yüksək udulma dozalarında ayrılər daha böyük ədədi qiymətə malik olur.  $SiO_2$  buxarlanma reaksiyası  $223^\circ C$  olduğu üçün  $SiO_2$  yalnız oksidləşmənin diffuziya sürətinin artmasına səbəb olur. Daha dəqiq ifadə etsək  $B_2O_3 + SiO_2$  oksidləşmə reaksiyası  $B_2O_3$  və  $BO_2$  buxarlanma reaksiyasından daha böyük sürətlə baş verir. Şəkil 33-də şüalanmamış və müxtəlif udulma dozalarında şüalandırılmış  $B_6Si$  kristalında yaranan oksid təbəqəsi üçün Arrhenius ayrıləri verilmişdir. Bunun üçün oksidləşmənin diffuziya sürətinin  $\ln k$  logorifmik qiymətinin temperaturun əks qiymətindən  $1000/T$  asılılığı qurulmuşdur. Müəyyən olunmuşdur ki, şüalanmamış nümunə üçün 21.3 kC/mol və 9.7 kQr, 48.5 kQr, 97 kQr, 145.5 kQr və 194 kQr udulma dozaları üçün uyğun olaraq 41.5 kC/mol, 43.2 kC/mol, 45.3 kC/mol, 47.6 kC/mol, and 49.8 kC/mol qiymətlərini alır. Alınmış qiymətlərdən şüalanmamış  $B_6Si$  üçün alınan standart qiymətlərin nəticələrinə yaxındır. Aktivləşmə enerjisinin qiymətində baş verən dəyişmələr göstərir ki, müxtəlif zamanlarda şüalandırılmış  $B_6Si$  kristalı yüksək temperaturlarda oksidləşərək təmizlik dərəcəsinə müəyyən qədər itirir. Şəkil 33-da aktivləşmə enerjisinin şüalanmanın udulma dozısından asılılığı bir daha yuxarıda qeyd olunan eksperimental nəticələri təsdiq edir.  $B_4C$  kristalının müxtəlif qamma şüalanma dozası ilə şüalandırıldıqdan sonra kütlə kinetikasını xarakterizə edən TG ayrılərində otaq temperaturundan nümunələr  $1230K$ -ə qədər

qızdırılaraq əldə olunmuşdur (qızdırma sürəti 5 K/dəq və ölçmə çəkisi 13,5 mq).



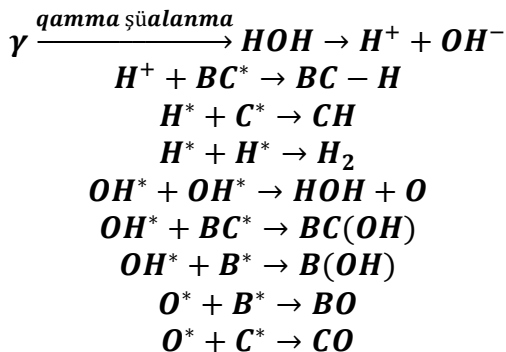
Şəkil 33.  $650 \leq T \leq 1000^\circ\text{C}$  temperatur intervalında müxtəlif qamma şüalanma dozalarında Arrhenius əyriləri

Şüalanma  $\text{B}_4\text{C}$  kristalının kütlə əyriləri müvafiq olaraq üç bölgəyə bölünür.

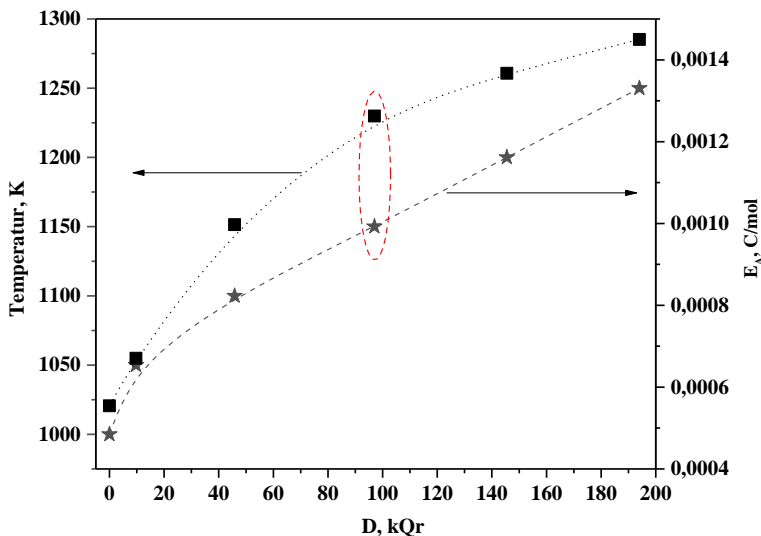
- ❖  $300 \leq T \leq 900\text{K}$  azalan oblast
- ❖  $900 \leq T \leq 950\text{K}$  sabit oblast
- ❖  $950 \leq T \leq 1250\text{K}$  artan oblast (oksidləşmə reaksiyası)

$\text{B}_4\text{C}$  kristalında qamma şüalanmasından sonra su buxarı ilə qarşılıqlı təsir sürəti artır və birləşmələrin absorbsiya xassələri artır. Lakin  $300 \leq T \leq 900\text{K}$  temperatur diapazonlarında su buxarları və solvotermal kimyəvi reaksiya ilə qarşılıqlı əlaqə haqqında məlumat verilir. Bundan əlavə, qamma şüalarının təsiri altında fiziki və kimyəvi proseslərin solvotermal kimyəvi reaksiyası mürəkkəbləşir. Digər tərəfdən, adsorbsiya edilmiş su molekulları mürəkkəb qamma şüalanma mexanizmi əsasında parçalanır. Yaranan hidrogen atomları və (OH) hidroksid qrupları struktur defektləri, həyəcanlanmış B atomları, sərbəst karbon, həyəcanlanmış karbon atomları və aktiv mərkəzlər tərəfindən tutulur. O, həmçinin molekulyar

hidrogenləşməyə səbəb olur. Hidrogen atomları üçün sxematik olaraq aşağıdakı kimi təsvir edilə bilər.



Yuxarıda qeyd olunan sxematik keçidlərə bəzi eksperimental təcrübələrdə rast gəlmək olar. Atmosfer şəraiti toz halında olan B<sub>4</sub>C kristallarının su buxarları ilə müxtəlif kimyəvi qarşılıqlı reaksiyaları mövcuddur. Şəkil 34-də aktivləşmə enerjisinin şüalanmanın udulma dozasından asılılığı bir daha yuxarıda qeyd olunan eksperimental nəticələrini təsdiq edir.



Şəkil 34 Müxtəlif qamma udulma dozalarında bor karbid kristalında aktivləşmə enerjisi

Müxtəlif udulma dozalarında yerinə yetirilmiş hər eksperiment üçün oksidləşmə dərəcəsi ilə aktivləşmə enerjisi arasında əlaqəni aşağıdakı ifadə ilə yazmaq olar.

$$\left[ \ln \left( \frac{dD_i}{dT_\alpha} \right) \right]_i = -A \cdot \left[ \frac{E_T + E_\gamma + E_{Amorf}}{RT} \right]$$

Burada  $D_i$ -  $^{60}Co$  qamma mənbəyinin udulma dozası (30 rad/san),  $T_\alpha$ - oksidləşmə temperaturu,  $E_T$ - temperaturu aktivasiya enerjisi,  $E_\gamma$ - qamma mənbəyin aktivasiya enerjisi və  $E_{Amorf}$ - amorflaşmanın aktivasiya enerjisidir. Şəkil 34-də görüldüyü kimi temperaturdan asılı olaraq aktivləşmə enerjisinin dəyişmə kinetikasi şüalanmanın udulma dozasından asılı olaraq dəyişməsi göstərir ki, şüalanmanın udulma dozasının artması ilə aktivləşmə enerjisinin qiyməti artır. Yüksək udulma dozalarında yuxarıda sadalanan bütün parametrlərdə görüldüyü kimi qiymətlər bir-birinə yaxındır. Oksid təbəqəsinin üçün təyin olunmuş dərinlik qiymətindən aydın görüldüyü kimi yüksək udulma dozalarında aktiv mərkəzlər tərəfindən oksigen atomlarında tam tutulması və yaranmış oksidləmə reaksiyasının tamamlanmasıdır. Mürəkkəb mexanizim ilə baş verən oksidləşmə reaksiyasında yaranan oksid təbəqəsi üçün təyin olunmuş aktivləşmə enerjisinin qiyməti udulma dozasından sonra alınan maksimum qiymətləri bir birinə yaxındır. Yüksək təmizlik dərəcəsinə malik boron carbide birləşməsinin temperatur və gamma şüalanmanın təsiri altında oksidləşmə kinetikasının mexanizmi ətraflı tədqiq olunmuşdur. TG analizlərindən müəyyən olunmuşdur ki, toz şəkilli bor karbid kristallarında aparılan tədqiqatlar göstərdi ki, temperatur intervalından asılı olaraq kütlə kinetikasi fərqli mexanizimlərlə dəyişir. Həmçinin bor karbid kristalında hidroksid qrupunun gamma şüalanmanın təsiri altında parçalanması da öz əksini tapmışdır. Şüalanmanın udulma dozasından asılı olaraq yüksək təmizlik dərəcəsinə malik bor karbid kristalında oksidləşmə dərəcəsi yüksək udulma dozalarında stabilləşir. Yüksək temperaturlarda isə qeyri-izotermik oksidləşmə nəticəsində yaranan oksid təbəqəsinin qalınlığı şüalanmanın udulma dozasından asılı olaraq artır. Həmçinin zamandan asılı olaraq qurulmuş kinetikada diffuziya sürətinin dəyişməsi və hər bir udulma dozasından sonra yaranan oksid təbəqəsinin aktivləşmə enerjisinin qiyməti təyin olunmuşdur.

Sonuncu **yeddinci** fəsilə fəsilələr üzrə yerinə yetirilən eksperimental təcrübələrin qarşılıqlı müqayisəli analizi yerinə yetirilmişdir. Şüalanma

növündən, intensivliyindən və enerjisindən asılı olaraq kristal strukturda atomların yerdəyişməsinin mexanizmləri, defekt əmələ gəlmə və rekombinasiya kimi mühüm proseslərin kinetikasına diqqət ayrılmışdır. Ağır ionların təsir altında tədqiqat nümunələrdə termofiziki parametirlərin qarşılıqlı müqayisəsi və əsaslandırılması yerinə yetirilmişdir. Yüksək informasiya əmələ gətirmə qabiliyyətinə malik avadanlıqlardan istifadə edərək tədqiqat nümunələri üçün molekulyar dinamika analizləri aparılmış, səth effektlərin degradasiya mexanizminin izahı verilmişdir.

## ƏSAS NƏTİCƏLƏR

1. 1 MeV enerjili sürətli neytron seli  $B_2O_3$  kristallarının aktiv səthi tərəfindən tutulan su molekulları ilə qarşılıqlı təsiri nəticəsində sərbəst OH funksional qrupları yaradır. Neytron selinin maksimum  $1.0 \times 10^{15}$  n/sm<sup>2</sup> qiymətində B-OH hidroksid qrupları  $B_2O_3$  kristallarının səthində anion və kation halda mövcuddur, neytron selinin qiymətindən asılı olmayaraq kristalın səthində formalaşan və yeni qrupların qüvvə sabitləri B-O rəbitəsi üçün 24.2-126.0 N/kq, B-OH qarşılıqlı təsiri üçün 67.2-376.1 N/kq və sərbəst OH qrupları üçün 75.4-125.8 N/kq müəyyən edilmişdir

2. Sürətli neytron selinin təsiri altında  $B_2O_3$  kristallarında B-O kimyəvi rəbitələrin qırılması hesabına lokal amorflaşma prosesi baş verir və kristallik ölçünün qiymətində 90 nm-dən 138 nm-ə qədər artma aşkar olunmuşdur.

3.  $4.0 \times 10^{12}$  n/sm<sup>2</sup>,  $8.0 \times 10^{12}$  n/sm<sup>2</sup>,  $1.3 \times 10^{13}$  n/sm<sup>2</sup>  $4.0 \times 10^{14}$  n/sm<sup>2</sup> və  $1.0 \times 10^{15}$  n/sm<sup>2</sup> neytron seli ilə şüalanmadan sonra  $100 \leq T \leq 800$  K temperatur intervalında  $B_2O_3$  kristalında müşahidə olunan dublet effektlərin enerjisi 376 C/q,  $B_2O_3 \leftrightarrow HBO_2 \leftrightarrow B(OH)_3$  mexanizmilə baş verən faza keçidinin enerjisi 265 C/q təyin olunmuşdur. Müəyyən olunmuşdur ki,  $100 \leq T \leq 800$  K temperatur intervalında şüalanmamış  $B_2O_3$  kristal üçün entalpiyanın qiyməti 118.095 C/q, müxtəlif neytron seli ilə şüalandırıldıqda entolpiyanın qiyməti 201.028 C/q qədər artır.

4. Müxtəlif intensivlikli neytron seli ilə şüalandırılmış bor nitrid kristalında  $300 \leq T \leq 1300$  K temperatur intervalında Viqner enerjisinin qiymətləri 95.8 C/q, 93.89 C/q və 1002 K-də 94.49 C/q müəyyən olunmuşdur.  $1.0 \times 10^{15}$  n/sm<sup>2</sup>

neytron selində bor nitrid kristalında mərkəzi piki 969 K-də formalaşan effektin enerji üçün 373.609 C/q müəyyən edilmişdir.

5. Elektron selinin intensivliyindən asılı olaraq  $B_4C$  və  $B_6Si$  kristalları üçün xüsusi istilik tutumunun qiyməti temperaturun aşağı və yüksək oblastında müəyyən olunmuş və riyazi tənlikləri alınmışdır. 120 K-də  $B_4C$  kristalında istilik keçiriciliyinin qiyməti  $0.0247 \text{ Vt/sm} \times \text{K}$ , maksimum elektron selində şüalanmadan sonra istilik keçiriciliyinin qiymət  $0.0240 \text{ Vt/sm} \times \text{K}$ ,  $B_6Si$  kristalının 120 K-də istilik keçiriciliyinin qiyməti  $0.0175 \text{ Vt/sm} \times \text{K}$ ,  $1.03 \times 10^{18} \text{ sm}^2$  elektron selində  $0.009 \text{ Vt/sm} \times \text{K}$  təyin olunmuşdur.  $B_4C$  kristalının termik diffuziyası 100-300 K temperatur aralığında  $0.791\text{-}0.806 \text{ sm}^2/\text{san}$ , elektron selindən asılı olaraq  $0.808 \text{ sm}^2/\text{san}$  qədər artır.  $B_6Si$  kristalları üçün göstərilən temperatur aralığında termik difuziyanın qiymətinin  $0.591 \text{ sm}^2/\text{san}$  müəyyən olunmuşdur.

6. 167 MeV enerjili sürətli ağır  $^{132}\text{Xe}^{26+}$  ionlarının təsiri altında  $B_2O_3$ ,  $B_4C$ ,  $B_6Si$  və BN kristallarının səth morfologiyasında nano ölçülü iynə formalı dəşiklərin formalaşması müşahidə olunmuş və dəşiklərin ölçüləri 18-20 nm aralığında dəyişməsi müəyyən olunmuşdur. Kristalların səthində qabarmaların qarşılıqlı birləşməsi və böyümə sürəti təyin olunmuşdur. Ağır ionlarla şüalanmış kristallarda qabarmaların ölçüsü şüalanmamış kristallardan 2.2 dəfə böyük olması aşkar olunmuşdur. Ağır ionların  $B_4C$  hədəf kristalı ilə qarşılıqlı təsiri zamanı elektron-fonon əmsalının qiyməti  $8.1 \times 10^{12} \text{ Vt}/(\text{sm}^3 \times \text{K})$ , elektron-fonon qarşılıqlı təsirin istilik sahəsi  $4.05 \times 10^{12} \text{ Vt}/(\text{sm}^3 \times \text{K})$ , radial enerji paylanma parametri 2.8 nm olması müəyyən

olunmuşdur.

7. 167 MeV enerjili sürətli ağır  $^{132}\text{Xe}^{26+}$  ionlarla şüalandırılmış BN və  $\text{B}_2\text{O}_3$  kristallarında  $100 \leq T \leq 300$  K temperatur aralığında xüsusi istilik tutumunun qiyməti  $0.0053 \text{ C/K} \times q$ , həmin temperatu aralığında  $\text{B}_4\text{C}$  kristalı üçün xüsusi istilik tutumunun qiyməti BN və  $\text{B}_2\text{O}_3$  kristallarının qiymətindən 3.59 dəfə və  $\text{B}_6\text{Si}$  kristalı üçün 4.42 dəfə çox olması müəyyən edilmişdir.

8. 167 MeV enerjili sürətli ağır  $^{132}\text{Xe}^{26+}$  ionları ilə şüalandırılmış  $\text{B}_4\text{C}$  kristalında  $100 \leq T \leq 300$  K temperatur intervalında termodiffuziyanın qiyməti 1.19 dəfə,  $\text{B}_6\text{Si}$  kristalında 1.45 dəfə artır. 167 MeV enerjili  $^{132}\text{Xe}^{26+}$  ionları şüalanmadan sonra  $\text{B}_2\text{O}_3$  kristalında  $100 \leq T \leq 700$  K temperatur intervalında istilik tutumu və termodinamik funksiyalar zəyif sürətlə artma qanunauyğunluquna tabe olduğu müəyyən olunmuşdur.

9. Müxtəlif udulma dozalı qamma-kvantlarla şüalandırılmış  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{B}_6\text{Si}$  və BN kristallarının səth morfologiyasında 15-22 nm ölçülü lokal amorflaşma izləri müəyyən olunmuşdur. Kimyəvi tərkibin elementə görə xəritələnmə analizi əsasında qamma-kvantlarla şüalandırılmış  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{B}_6\text{Si}$  və BN kristallarında B, C, Si, və N atomlarının qeyri bircins paylanması və 1.4% oksigenin olması aşkar edilmişdir.

10. Bor karbid kristalının udulma spektrlərində aktivləşmə enerjisi 1.89 eV olan F, enerjisi 0.1 eV olan iki M rəng mərkəzləri aşkar edilmişdir. Qamma şüalanma dozasının artması ilə yeni  $\text{F}^+$  rəng mərkəzlərinin formalaşması müəyyən olunmuşdur. Qamma kvantlarla şüalanmış  $\text{B}_4\text{C}$  və  $\text{B}_6\text{Si}$  kristallarında oksidləşmənin kritik

temperaturu 970 °C, yüksək temperaturlarda kristalların səthində maye B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> təbəqəsinin və SiO<sub>2</sub> amorf kristallarının formalaşması müəyyən olunmuşdur. Şüalanmamış kristallarda oksidləşmə dərəcəsi 3.5 %, şüalandırılmış kristallarda 8.2 % qədər artır. Səthdə yaran oksidləşmə dərinliyi şüalanmanın udulma dozası və temperaturdan asılı olaraq 60 nm olması müəyyən olunmuşdur.

# DİSSERTASIYANIN ƏSAS NƏTİCƏLƏRİ ÜZRƏ ÇAP OLUNMUŞ ELMİ İŞLƏRİN SİYAHISI

1. R.Q. Qəribov, M.N. Mirzəyev, Bor karbid birləşməsinin mikrostrukturu və termik analizi, AMEA, Xəbərləri, Fizika-Texnikavə Riyaziyyat elmləri seriyası, XXXVI, №5, (2016) s.119-122.
2. M.N. Mirzəyev, R.Q. Qəribov, A.A. İbrahimov, B<sub>6</sub>Si, B<sub>4</sub>C və BN birləşmələrinin səth morfolojiyasının tarayıcı elektron mikroskop ilə tədqiqi, Journal of Qafqaz University-Physics, №4(1), (2016) s.80-84
3. M.N. Mirzəyev, X.F. Məmmədov, R.Q.Qəribov, Q.R. Allahverdiyev, Ş.Ə. Hübətov, Termik işlənmə sürətindən asılı olaraq B<sub>6</sub>Si və B<sub>4</sub>C birləşməsinin səth morfolojiyası, mikrotərkibi və istilik xassələrinin tədqiqi, Bakı Universitetinin xəbərləri, №1 (2017) s.199-207.
4. M.N. Mirzəyev, S.H. Jabarov, E.B. Asgerov, R.N. Mehdiyeva, T.T. Thabethe, S. Biira, N.V. Tjep, Crystal structure changes and weight kinetics of silicon-hexaboride under gamma irradiation dose, Results in Physics. 10 (2018) 541-545.
5. M.N. Mirzəyev, Kh.F. Mammadov, R.G. Garibov, E.B. Askerov, Thermophysical properties of boron carbide irradiated by ionizing radiation, High Temperature 56(3) (2018) 374–377.
6. M.N. Mirzəyev, 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, №14, 1850151, 2018.
7. M.N. Mirzəyev, R.N.Mehdiyeva, Kh.F.Mammadov, S.H.Jabarov, E.B.Asgerov, Calculation of the thermal parameters of boron silicide by differential scanning calorimetry, Physics of Particles and Nuclei Letters (Physics of Solid State and Condensed Matter), 2018, Vol. 15, №. 6, pp. 673–677

8. M.N. Mirzayev, Kh.F. Mammadov, V.A. Skuratov, E. Demir, S.H. Jabarov, N.A. Ismayilova, S. Biira, B. Abdurakhimov, E. Popov, Oxidation kinetics and thermophysical properties of gamma irradiated silicon hexaboride, *Journal of Alloys and Compounds*, 801 (2019)151-157.
9. M.N.Mirzayev, E. Demir, K. Mammadov, R. Mehdiyeva, S. Jabarov, A.B. Tugrul, S.Biira, N. Tiep, T.Thabethe, Thermodynamics kinetics of boron carbideunder gamma irradiation dose, *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 33, No. 9 (2019) 1950073.
10. 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*, Vol. 74, No. 4, 2019, pp. 363-367.
11. Matlab N. Mirzayev, Oxidation kinetics of boron carbide ceramic under high gamma irradiation dose in the high temperature, *Ceramics International*, 46 (3), 2816-2822, 2020.
12. Mirzayev, M.N., Demir, E., Mammadov, K.F. et al. Amorphisation of boron carbide under gamma irradiation. *Pramana-Journal of Physics*, 94, 110 (2020).
13. Matlab 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*, 2050395, 2020.
14. Matlab N. Mirzayev, High-flux neutron irradiation of boron trioxide analyzed with Raman and FTIR spectroscopy, *International Journal of Modern Physics B*, 34 (18), 2050160, 2020.
15. Matlab N. Mirzayev, E. Popov, E. Demir, B.A. Abdurakhimov, D.M. Mirzayeva, V.A. Sukratov, A.K. Mutali, V.N. Tiep, S. Biira, M.Yu. Tashmetov, K. Olejniczak, O. Kristavchuk, Thermophysical behavior of boron nitride and boron trioxide ceramics compounds with high energy electron fluence and

- swift heavy ion irradiated, *Journal of Alloys and Compounds*, 834 (2020) 155119.
16. Matlab 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*, 173, 109162, 2020.
  17. 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, Effect of high intense electron beam irradiation on structural and Raman properties of boron carbide micro powder, *International Journal of Modern Physics B*, 34 (04) (2020) 2050008.
  18. Matlab N. Mirzayev, Heat transfer of hexagonal boron nitride (h-BN) compound up to 1 MeV neutron energy: Kinetics of the release of wigner energy, *Radiation Physics and Chemistry*, 180 (2021) 109244.
  19. Matlab N Mirzayev, Alexander A Donkov, Evgeni A Popov, Ertugrul Demir, Sakin H Jabarov, Levan S Chkhartishvili, Samuel A Adejo, Aleksandr S Doroshkevich, Alexey A Sidorin, Asif G Asadov, Thabsile T Thabethe, Mayeen U Khandaker, Sultan Alamri, Hamid Osman, Alex V Trukhanov, Sergei V Trukhanov, Modeling and X-ray analysis of defect nanoclusters formation in B<sub>4</sub>C under ion irradiation, *Nanomaterials*, 12(15) (2022) 2644.
  20. M.N. Mirzayev, Kh. Mammadov, R.N. Mehdiyeva, R.G. Garibov, BA. Skuratov, N.V. Tiep, E.B. Askerov, E. Demir, A.B. Tugrul, S.H. Jabarov, Study of atom dynamics of the (SS GRADE 321) +B<sub>4</sub>C+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> compounds under heavy ion irradiation, *Journal of Radiation Researches*, 2018, No2, 5, pp.173-178
  21. 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*, 1 (2), 63-69, 2019
22. O.A. Səmədov, M.N. Mirzəyev, Sürətli ağır ion, neytron, elektron və qamma şüalanmanın təsiri nəticəsində borlu binar birləşmələrdə defekt əmələgəlmə mexanizmi və termofiziki effektlər, *AJP Fizika*, XXVIII, №1, (2022) s.18-30.
  23. M.N. Mirzayev, Kh.F.Mammadov, R.N.Mehdiyeva, S.H.Jabarov, E.B.Asgerov, S.M. Akberova, Chances crystal structure of silicon hexaboride irradiated under gamma ray, 18<sup>th</sup> International Conference on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, EFRE-2018, September 16-22, Tomsk, Russia, 2018. P.528
  24. M.N. Mirzayev, Kh.F. Mammadov, R.N. Mehdiyeva, Microstructural, macroscopic length and lattice parameters changes in gamma-irradiated boron carbide. *Modern Trends in Condensed Matter Physics, MTCMP – 2018*, September 24-26, Baku, Azerbaijan, 2018. P.118
  25. Mirzayev M.N, Demir E, Mirzayeva D.M, Abdurakhimov B, Assessment of oxidation kinetics of boron carbide under gamma irradiation conditions, *The Ninth International Conference "Modern Problems of Nuclear Physics and Nuclear Technologies"*, September 24-27, Tashkent, Uzbekistan, 2019, p. 262.
  26. A. Dalcalı, I. Koçak, M.N. Mirzayev, E. Demir, V. Uglov, V. Shymanski, B. Büyük, Boron mine and assesment of Regional Development (3rd International Regional Development and The Role of Universities Symposium) November 21st-22nd, 2019/ Bandırma-Balıkesir, Turkey
  27. E.P. Popov, A.N. Chernikov, A.I. Beskrovnyi, J. Waliszewski, M.N. Mirzayev, Cryostat for cooling samples in the study of low-temperature structural and magnetic phase transitions by neutron diffraction, *Journal of Physics: Conference Series* 1492 (1), 012054, 2020.
  28. M.N. Mirzayev, Kh.F. Mammadov, D.M. Mirzayeva, V.A. Skuratov, E. Demir, E. Popov, Defects processes and formation

- of Wigner enthalpy in boron carbide under neutron irradiation, 7<sup>th</sup> International Conference on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE-2020, September 14-25, Tomsk, Russia, 2020. p.459.
29. E. Demir, M.N. Mirzayev, E. Popov, D.M. Mirzayeva, An experimental study on thermal properties of boron based compounds under ionization irradiation “Multidisciplinary approaches in solving modern problems of fundamental and applied sciences” 2020, Baku, Azerbaijan.
  30. Kh.F. Mammadov, M.N. Mirzayev, R. Garibov, G. Allahverdiyev, Study of the processes of changing the crystal structure of boron carbide after the destruction of a nuclear reactor as a result of earthquake, Natural disasters and human life safety, 2017
  31. M.N. Mirzayev, E. Popov, A.S. Doroshkevich, E. Demir, F. Mamedov, I.G. Genov, R.N. Mehdiyeva, Z.A. Sharipov, Thermic and electrical analogy of B<sub>4</sub>C and BN under different irradiation, «РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА» Севастополь, 05-10 июля 2021 г. p.313-315.
  32. S. Makatsaria, L. Chkhartishvili, M. Mirzayev, N. Barbakadze, O. Tsagareishvili, I. Jinikashvili, R. Chedia, Nanopowder h-BN:Fe(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) as <sup>10</sup>B delivery agent in BNCT, ISBB2022, the 21st International Symposium on Boron, Borides and related materials related, from 5 to 9 September 2022, Paris, France.
  33. N. Gogolidze, L. Chkhartishvili, M. Mirzayev, N. Barbakadze, O. Tsagareishvili, M. Buzariashvili, O. Lekasvili, R.Chedia, Preparation of sandwich-like B<sub>4</sub>C/W neutron-shield materials, ISBB2022, the 21st International Symposium on Boron, Borides and related materials related, from 5 to 9 September 2022, Paris, France.

Dissertasiyanın müdafiəsi \_\_\_ \_\_\_\_\_ 2022-ci il tarixində saat \_\_\_\_\_ AMEA Radiasiya Problemləri İnstitutu nəzdində fəaliyyət göstərən BED 1.21 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

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

Dissertasiya işi ilə AMEA Radiasiya Problemləri İnstitutunun kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

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

Avtoreferat \_\_\_ \_\_\_\_\_ 2022-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 27.09.2022

Kağızın formatı: A5

Həcm: 91842 işarə

Tiraj: 100