

## Təbiət elmləri

UOT 538.913; 538.953

*A.O.Daşdamirov, C.İ.Hüseynov, R.F.Rzayev*  
*Azərbaycan Dövlət Pedaqoji Universiteti*  
*rravil.ipg@gmail.com*

### **Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> BİRLƏŞMƏSİNDƏ SÜRƏTLİ NEYTRONLARIN TƏSİRİ ALTINDA BAŞ VERƏN TERMOFİZİKİ EFFEKTLƏR**

*Açar sözlər:* *itrium oksid, termodinamik parametrlər, istilik seli, istilik tutumu, kütlə kinetikasi*

Təqdim olunan işdə, kubik fəza quruluşuna malik itrium oksid (təmizlik dərəcəsi 99.995%, toz halında sıxlığı 0.033 q/sm<sup>3</sup>, sıxlığı 5.01 q/sm<sup>3</sup>, hissəciyinin ölçüsü 30-50 nm, ərimə temperaturu 2425 °C, Sigma–Aldrich, Almaniya) nano hissəciklərinin 25-800 °C temperatur intervalında Diferensial Skanedici Kalorimetr (DSC) ilə termofiziki xassələri tədqiq olunmuşdur. Təcrübə məlumatları əsasında temperaturdan asılı olaraq itrium oksid birləşməsi üçün istilik axını, kütlə kinetikasi və istilik tutumu müəyyən edilmişdir. Müəyyən olunmuşdur ki, 25≤T≤ 800°C temperatur aralığında istilik axını 3.5 Vt/q maksimum qiymətində artır. Bundan əlavə, birləşmənin səthində adsorbsiya olunmuş su molekullarının parçalanma mexanizmi və fərqli mərhələlər üzrə yaranan daxili struktur keçidləri müşahidə olunmuşdur.

*A.O.Дашдамиров, Дж.И.Гусейнов, Р.Ф.Рзаев*

### **ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ В СОЕДИНЕНИИ Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

*Ключевые слова:* *оксид иттрия, термодинамические параметры, тепловой поток, теплоемкость, массовая кинетика*

В представленной работе теплофизические свойства наночастиц оксида иттрия с кубической пространственной структурой (чистота 99,995%, плотность порошка 0,033 г/см<sup>3</sup>, плотность 5,01 г/см<sup>3</sup>, размер частиц 30-50 нм, температура плавления 2425 °C, Sigma - Aldrich, Германия) в диапазоне температур 25-800 °C были исследованы с помощью дифференциального сканирующего калориметра (ДСК). На основании экспериментальных данных определены тепловой поток, массовая кинетика и теплоемкость для соединений оксида иттрия в зависимости от температуры. Установлено, что тепловой поток в интервале температур 25≤T≤800°C увеличивается до максимального значения 3,5 Вт/г. Кроме того, был обнаружен механизм разложения адсорбированных молекул воды на поверхности соединения и внутренние структурные переходы, образующиеся на разных стадиях.

A.O.Daşdamirov, C.I.Huseynov, R.F.Rzayev

## THERMOPHYSICAL EFFECTS OCCURRING UNDER THE ACTION OF FAST NEUTRONS IN THE $Y_2O_3$ COMPOUND

**Keywords:** yttrium oxide, thermodynamic parameters, heat flux, heat capacity, mass kinetics

In the presented work, thermophysical properties of yttrium oxide nanoparticles with cubic space structure (purity 99.995%, powder density  $0.033 \text{ g/cm}^3$ , density  $5.01 \text{ g/cm}^3$ , particle size 30-50 nm, melting point  $2425 \text{ }^\circ\text{C}$ , Sigma – Aldrich, Germany) in the temperature range of  $25\text{-}800 \text{ }^\circ\text{C}$  were studied with a Differential Scanning Calorimeter (DSC). Based on the experimental data, the heat flux, mass kinetics and heat capacity for yttrium oxide compounds were determined depending on the temperature. It was found that the heat flux in the temperature range of  $25 \leq T \leq 800 \text{ }^\circ\text{C}$  increases to its maximum value of  $3.5 \text{ W/g}$ . In addition, the mechanism of decomposition of adsorbed water molecules on the surface of the compound and the internal structural transitions formed at different stages were observed.

### 1. Giriş

Son illər mühəndis texnologiyasında nano ittrium oksid birləşməsinin müxtəlif metal keramik və metal qarışıqlarla əmələ gətirdiyi kompozit birləşmələr tədqiqatçıların diqqət mərkəzindədir [1]. Texnologiyanın müxtəlif istiqamətlərində daha çox funksional tətbiqlər üçün ittrium oksid fərqli konsentrasiyalarda istifadə olunmaqdadır [2-3].  $Y_2O_3$  nümunəsinin elektron quruluşunu hesablamaq üçün OLCAO metodundan istifadə olunmuşdur [4]. Orbitallar üzrə minimal “bazis dəsti” də daxil olmaqla “tam bazis dəsti” (nüvə orbitalları  $^+Y 5^s$ ,  $Y 5^p$ ,  $Y 4^d$ ,  $O 2^s$  və  $O 2^p$ ) və həyəcanlanmış hallar üçün  $O 3^s$ ,  $O 3^p$ ,  $Y 6^s$ ,  $Y 6^p$  və “ $Y 5^{db}$ ” orbitalları əsas götürülmüşdür. Yerinə yetirilmiş tədqiqat işlərində “ $Y 5^{db}$ ” orbitalının da daxil olduğu minimal bazis dəstinə yaxın hallar araşdırılmışdır [5]. İttrium oksid birləşməsində “ $O 2^s$ ” orbitalında ən kiçik enerjiyə malik olan ixtiyari bir halı tədqiq edərək elektron strukturun öyrənilməsi üçün yeni nəzəri tədqiqat metodu yaradıla bilər. Məhz buna görə istifadə etdiyimiz yaxınlaşmada nüvə orbitalı kimi “ $Y 4^p$ ” götürülmüş və sabit saxlanmışdır. Biksbir kristal quruluşa malik ittrium oksid nazik təbəqəsində ittrium ionları iki tip struktur simmetriyada yerləşirlər [6].

Tətbiq sahəsindən asılı olaraq ittrium oksid nazik təbəqələrinin səthində baş verən müxtəlif aşınmaların öyrənilməsi üçün müxtəlif metodlar təklif olunmuşdur [7]. Nanotexnologiyada ion implantasiyanın prioritet məsələlərindən biri kiçik və yüksək enerjili ion şüalanmasının təsiri altında nanoölçülü nazik təbəqələrin səthində tozlanma prosesinin öyrənilməsidir [8]. İon şüalanması zamanı nazik təbəqəyə malik kristalların səthinə yaxın yerləşən atomlar təbəqəsində müəyyən

dərində atomların ayrılması kimi mühüm fiziki proses müşahidə olunmaqdadır. Materialın bütün fiziki xassələrinin və parametrlərinin daxil olduğu proseslər zəncirvari mexanizmə tabedir. Tozlanma prosesi kristalların səthində baş verən amorflaşma və oksidləşmə prosesinin təməlini təşkil edir və eyni zamanda ionlaşdırıcı mühitdə səthin korroziya sürətini artırır. Korroziya sürətinin neytron, qamma və ionlarla şüalanmanın təsiri altında təyin edilməsi üçün Siqmund tərəfindən təklif edilmiş Tomas Fermi ekranlaşma funksiyasından istifadə olunmaqdadır [9]. Həmçinin şüalanma zamanı ionların enerji və intensivliyindən aslı olaraq hədəf kimi seçilmiş itrium nazik təbəqəsinin səth enerjisinin təyin olunması ilə ekranlaşma funksiyasına keçid mümkündür. Səth enerjisi materialı təşkil edən atomlar arasındakı kimyəvi rabitənin təbiətindən və nümunənin kristal quruluşundan asılıdır. Eyni zamanda, səth enerjisi vakuum şəraitində ion şüalanması zamanı materialın səthindən atomların buraxılması prosesindən və şüalanma temperaturundan asılıdır. Siqmund-Tomson tərəfindən neytron şüalanması zamanı səthdən ayrılan atomların təyin olunması üçün təklif olunmuş modeldə çoxlu çatışmazlıqlar müəyyən olunmuşdur. Həmin modeldə elektronegativ və elektropozitiv elementlər haqqında məlumat verilmişdir [7-9].

Tədqiqat işində 1 MeV enerjiyə malik sürətli neytronlarla şüalanmış nano itrium oksid birləşməsinin istilik sel funksiyası, kütlə kinetikasi, istilik tutumunun qiyməti və hidrosid qrupunun parçalanma mexanizmi tədqiq edilmişdir.

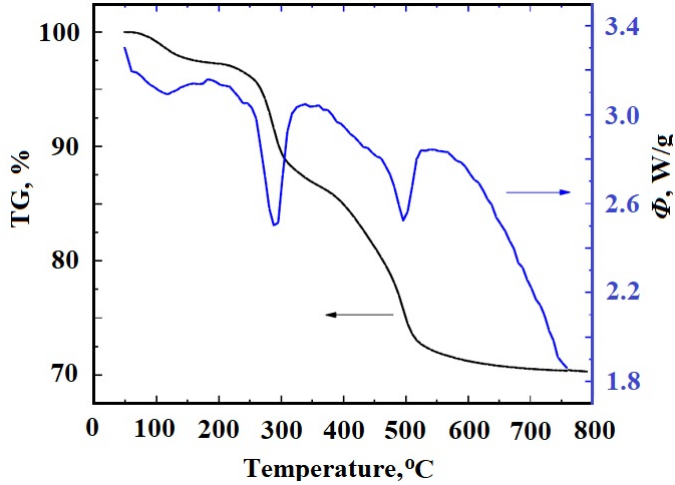
## **2. Təcrübi hissə**

Tədqiqat işində nano itrium oksid hissəciklərinin (təmizlik dərəcəsi 99.995%, toz halında sıxlığı 0.033 q/sm<sup>3</sup>, həqiqi sıxlığı 5.01 q/sm<sup>3</sup>, xüsusi səth sahəsi 30-50 m<sup>2</sup>/q, hissəciyinin ölçüsü 30-50 nm, ərimə temperaturu 2425°C, Sigma–Aldrich, Almaniya) termofiziki xassələri 25-800 °C temperatur aralığında DSC metodu ilə öyrənilmişdir. Nümunələrin şüalandırılması Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutunun Neytron Fizikası Laboratoriyasının İBR-2M reaktorunda (Dubna, Rusiya) impuls rejimində 1 MeV enerjili, sel sıxlığı  $\Phi = 10^{12}$ - $10^{15}$  n/sm<sup>2</sup>·san olan sürətli neytronlarla otaq temperaturunda aparılmışdır [10-16]. DSC ölçmələri METTLER TOLEDO tərəfindən istehsal olunan DSC3 STARE cihazında temperatur tənzimlənməsi üçün MULTISTAR sensorlar istifadə olunmaqla həyata keçirilmişdir [17-22]. Standart adiabatik kalorimetr 25 °C-dən 800 °C-ə qədər olan temperatur intervalında arqon (Ar) atmosferində 20 ml·min<sup>-1</sup>, 5 °/dəq qızdırma sürətində (əvvəllər indium kalibr edilmiş) işləyir. Kütlə təyin etmə xətası 1 %-i keçməmişdir [23-25].

## **3. Nəticələr və müzakirələr**

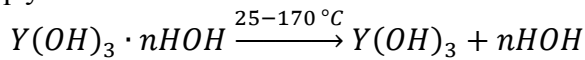
Şəkil 1-də Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanohissəciklərinin 25 ≤ T ≤ 800 °C temperatur intervalında istilik sel funksiyasının spektri verilmişdir. Spektr istilik axını funksiyası üçün ölçülən 4000 nəticəni özündə ehtiva edir. Temperatur

intervalından aslı olaraq istilik selinin mexanizmi üç hissəyə ayrılır ki, bu da ittrium oksid birləşməsi üçün alınmış ədəbiyyat nəticələri ilə eynilik təşkil etməkdədir [26].

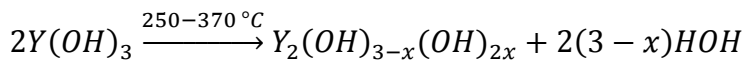


**Şəkil 1.**  $25 \leq T \leq 800$  °C temperatur intervalında nano ittrium oksid nümunəsinin istilik axını funksiyasının spektri

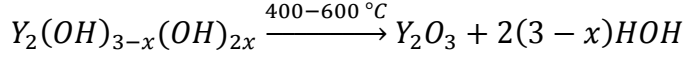
Birinci hissədə  $25 \leq T \leq 170$  °C temperatur aralığında istilik selinin 3.4-3.1 Wt/q intervalında dəyişməsi müşahidə olunur. Bu endo effekt ilə müşayiət olunur. Mərkəzi temperaturu 100 °C temperatur ətrafında qeydə alınan bu effekt nano ittrium nümunəsi tərəfindən zəif kimyəvi qarşılıqlı təsirdə olan, atmosferdən adsorbsiya olunmuş suyun parçalanması ilə xarakterizə olunur. 25 °C temperaturda başlayan effekt geniş şəkildə 170 °C temperaturda tamamlanır. Bu effektin baş verməsi zamanı gedən kimyəvi reaksiyanı mexanizmini yuxarıdakı kimi qeyd etmək mümkündür.



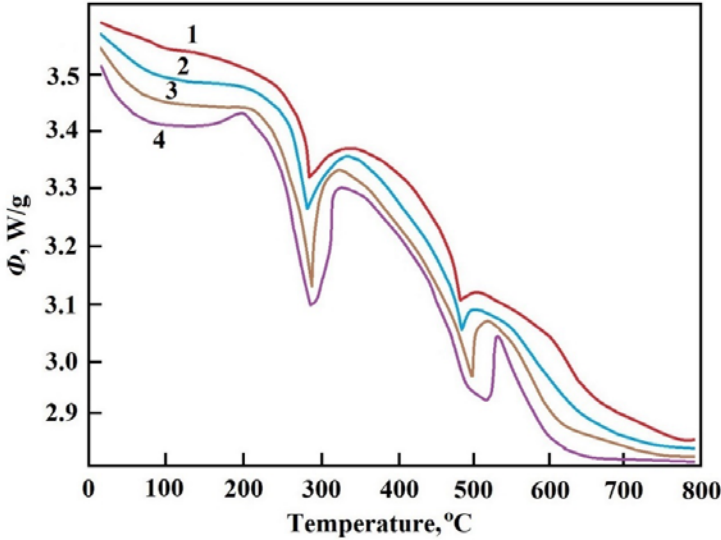
Absorbsiya olunmuş su molekullarının yaratdığı növbəti effekt müəyyən miqdarda aktiv səthə malik nano ittrium oksid ilə su molekullarının hidrogen qrupları arasında gedən reaksiya nəticəsində ittrium hidrogen strukturun formalaşmasıdır ki, onlar daha yüksək temperaturlara dayanıqlıdır. DSC spektrində müşahidə olunan bu effekt hidrogen təbəqəsinin parçalanması ilə bağlıdır. İttrium hidrogenin parçalanma temperaturun  $250 \leq T \leq 370$  °C temperatur intervalına uyğun gəlməsi [26] hesabına alınan təcrübə nəticələri ədəbiyyat məlumatları ilə üst-üstə düşmüş olur. Mexanizm olaraq parçalanmanı sxematik olaraq aşağıdakı kimi təsvir etmək mümkündür.



İstilik sel funksiyasının sonuncu effekti kristal quruluşa daxil olunmuş hidrosid qrupunun parçalanması ilə bağlıdır. Struktur hidrosid qruplarının ayrılma (parçalanma) mexanizmi digər zəif qarşılıqlı təsirdə olan hidrosid qruplarından daha mürəkkəb mexanizmlə baş verir. Məhz bu səbəbdən onların ayrılması temperaturun daha yüksək qiymətinə ( $400 \leq T \leq 600$  °C) doğru sürüşür.



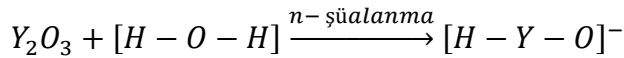
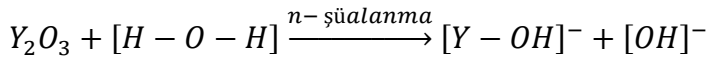
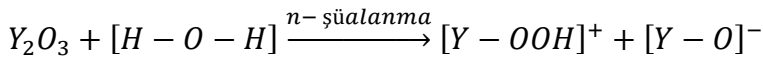
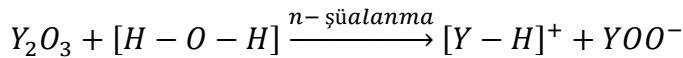
Ardıcıl endo effektlərin təkrarlanması və ikinci mexanizmlə baş verən hidrosid qrupunun daha “sıçrayışlı” parçalanmasının baş verməsi itrium nanohissəciklərinin daha böyük miqdarda [OH]<sup>-</sup> qrupları ilə qarşılıqlı təsirə daxil olmasını göstərir. Kiçik temperaturlardan başlayaraq istilik selinin xarakterik azalması strukturu təşkil edən molekullar arasında böyük dinamikanın və yüksək entropiyanın olduğunu göstərir. Şəkil 2-də  $E > 1$  MeV enerjili neytronlarla  $4.0 \times 10^{12}$  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>,  $10^{15}$  n/sm<sup>2</sup> intensivliklərdə, otaq temperaturunda şüalandırılmış itrium oksid nano münəsinin istilik axını funksiyasının spektri göstərilmişdir.



**Şəkil 1.**  $25 \leq T \leq 800$  °C temperatur intervalında nano itrium oksid nümunəsinin istilik axını funksiyasının spektri: 1)  $E = 1$  MeV enerjili neytronlarla  $4.0 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>, 2)  $1.3 \times 10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>, 3)  $4.0 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>, 4)  $10^{15}$  n/cm<sup>2</sup> intensivliklərdə, otaq temperaturunda şüalandırılmış itrium oksid nano münəsinin istilik axını funksiyasının spektri

Şüalanma intensivliyindən asılı olaraq  $Y_2O_3$  birləşməsində istilik selinin keçidi daha yüksək temperaturlara doğru sürüşür. Bundan əlavə bütün

süalanmalarda istilik selinin verilmiş qiyməti (bütün əyrilərində effektlərin mərkəzi piki) uyğun olaraq üst-üstə düşür. Lakin şüalanma dozasından asılı olaraq kiçik anomal effektlər müşahidə olunmaqdadır. Həmin effektləri mərkəzi temperatur ətrafında daha aydın müşahidə etmək mümkündür. Bu şəkildə effektlər aşağı temperaturlardan başlayaraq neytron selinin təsiri altında su və hidrokسيد qrupunun parçalanması ilə xarakterizə olunur [27]. Adsorbsiya olunmuş su molekullarının quruluşdakı parçalanma mexanizmi aşağıdakı kimi təsvir edilə bilər:

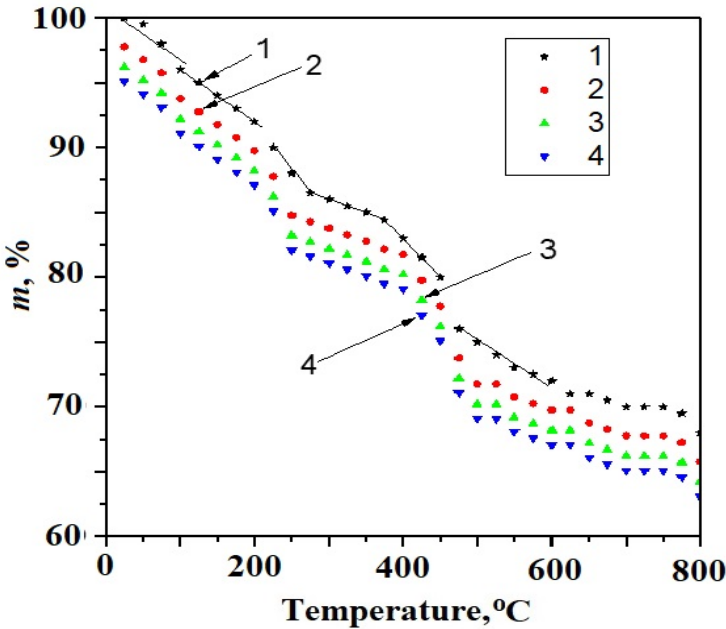


Nəzərə almalıyıq ki, neytron şüalanması ilə paralel olaraq qamma şüalanma da su molekullarının parçalanmasında mühüm rol oynayır. Şüalanma zamanı neytron və qamma şüalarının doza nisbəti iş prinsipi termolümenessensiyaya əsaslanan dozimetrlər vasitəsi ilə otaq temperaturunda  $800 \text{ sm}^2$  sahədə ölçülmüşdür [28]. Həmçinin, (n,  $\gamma$ ) reaksiyasında ümumi udulan dozanın payı 500 Gy/saata bərabər olaraq 85 % təşkil etmişdir [29]. Qamma və neytron şüalanmasının yaratdığı mexanizmə əsaslanaraq birlikdə aşağıdakı təsirləri müşahidə edə bilərik. İntensivlikdən asılı olaraq [OH] qrupların aşağı dozalarda kiçik sürətli parçalanmaya məruz qaldığı müşahidə olunur. Ədəbiyyat nəticələrinin müqayisəli təhlilləri göstərir ki, [Y-OH] kimyəvi rabitələr ətrafında mövcud su molekullarının birinci mərhələdə parçalanması baş verir və bu təhlillər tədqiqat işində aparılan DSC analiz nəticələri ilə uyğunluq təşkil edir [30]. Nano nümunələrin səthində neytron və qamma şüalanmanın təsiri altında su molekullarının parçalanması təcrübə nəticələrinə uyğun gəlir. Ayrıca, fərqli neytron şüalanma dozalarında şüalanmamış və şüalanmış nümunələrin termofiziki parametrləri bu uyğunluğu təsdiq edir. Şüalanmış nümunələrin DSC piklərinin intensivliyi şüalanmamış nümunəyə nisbətən 6.56 % azlıq təşkil edir. Bununla birlikdə, asılılıq qrafiklərindən aydın olur ki, 1 MeV enerji intervalında şüalanmış nümunələrdə amorflaşma kinetikasi baş vermir. Lakin, yüksək temperaturlarda aktiv səth sahəsinə malik nanobirləşmələrdə kiçik kristallik həcmdə fazalar arası keçidlər mümkündür. İstilik selinin xarakterik spektri nümunənin əsas vacib termofiziki parametri olan istilik tutumunun təbiəti ilə bağlıdır.

Şəkil 2-də göstərilən funksiya istilik tutumunun temperatur asılılığının dəyişmə mexanizmi ilə eynilik təşkil edir. İstilik tutumunun qiymətinin təyini seçilmiş termik sürətə və istilik selinin etalon nümunə və tədqiqat nümunəsi üçün alınmış qiymətlərindən aslıdır. Həm etalon, həm də müxtəlif nanonümunələr üçün alınmış istilik selinin həqiqi eksperimental qiyməti və etalon nümunə kimi istifadə olunmuş Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> üçün alınmış qiymət nəzərə alındıqda istilik tutumu üçün 0.02 C/°C·q, 0.025 C/°C·q və 0.036 C/°C·q qiymətləri uyğun gəlir (Şəkil 2).

Göründüyü kimi istilik selinin qiyməti istilik tutumunun qiyməti ilə düz mütənasiblik təşkil edir. İstilik tutumunun artması bir başa fonon-fonon qarşılıqlı təsir mexanizmi ilə bağlı olduğu üçün temperaturun təsiri altında nano ittrium oksidinə məxsus struktur formalaşır.

Şəkil 3-də  $E = 1$  MeV enerjili neytronlarla  $4.0 \times 10^{12}$  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>,  $10^{15}$  n/sm<sup>2</sup> intensivliklərdə şüalandırılmış ittrium oksid nano nümunəsinin  $25 \leq T \leq 800$  °C temperatur intervalında kütləsinin mərhələlər üzrə spektri verilmişdir.  $25 \leq T \leq 170$  °C temperatur aralığında müşahidə olunan endo effekt zamanı nano ittrium nümunəsinin 3.2 % - i tərəfindən zəif kimyəvi qarşılıqlı təsirdə olan adsorbsiya olunmuş suyun parçalanması müşahidə olunur. İkinci mərhələdə sərbəst və struktur hidroksid qruplarının parçalanması baş verir.



**Şəkil 3.**  $E = 1$  MeV enerjili neytronlarla 1)  $4.0 \times 10^{12}$  n/sm<sup>2</sup>, 2)  $1.3 \times 10^{13}$  n/sm<sup>2</sup>, 3)  $4.0 \times 10^{14}$  n/sm<sup>2</sup>, 4)  $10^{15}$  n/sm<sup>2</sup> intensivliklərdə şüalandırılmış ittrium oksid nano nümunəsinin  $25 \leq T \leq 800$  °C temperatur intervalında kütlə spektri

### Nəticə

Otaq temperaturunda  $E = 1$  MeV enerjili neytronlarla  $4.0 \times 10^{12}$  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>,  $10^{15}$  n/sm<sup>2</sup> intensivliklərdə şüalandırılmış itrium oksid nano nümunəsinin  $25 \leq T \leq 750$  °C temperatur intervalında DSC və TG analizləri yerinə yetirilmişdir. Mərkəzi pik 100 °C temperatur ətrafında qeyd olunan endo effekt nano itrium nümunəsi tərəfindən zəif kimyəvi qarşılıqlı təsirdə olan, atmosferdən adsorbsiya olunmuş suyun parçalanması,  $250 \leq T \leq 370$  °C temperatur intervalına DSC spektrində ikinci effekt hidroksid təbəqəsinin parçalanmasını ilə bağlıdır. İstilik sel funksiyasının sonuncu effekti kristal struktura daxil olunmuş hidroksid qrupunun  $Y_2(OH)_{3-x}(OH)_{2x} \xrightarrow{400-600\text{ }^\circ\text{C}} Y_2O_3 + 2(3-x)HOH$  mexanizmi üzrə parçalanması nəticəsində baş verir. Həmçinin hidroksid qrupunun “sıçrayışlı” parçalanması itrium nanohissəciklərinin böyük miqdarda [OH]<sup>-</sup> qrupları ilə qarşılıqlı təsirə daxil olmasını eksperimental göstərir. İtrium oksid birləşməsi üçün  $250 \leq T \leq 370$  °C temperatur intervalında istilik tutumu:  $0.02$  C/°C·q,  $0.025$  C/°C·q və  $0.036$  C/°C·q qiymətlərinə uyğundur. Əlavə olaraq, şüalandırılmış itrium oksid nanonümunəsinin  $25 \leq T \leq 750$  °C temperatur intervalında kütlə itkisinin 35% olduğu müəyyən edilmişdir.

### ƏDƏBİYYAT

1. *Aghazadeh, M., Malek Barmi, A.A., Mohammad Shiri, H., Sedaghat, S., 2013. Cathodic electrodeposition of Y(OH)3 and Y2O3 nanostructures from chloride bath. Part II: Effect of the bath temperature on the crystal structure, composition and morphology. Ceram. Int. 39, 1045–1055.*
2. *Aghazadeh, M., Nozad, A., Adelkhani, H., Ghaemi, M., 2010. Synthesis of Y2O3 nanospheres via heat-treatment of cathodically grown Y(OH)3 in chloride medium. J. Electrochem. Soc. 157, D519–D522.*
3. *Aghazadeh, M., Yousefi, T., Ghaemi, M., 2012. Low-temperature electrochemical synthesis and characterization of ultrafine Y(OH)3 and Y2O3 nanoparticles. J. Rare Earths 30, 236–240.*
4. *Costa, A.L., Serantoni, M., Blosi, M., Mercadelli, E., Esposito, L., Piancastelli, A., Sanson, A., 2010. Microwave assisted synthesis of Yb:Y2O3 based materials for laser source application. Adv. Eng. Mater. 12, 205–209.*
5. *Dupont, A., Parent, C., Le Garrec, B., Heintz, J.M., 2003. Size and morphology control of Y2O3 nanopowders via a sol-gel route. J. Solid State Chem. 171, 152–160.*
6. *Gougousi, T., Chen, Z., 2008. Deposition of yttrium oxide thin films in supercritical carbon dioxide. Thin Solid Films 516, 6197–6204.*
7. *Guo, H., Qiao, Y.M., 2009. Preparation, characterization, and strong upconversion of monodisperse Y2O3: Er3+, Yb3+ microspheres. Opt. Mater.*



- (Amst) 31, 583–589.
8. Kuroda, Y., Hamano, H., Mori, T., Yoshikawa, Y., 2000. Specific adsorption behavior of water on a Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> surface. *Langmuir* 16, 6937–6947.
  9. Lakshminarasappa, B.N., Shivaramu, N.J., Nagabhushana, K.R., Singh, F., 2014. Synthesis characterization and luminescence studies of 100 MeV Si<sup>8+</sup> ion irradiated sol gel derived nanocrystalline Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. Atoms* 329, 40–47.
  10. M.N. Mirzayev, S.H. Jabarov, E.B. Asgerov, R.N. Mehdiyeva, T.T. Thabethe, S. Biira, N.V. Tiep, Crystal structure changes and weight kinetics of silicon-hexaboride under gamma irradiation dose, *Results in Physics*. 10 (2018) 541-545.
  11. M.N. Mirzayev, 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.
  12. M.N. Mirzayev, R.N. Mehdiyeva, R.G. Garibov, N.A. Ismayilova, S.H. Jabarov, Influence of gamma irradiation on the surface morphology, XRD and thermophysical properties of silicide hexoboride, *Modern Physics Letters B*, 32(14), 1850151, 2018.
  13. M.N. Mirzayev, 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.
  14. S.R. Azimova, N.M. Abdullayev, Y.I. Aliyev, M.N. Mirzayev, V.A. Skuratov, A.K. Mutali, S.H. Jabarov, Study on the Thermodynamic Behavior of Sb-Te Binary Systems with Swift Heavy-Ions Irradiation at the High Temperatures, *Journal of the Korean Physical Society*, 77 (3), 240-246, 2020,
  15. 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.
  16. M. Mirzayev, E. Demir, K. Mammadov, R. Mehdiyeva, S. Jabarov, A.B. Tugrul, S. Biira, N. Tiep, T.Thabethe, Thermodynamics kinetics of boron carbide under gamma irradiation dose, *International Journal of Modern Physics B*, 33, No. 9 (2019) 1950073.
  17. 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*, 74, No. 4, 2019, pp. 363-367.
  18. M.N. Mirzayev, Oxidation kinetics of boron carbide ceramic under high gamma irradiation dose in the high temperature, *Ceramics International*, 46 (3), 2816-2822, 2020.
  19. Mirzayev, M.N., Demir, E., Mammadov, K.F. et al. Amorphisation of boron carbide under gamma irradiation. *Pramana, Journal of Physics*, 94, 110 (2020).

20. *M.N. Mirzayev*, Study thermodynamic assessment of the B-C and B-Si binary systems with swift heavy ions and high intense electron beam irradiation at the low temperature, *Modern Physics Letters B*, 34(34) 2050395, 2020.
21. *M.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.
22. *R.F. Hashimov, F.A. Mikailzade, S.V. Trukhanov, N.M. Lyadov, I.R. Vakhitov, A.V. Trukhanov, M.N. Mirzayev*, Structure and thermal analysis of Ba<sub>0.5</sub>La<sub>0.5</sub>MnO<sub>3</sub> polycrystalline powder, *International Journal of Modern Physics B*, 33 (2019) 1950244.
23. *Mannab Tashmetov, Bekhzodjon Abdurakhimov, Matlab N. Mirzayev and To Xuan Thang*, The effect of electron beam to nanocrystallites size, strain and structural parameters of the silicon carbide nanopowder, *International Journal of Modern Physics B*, 33, No. 20, 1950223 (2019).
24. *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 behaviour of nano boron trioxide under high intense electron beam irradiation, *Advanced Physical Research*, 1 (2), 63-69, 2019.
25. *E. Demir, M.N. Mirzayev, A.B. Tuğrul, B.A. Abdurakhimov, S.I. Karaaslan*, An experimental study on microstructure of tungsten alloys, *Surface Review and Letters*, 27 (07), 1950169, 2020.
26. *Liangliang Lin, Sergey A. Starostin, Sirui Li, Saif A. Khan, Volker Hessel*, Synthesis of yttrium oxide nanoparticles via a facile microplasma-assisted process, *Chemical Engineering Science* 178 (2018) 157–166.
27. *M.N. Mirzayev*, Simultaneous measurements of heat flow rate and thermal properties of nano boron trioxide under neutron irradiation at the low and high temperature, *Vacuum*, (2020) 173, 109162.
28. *M.N. Mirzayev, B.A. Abdurakhimov, E. Demir, A.A. Donkov, E. Popov, M.Yu. Tashmetov, I.G. Genov, T.T. Thabethe, K. Siemek, K. Krezhov, F. Mamedov, D.M. Mirzayeva, M.V. Bulavin, V.A. Turchenko, T.X. Thang, T.Z. Abdurakhmonov, P. Horodek*, Investigation of the formation of defects under fast neutrons and gamma irradiation in 3C-SiC nano powder, *Physica B: Condensed Matter*. 611 (2021) 412842.
29. *M.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.
30. *Y.I. Aliyev, P.R. Khalilzade, Y.G. Asadov, T.M. Ilyasli, F.M. Mammadov, N.A. Ismayilova, M.N. Mirzayev, S.H. Jabarov, N.T. Dang*, Behavior of thermal properties of AgCu<sub>1-x</sub>FexS compounds under non-isothermal conditions, *International Journal of Modern Physics B*, 33 (28), 1950339, 2020

Redaksiyaya daxil olub 17.07.2021