

## BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> HEKSAFERRİTLƏRİNİN QURULUŞ VƏ MAQNİT XASSƏLƏRİNİN TƏDQIQI

Ə.İ. MƏMMƏDOV, R.Z. MEHDİYEVƏ, S.H. CABAROV, R.E. HÜSEYNOV,  
A.H. ƏSƏDOV, X.Ə. ƏHMƏDOV

AMEA, Fizika İnstitutu, H. Cavid pr. 131, AZ-1143, Bakı  
r.e.huseynov@gmail.com

BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> heksaferritlərinin kristal quruluşu, maqnit xüsusiyyətləri Al atomlarının  $x = 0.1-1.2$  konsentrasiyası aralığında rentgen, neytron difraksiyası, skanlayıcı elektron mikroskopiyası, Raman spektroskopiyası, infraqırmızı spektroskopiyası, vibrasiyalı maqnitometriya, termik analiz metodları öyrənilmişdir. BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> bərk məhlullarının kristal quruluşunun Al atomlarının verilmiş konsentrasiyası intervalında dayanıqlı olması müəyyən edilmişdir. Bu birləşmələrə daxil olan dəmir atomunun maqnit momenti təyin edilmiş və müəyyən edilmişdir ki, birləşmələrin tərkibində alüminium diamaqnit ionlarının konsentrasiyası artdıqca dəmir ionlarının maqnit momentlərinin qiymətləri azalır. Xüsusi maqnit momentinin  $\sigma = 49.6 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kq}$  ( $x = 0.1$ ) qiymətindən  $\sigma = 32 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kq}$  ( $x = 1.2$ ) qiymətinə qədər azalması müəyyən edilmişdir. Raman və infraqırmızı spektroskopiyaya metodları ilə bu bərk məhlullarda istilik rəqslərinin konsentrasiyadan asılı olaraq dəyişmə mexanizmi müəyyən edilmişdir. Infraqırmızı spektroskopiyaya metodunun nəticələri ilə Raman spektroskopiyasının nəticələrinin müqayisəsi aparılmışdır. Bu bərk məhlulların diferensial termik və termoqravimetrik analizləri aparılmış, müəyyən edilmişdir ki, sintez edilmiş birləşmələr geniş temperatur diapozonunda termik dayanıqlılığını və eyni quruluş fazasını saxlayır.

**Açar sözlər:** Seqnetoelektrik, Ferromaqnit, Heksaferritlər, Multiferroik, Rentgen difraksiyası, Neytron difraksiyası  
**PACs:** 81.40.Vw, 61.05.C-, 77.80.B-

### 1. GİRİŞ

Son zamanlar heksaqonal sinqoniyalı kristal quruluşu malik olan sabit maqnit xassəli BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> birləşməsi informasiya daşıyıcı material kimi əhəmiyyətli birləşmə olaraq geniş tədqiq edilir [1]. Həm seqnetoelektrik, həm də ferromaqnit xassələri müşahidə edilən multiferroiklər müasir elektronika üçün əvəzəlməz materiallardır. Ancaq bu materialların çoxunda normal şəraitdə hər iki ferroik xassəni müşahidə etmək mümkün deyildir. Belə materiallara misal olaraq perovskit (BiMnO<sub>3</sub> və s.) [2] və ikiqat perovskit multiferroikləri (Bi<sub>2</sub>MnO<sub>3</sub> və s.) [3] göstərmək olar. Otaq temperaturunda maqnit və seqnetoelektrikliyi müşahidə etmək üçün maqnit xassəli maqnit ionlarını diamaqnit ionları ilə əvəz edilməsilə maqnetizmi zəiflətmək və seqnetoelektrikliyi gücləndirmək imkanı yaranır. Bu tip birləşmələr arasında ən çox geniş tədqiq ediləndən biri də barium heksaferritin əsasında alınmış bərk məhlullardır. Maqnit xassələrinin tədqiqi göstərir ki, BaFe<sub>12-x</sub>Me<sub>x</sub>O<sub>19</sub> (Me = Al, In, Ga və s.) bərk məhlulları  $x = 0.1-1.2$  intervalında heksaqonal simmetriyalı kristal quruluşlarını saxlayırlar və maqnit xassələrinə malik olurlar [4-6].

Maqnit aktiv olan Fe<sup>3+</sup> ionları P<sub>63/mmc</sub> fəza qrupuna malik olan *M* tip heksaqonal sinqoniyalı quruluşda beş qeyri-ekvivalent kristalloqrafik mövqələrdə yerləşirlər. Belə ki, oksigen atomları ilə əhatə olunmuş oktaedr (Fe1 - 2a, Fe4 - 4f<sub>V1</sub> və Fe5 - 12k), tetraedr (Fe3 - 4f<sub>V2</sub>) və pentaedr (bipiramida) (Fe2 - 2b) şəklində olurlar [7]. Bu birləşmələrin maqnit xassələrinin tədqiqi göstərmişdir ki, ferrimaqnitdən paramaqnitə faza keçidi 740 K Kuri temperaturundan aşağıda 12 Fe<sup>3+</sup> kationu, biri-birinə antiparalel olan beş fərqli qəfəsəlti

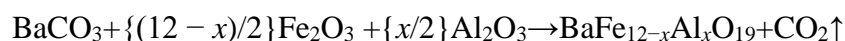
maqnit yaradır: 1 ədəd Fe1↑, 2 ədəd Fe2↓, 1 ədəd Fe3↑, 2 ədəd Fe4↓, 6 ədəd Fe5↑ [ 8 ].

Barium heksaferritin uzun illər maqnit xüsusiyyətlərinin öyrənilməsinə baxmayaraq, elektrik xüsusiyyətlərinin öyrənilməsinə son illər başlanılmışdır. BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> –da spontan olaraq polyarlaşma və maqnit xassələrinin tədqiqindən görünür ki, bu birləşmələrdə maqnit xassələri ilə yanaşı seqnetoelektrik xassələri də normal şəraitdə, otaq temperaturunda mövcuddur [9, 10]. BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> bərk məhlullarında  $x=0.1-1.2$  intervalında tədqiqatlarla müəyyən edilmişdir ki, bu bərk məhlullar da otaq temperaturunda seqnetoelektrik xassələrinə malikdirlər.

Bu işdə, BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> bərk məhlullarının  $x=0.1-1.2$  intervalında kristal və maqnit quruluşları tədqiq edilmiş, müxtəlif kristalloqrafik mövqələrdə yerləşən Fe<sup>3+</sup> ionlarının maqnit momentləri təyin edilmişdir.

### 2. TƏCRÜBƏ

Toz halında hazırlanmış  $x = 0.1-1.2$  intervalında BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> heksaqonal ferritlərinin keramik nümunələri “yüksək təmiz” markalı Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> və BaCO<sub>3</sub> –dən standart metodla yüksək temperatur sobalarında sintez edilmişdir. Sintez prosesində ilkin olaraq barium karbonat və verilmiş oksidlər müəyyən miqdarda qarışdırılmış, daha sonra 1473K temperaturda 6 saat saxlanılmışdır. Son mərhələdə 1573 K temperaturda 6 saat saxlanılmışdır. Sonda alınmış nümunələr aşağı sürətlə (100°C saat<sup>-1</sup>) soyudulmuşdur. Təcrübələr açıq havada aparılmışdır. BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> nümunələrinin alınma reaksiyaları aşağıdakı kimidir:



Əldə olunmuş nümunələrin kristal quruluşu D8 Advance (Bruker) rentgen difraktometrində (40 kV, 40 mA, CuK $\alpha$ -şüalanma  $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) öyrənilmişdir. Əldə olunmuş spektrlər çoxkanallı analizatorda saxlanılmış, birinci mərhələdə barium heksaferrit və onun bərk məhlullarının quruluş parametrlərinin baza məlumatları ilə müqayisə edilərək fəza analizləri aparılmışdır. Sonrakı mərhələdə isə birləşmələrin kristal quruluşları ətraflı analiz edilmişdir. Kristal quruluşun analizi FullProf proqramının 2016 versiyası ilə Ritveld metodu ilə aparılmışdır.

Bərk məhlulların normal şəraitdə və otaq temperaturunda SEM – skanedici elektron mikroskopunda (ZEISS, SIGMA VP) səth morfoloqiyası tədqiq edilmişdir.

Otaq temperaturunda və normal şəraitdə BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x = 0.1-1.2$ ) bərk məhlullarının atom dinamikasının öyrənilməsi zamanı Raman spektroskopiyası tədqiqatları helium-neon lazerli LabRam spektrometrindən ( $\lambda = 632 \text{ nm}$ ) istifadə edilmişdir. Xarakterik rəqs modalarını müşahidə etmək üçün  $\nu=200-800\text{sm}^{-1}$  oblastında Raman spektrləri alınmışdır.

İQ spektroskopiya tədqiqatları “Varian 640 FT-IR” spektrometrində yerinə yetirilmişdir. Bu bərk məhlullar üçün  $400-800 \text{ sm}^{-1}$  oblastında Furiye-İQ spektrometrində diffuz səpilmə spektrləri alınmışdır.

Neytron difraksiyası təcrübələri otaq temperaturunda İBR-2 impuls reaktorunun (BNTI, Dubna, Rusiya) Furiye difraktometrində yerinə yetirilmişdir. Neytronoqrammalar  $\pm 152^\circ$  bucaq altında yerləşən detektorlar vasitəsilə  $0,6-3,6 \text{ \AA}$  intervalında müstəvilər arası məsafələrdə qeyd edilmişdir. Əldə olunmuş

spektrlər FullProf proqramında Ritveld metodu ilə analiz edilmişdir [12].

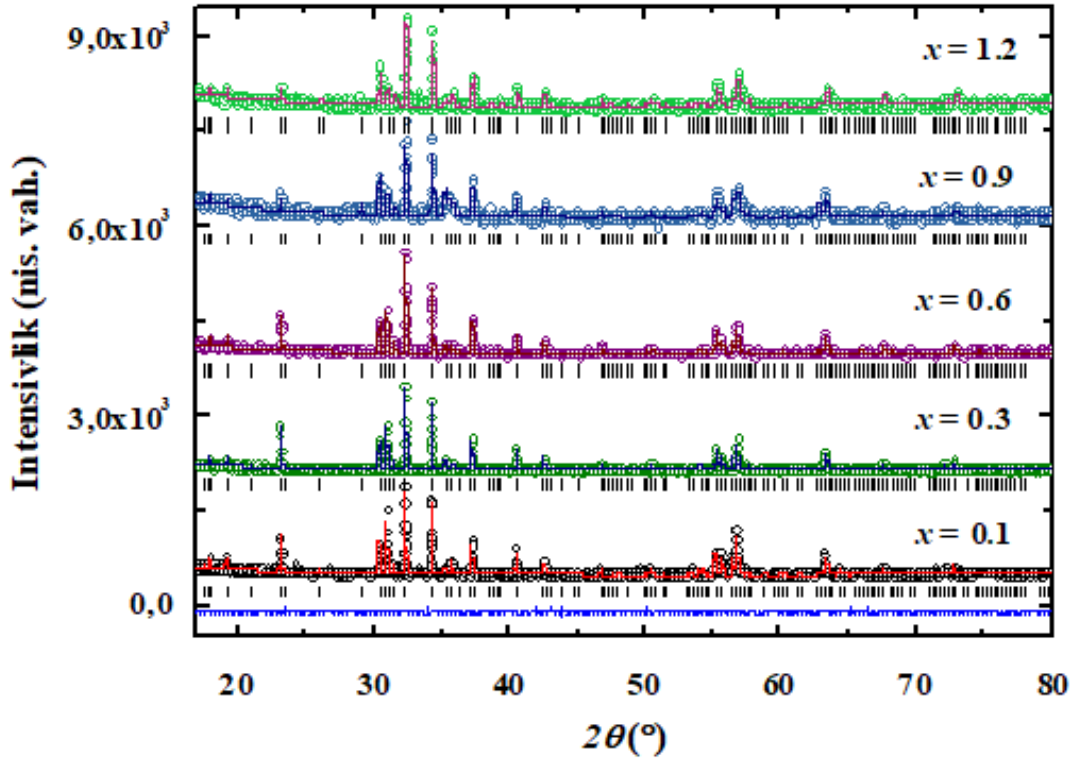
Nümunələrinin maqnit xassələri helium və otaq temperaturunda “Helium Free Liquid” universal ölçü sistemində vibrasiyalı maqnitometriya metodu ilə icra edilmişdir.

### 3. NƏTİCƏLƏRİN MÜZAKİRƏSİ

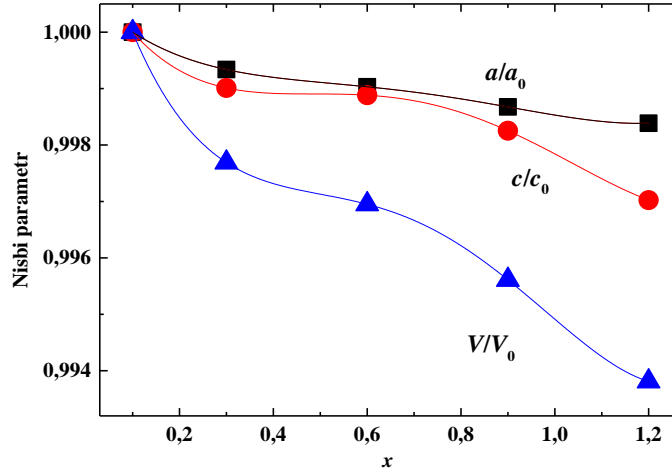
#### a) Rentgen difraksiyası

Şəkil 1-də BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x=0.1-1.2$ ) heksaferritlərinin toz halında olan nümunələrinin otaq temperaturunda və normal şəraitdə çəkilmiş rentgen difraksiya spektrləri verilmişdir. Spektrlərə görə müəyyən olunmuşdur ki, Al atomlarının verilmiş konsentrasiya intervalında BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> bərk məhlulları P6<sub>3</sub>/mmc fəza qruplu heksaqonal sinqoniyalı kristal quruluşu malikdir. BaFe<sub>11.9</sub>Al<sub>0.1</sub>O<sub>19</sub> birləşməsində  $a=5.889(2)\text{ \AA}$ ,  $c = 23.186(6) \text{ \AA}$  alınmışdır.

Hər bir elementar qəfəsdə iki BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> molekul ( $Z = 2$ ) olduğu üçün bir elementar qəfəsdə 2 barium, 24 dəmir və ya alüminium, 38 oksigen atomu daxil olur. Müəyyən edilmişdir ki, bu nümunələrdə Al atomlarının konsentrasiyası artdıqca kimyəvi təzyiq yaranır və beləliklə bu qəfəs parametrlərinin azalması ilə nəticələnir. Bu isə Al<sup>3+</sup> ionlarının ( $r_{\text{Al}} = 0.535 \text{ \AA}$ ) Fe<sup>3+</sup> ionlarına ( $r_{\text{Fe}} = 0.645 \text{ \AA}$ ) nəzərən daha kiçik ion radiuslarına malik olması ilə izah olunur. Şəkil 2-də  $a$ ,  $c$  parametrlərinin və  $V$  həcmnin nisbi qiymətlərinin konsentrasiyadan asılı olaraq dəyişməsinin asılılıqları verilmişdir. Asılılıqlardan görünür ki, birləşmələrin tərkibində Al atomlarının konsentrasiyası artdıqca,  $c$  parametrinə nisbətən  $a$  parametri daha az dəyişir.



Şəkil 1. BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x = 0.1 - 1.2$ ) nümunələrinin rentgen difraksiya spektrləri



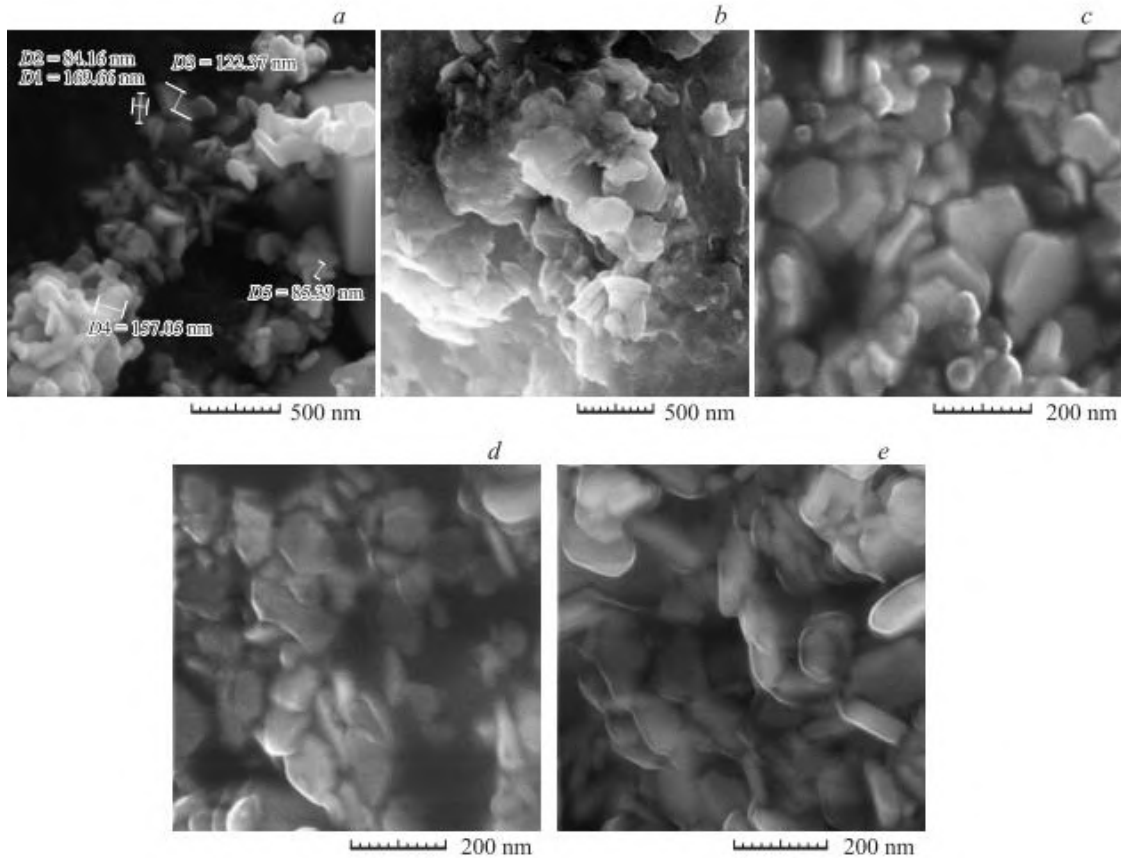
Şəkil 2.  $a$  və  $c$  qəfəs parametrlərinin və  $V$  elementar həcmnin aluminium atomlarının konsentrasiyasından asılı olaraq dəyişməsi

### b) Skanedic elektron mikroskopiyası

$\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0,1, 0,3, 0,6, 0,9, 1,2$ ) bərk məhlullarının toz halında alınmış nümunələrinin səth quruluşu və ölçü effektləri bərk cisimlərin morfoloqiyasını tədqiq etmək üçün istifadə edilən müasir SEM – də (Scanning Electron Microscope, ZEISS, SIGMA VP) öyrənilmişdir. Alınan səth morfoloqiyası şəkil 3 – də verilmişdir. Görünür ki,  $\text{BaFe}_{11,9}\text{Al}_{0,1}\text{O}_{19}$  birləşməsində toz dənələrinin ölçüləri nanometr ölçüyə düşür və dənələrin ölçüləri 85 nm-dən 157 nm-ə kimi müşahidə olunur. Konsentrasiyasının 0,1 və 0,3 qiymətlərində ovuntu dənələri 500 nm miqyasda aydın görünür. Al

atomlarının konsentrasiyasının 0,6, 0,9 və 1,2 qiymətlərində isə ovuntu dənələrinin ölçülərində kiçilmə baş verir və ovuntu dənələri 200 nm miqyasda müşahidə edilir.  $\text{BaFe}_{10,8}\text{Al}_{1,2}\text{O}_{19}$  birləşməsində kristallitlərin ölçüləri 32 nm-dən 106 nm-ə kimi müşahidə edilir.

Göründüyü kimi, tədqiq olunan bərk məhlullarında maqnit xassəli dəmir atomlarının qismən diamagnet alüminium atomları ilə əvəzləmə zamanı, ion radiuslarındakı fərqlərin hesabına səth quruluşlarında (morfoloqiyada) və ölçü effektlərində də fərq müşahidə edilir. Belə ki, İon radiusu azaldığı üçün kristallitlərin ölçüləri daha kiçik oblastlara doğru sürüşür.



Şəkil 3.  $x = 0,1$ -(a),  $0,3$ -(b),  $0,6$ -(c),  $0,9$ -(d) və  $1,2$ -(e) konsentrasiyalarında  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  bərk məhlullarının SEM-də alınmış morfoloqiyası

**c) Raman Spektroskopiyası.**

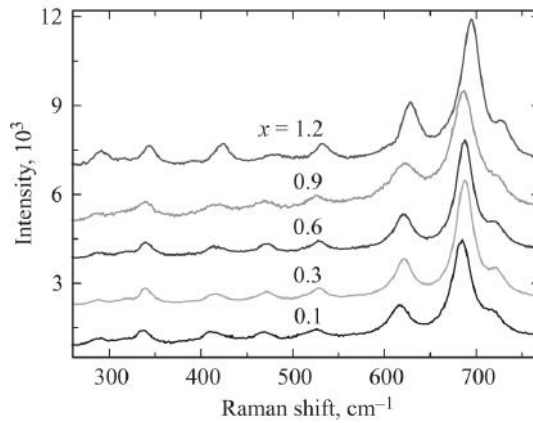
Bərk cisimlərin kristal quruluşunun kompleks tədqiqi zamanı, kristal quruluşu təşkil edən atomların düzülüşü ilə yanaşı, həm də atomların dinamikasının da öyrənilməsi vacibdir. Atom dinamikasını öyrənmək üçün Raman spektroskopiyası və infraqırmızı spektroskopiya metodları yaxşı metodlar hesab edilirlər. BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> bərk məhlullarının Al atomlarının 0.1 - 1.2 konsentrasiyası intervalında alınmış Raman spektrləri şəkil 4-də göstərilmişdir. Spektrlərdə alınmış maksimumların hər biri Gauss funksiyasına uyğun olaraq Origin proqramında interpretasiya edilmişdir. Şəkil 4-dən görüldüyü kimi BaFe<sub>11.9</sub>Al<sub>0.1</sub>O<sub>19</sub> birləşməsinin Raman spektrində müşahidə edilən maksimumlar əsasən  $\nu=200-800 \text{ sm}^{-1}$  tezlik intervalına düşür. Bu tezlik intervalında müxtəlif rəqs modalarına uyğun gələn 8 maksimum müşahidə edilmişdir:  $\nu_1 = 289 \text{ sm}^{-1}$ ,  $\nu_2 = 337 \text{ sm}^{-1}$ ,  $\nu_3 = 413 \text{ sm}^{-1}$ ,  $\nu_4 = 469 \text{ sm}^{-1}$ ,  $\nu_5 = 525 \text{ sm}^{-1}$ ,  $\nu_6 = 617 \text{ sm}^{-1}$ ,  $\nu_7 = 685 \text{ cm}^{-1}$  və  $\nu_8 = 718 \text{ cm}^{-1}$ . Verilmiş rəqs modaları barium heksaqonal ferrit və onun bərk məhlullarının rəqs modalarına uyğun aşağıdakı şəkildə interpretasiya edilmişdir:

- $\nu_1 = 289.11 \text{ sm}^{-1}$  modası O – Fe - O rabitəsinin;
- $\nu_2 = 337.19 \text{ sm}^{-1}$  modası O – Fe - O rabitəsinin;
- $\nu_3 = 413.56 \text{ sm}^{-1}$  modası Fe(12k) / Al(12k)O<sub>6</sub> oktaedrinin;
- $\nu_4 = 469.42 \text{ sm}^{-1}$  modası Fe(2a) / Al(2a)O<sub>6</sub> və Fe(12k) / Al(12k)O<sub>6</sub> oktaedrlərinin;
- $\nu_5 = 525.34 \text{ sm}^{-1}$  rəqs modası Fe(2a) / Al(2a)O<sub>6</sub> və Fe(12k) / Al(12k)O<sub>6</sub> oktaedrlərinin;
- $\nu_6 = 617.65 \text{ sm}^{-1}$  modası Fe(2a) / Al(2a)O<sub>6</sub>, Fe(12k) / Al(12k)O<sub>6</sub> və Fe(4f<sub>2</sub>)/Al(4f<sub>2</sub>)O<sub>6</sub> oktaedrlərinin;

- $\nu_7 = 684.24 \text{ sm}^{-1}$  modası Fe(2b)/Al(2b)O<sub>5</sub> bipiramidasının;
- $\nu_8 = 717.54 \text{ sm}^{-1}$  modası: Fe(4f<sub>1</sub>) / Al(4f<sub>1</sub>)O<sub>4</sub> tetraedrinin rəqslərinin tezliklərinə uyğun gəlir.

Raman spektrlərinə baxsaq görərik ki, Al atomlarının  $0.1 \leq x \leq 1.2$  konsentrasiyası intervalında BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> bərk məhlullarının alınmış konsentrasiyanın qiyməti artdıqca rəqs modalarının qiymətlərində yüksək tezliklər oblastına doğru artma baş vermişdir. Bu hadisə, Fe atomlarının Al atomlarına nəzərən daha böyük ion radiusuna malik olması hesabına atomlar arasında əmələ gələn kovalent rabitələrin uzunluqlarının kiçilməsi ilə izah edilir. Belə ki, yüksək təzyiqlərdə aparılmış raman tədqiqatları göstərir ki, təzyiqin təsiri ilə atomlararası rabitələrin uzunluqlarında azalma baş verdikcə, rəqs modalarının tezliklərinin qiymətlərində artma müşahidə edilir. Digər tərəfdən, əvvəlki quruluş tədqiqatları zamanı müəyyən edilmişdir ki, birləşmələrin tərkibindəki atomları ion radiusu kiçik olan digər element atomları ilə əvəzləmələrin aparıldığı zaman kimyəvi təzyiqin yaranması nəticəsində kimyəvi rabitələrdə kiçilmə baş verə bilər [14]. Ona görə də, Raman spektrlərində rəqs modalarının ion radiuslarının kiçilməsi hesabına yaranmış dəyişiklikləri də təzyiqin təsiri ilə baş vermiş dəyişikliklərin mexanizminə uyğun olaraq izah edilir.

Raman modalarının tezliklərinin otaq temperaturunda və normal şəraitdə Raman modalarının tezliklərinin Al atomlarının konsentrasiyasından asılı olaraq dəyişmə mexanizmi  $k_\nu = -(1/\nu_0)(d\nu/dx)_{T,P}$  münasibəti ilə öyrənilmişdir. BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> bərk məhlullarının rəqs modaları və rəqs modalarının konsentrasiyadan asılı olaraq dəyişməsi cədvəl 1 - də verilmişdir.



Şəkil 4. Otaq temperaturunda BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> (x = 0.1-1.2) nümunələrinin Raman spektrləri.

Cədvəl 1.

BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> (x = 0.1-1.2) heksaqonal ferritlərinin Raman spektroskopiyası ilə alınmış rəqs modaları və rəqs modalarının konsentrasiyadan asılı olaraq dəyişmə əmsalları.

X	0.1	0.3	0.6	0.9	1.2	$k_\nu$
$\nu_1 (\text{sm}^{-1})$	289.11	288.77	289.27	289.61	292.32	0.00908
$\nu_2 (\text{sm}^{-1})$	337.19	339.23	340.11	340.88	343.26	0.01363
$\nu_3 (\text{sm}^{-1})$	413.56	416.41	416.98	417.29	423.06	0.01816
$\nu_4 (\text{sm}^{-1})$	469.42	471.85	472.44	472.44	482.19	0.02086
$\nu_5 (\text{sm}^{-1})$	525.34	528.15	529.12	529.69	533.23	0.01141
$\nu_6 (\text{sm}^{-1})$	617.65	621.33	621.64	621.78	629.11	0.01383
$\nu_7 (\text{sm}^{-1})$	684.24	687.47	688.26	688.75	694.53	0.01092
$\nu_8 (\text{sm}^{-1})$	717.54	721.31	721.96	722.52	727.35	0.01034

Cədvəl 1 - də təqdim edilən qiymətlərdə görüldüyü kimi, müşahidə edilən Raman modalarının arasında ən böyük  $k_v$  dəyişmə əmsalı  $v_4 = 469.42 \text{ sm}^{-1}$  modasında müşahidə edilmişdir. Bu rəqs modası müxtəlif kristalloqrafik mövqelərdə yerləşən dəmir (əvəzləmələr zamanı alüminium) atomlarının əmələ gətirdikləri  $\text{Fe}(2a)/\text{Al}(2a)\text{O}_6$  və  $\text{Fe}(12k)/\text{Al}(12k)\text{O}_6$  oktaedrlərinin rəqslərinə uyğundur. Ən kiçik  $k_v$  əmsalı isə  $v_1 = 289.12 \text{ sm}^{-1}$  modasında müşahidə edilmişdir ki, bu rəqs modaları da dəmir və oksigen atomlarının əmələ gətirdikləri O-Fe-O rabitələrinin rəqslərinə uyğundur. Buradan belə nəticəyə gəlmək olur ki,  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x=0.1-1.2$ ) birləşmələrində Fe atomları qismən Al atomları ilə əvəz edildikcə, əsas dəyişikliklər  $\text{Fe}(\text{Al})\text{O}_6$  oktaedrlərində baş verir ki, bu da quruluş tədqiqatları ilə alınmış nəticələri təsdiq edir. Rəqs modalarının dəyişmə mexanizmlərində kifayət qədər fərq olmalarına baxmayaraq, bütün modaların dəyişmə sürəti eyni tərtibdədir və dəyişmə əmsalının orta qiyməti  $k_{\text{vor}} = 0.014$  olur.

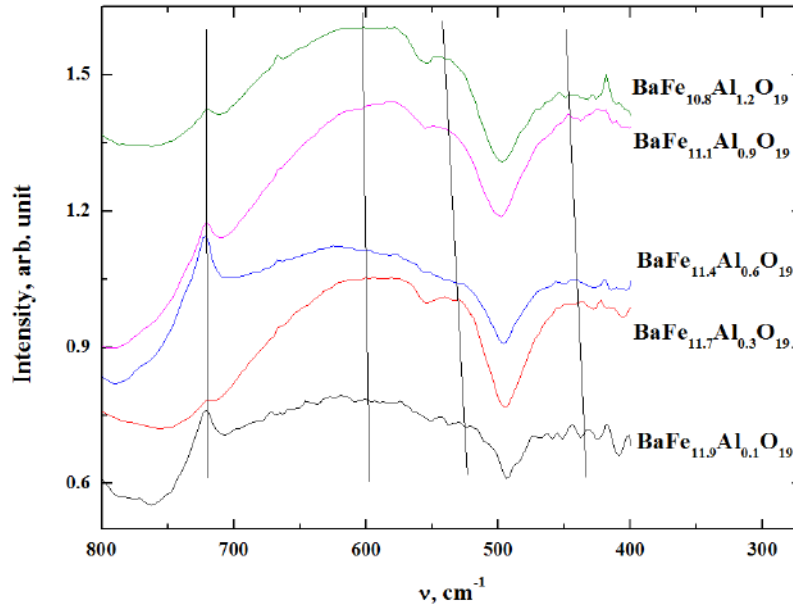
**d) İnfraqırmızı spektroskopiya.**

$\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) birləşmələrinin atom dinamikası infraqırmızı spektroskopiya metodu ilə tədqiq edilmişdir. Otaq temperaturunda və normal şəraitdə müxtəlif tərkiblər üçün alınmış infraqırmızı spektrlər Şəkil 5-də verilmişdir.  $\text{BaFe}_{11.9}\text{Al}_{0.1}\text{O}_{19}$  birləşməsinin spektrinə nəzər salsaq görərik ki,  $\nu = 800-400 \text{ sm}^{-1}$  tezlik intervalında 4 maksimum müşahidə edilmişdir:

$\nu_1 = 720.82 \text{ sm}^{-1}$ ,  $\nu_2 = 604.21 \text{ sm}^{-1}$ ,  $\nu_3 = 524.14 \text{ sm}^{-1}$  və  $\nu_4 = 441.42 \text{ sm}^{-1}$ . Əvvəlki tədqiqatlar zamanı Raman spektroskopiyası ilə alınmış rəqs modaları bu rəqs modalarına uyğun gəlir.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) bərk məhlulları üçün infraqırmızı spektroskopiya metodu ilə müxtəlif tezliklərdə alınmış rəqs modaları Raman spektroskopiya metodu ilə alınmış rəqs modalarına uyğun olaraq aşağıdakı şəkildə interpretasiya edilmişdir:

- $\nu_1 = 720.81 \text{ sm}^{-1}$  modası: Fe (3)/Al(3)O<sub>4</sub> tetraedrlərinin,
- $\nu_2 = 604.22 \text{ sm}^{-1}$  modası: Fe (1)/Al(1)O<sub>6</sub>, Fe(4)/Al(4)O<sub>6</sub> və Fe(5)/Al(5)O<sub>6</sub> oktaedrlərinin,
- $\nu_3 = 524.14 \text{ sm}^{-1}$  modası: Fe (1)/Al(1)O<sub>6</sub> və Fe(5)/Al(5)O<sub>6</sub> oktaedrlərinin,
- $\nu_4 = 443.52 \text{ sm}^{-1}$  modası: Fe (1)/Al(1)O<sub>6</sub> və Fe(5)/Al(5)O<sub>6</sub> oktaedrlərinin rəqslərinə uyğun gələn modalar hesab edilir.

Şəkil 5-dən görünür ki,  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1 - 1.2$ ) birləşmələrinin tərkibində Al atomlarının konsentrasiyası artdıqca, infraqırmızı spektroskopiya metodu ilə alınmış rəqs modalarının tezliklərində yüksək tezliklər oblastına doğru sürüşmə baş vermişdir. Rəqs modalarının tezliklərinin Al atomlarının  $x$  konsentrasiyasından asılı olaraq dəyişmə mexanizmi  $k_v = -(1/\nu_0)(d\nu/dx)_{T,P}$  münasibəti ilə öyrənilmişdir.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  bərk məhlullarının rəqs modaları və rəqs modalarının konsentrasiyadan asılı olaraq dəyişmə mexanizmləri cədvəl 2 - də verilmişdir.



Şəkil 5. Otaq temperaturunda  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  nümunələrinin infraqırmızı spektrləri.

Cədvəl 2.

$\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) bərk məhlullarının infraqırmızı spektroskopiya ilə alınmış rəqs modaları və rəqs modalarının konsentrasiyadan asılı olaraq dəyişmə əmsalları

X	0.1	0.3	0.6	0.9	1.2	$k_v$
$\nu_1 (\text{sm}^{-1})$	720.82	720.95	721.42	721.75	722.23	0.00174
$\nu_2 (\text{sm}^{-1})$	604.21	604.34	604.36	606.15	607.12	0.00459
$\nu_3 (\text{sm}^{-1})$	524.14	531.93	532.62	541.14	543.16	0.03178
$\nu_4 (\text{sm}^{-1})$	443.52	444.87	447.65	448.12	450.62	0.01397

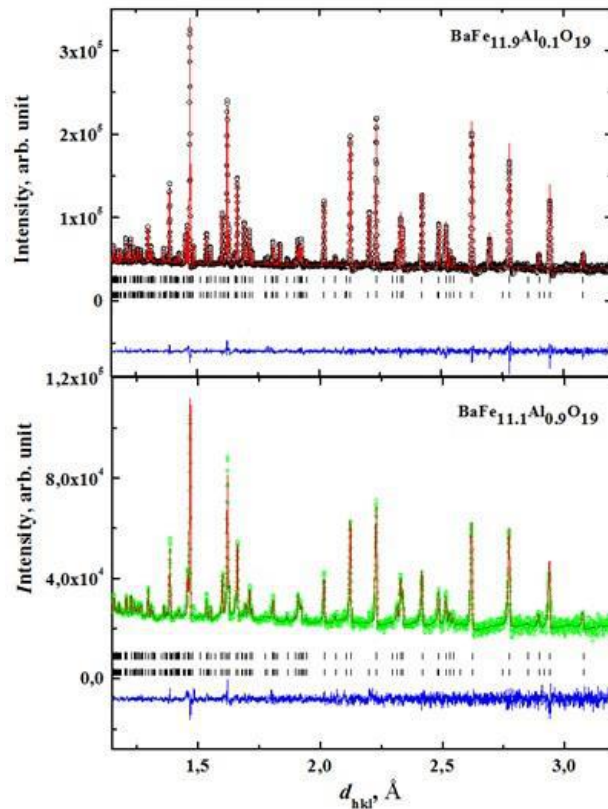
Cədvəl 2-dən görünür ki,  $\nu_3=524.14 \text{ sm}^{-1}$  modasında ən böyük  $k_\nu$  əmsali müşahidə edilmişdir. Bu rəqs modaları yuxarıda göstəriləyi kimi Fe(1)/Al(1)O<sub>6</sub> və Fe(5)/Al(5)O<sub>6</sub> oktaedrlərinin rəqslərinə uyğundur. Ən kiçik  $k_\nu$  əmsali  $\nu_1=720.82 \text{ sm}^{-1}$  modasında müşahidə edilmişdir ki, bu rəqs modaları Fe(3)/Al(3)O<sub>4</sub> tetraedrlərinin rəqslərinə uyğundur. Buradan məlum olur ki, Fe atomları qismən Al atomları ilə əvəz edildikcə BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x=0.1-1.2$ ) birləşmələrində əsas dəyişikliklər  $\vec{c}$  oxu boyunca düzülmiş və mərkəzlərdə Fe(Al) atomları yerləşən oktaedrlərdə baş verir.

**e) Neytron difraksiyası.**

BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> multiferroik birləşmələrində müxtəlif kristalloqrafik mövqələrdə yerləşən Fe atomlarının maqnit momentlərini təyin etmək üçün Al atomlarının  $0.1 \leq x \leq 1.2$  konsentrasiyası intervalında toz halında alınmış nümunələr otaq temperaturunda və normal şəraitdə neytron difraksiyası metodu ilə tədqiq edilmişdir. BaFe<sub>11.9</sub>Al<sub>0.1</sub>O<sub>19</sub> və BaFe<sub>11.1</sub>Al<sub>0.9</sub>O<sub>19</sub> birləşmələrinin

nümunələri üçün alınmış neytron difraksiyası spektrləri şəkil 6-də verilmişdir. Difraksiya spektrlərinin analizindən alınmışdır ki, bu birləşmələrin kristal quruluşları P6<sub>3</sub>mmc fəza qruplu heksaqonal kristal quruluşa tam uyğun gəlirlər. BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x=0.1-1.2$ ) birləşmələrinin qəfəs parametrlərinin qiymətləri:  $a \approx 5.8 \text{ Å}$ ,  $c \approx 23.1 \text{ Å}$  qiymətlərinə uyğun gəlir ki, bu da rentgen difraksiyası metodu ilə alınmış nəticələrə uyğun gəlir.

Neytron difraksiyası spektrlərinin analizindən müəyyən edilmişdir ki, bu birləşmələrin hər biri otaq temperaturunda ferrimaqnit xassələrə malikdirlər. Fe<sup>3+</sup> ionları heksaqonal kristal quruluşda  $O\vec{c}$  oxu istiqamətində düzülmüşdülər. Cədvəl 3-də Al atomlarının  $x$  konsentrasiyasının müxtəlif qiymətlərində BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x = 0.1-1.2$ ) bərk məhlullarında fərqli kristalloqrafik mövqələrdə ( $2a$ ,  $2b$ ,  $4fIV$ ,  $4fVI$  və  $12k$ ) yerləşən dəmir ionlarının maqnit momentlərinin qiymətləri verilmişdir.



Şəkil 6. BaFe<sub>11.9</sub>Al<sub>0.1</sub>O<sub>19</sub> və BaFe<sub>11.1</sub>Al<sub>0.9</sub>O<sub>19</sub> nümunələrinin otaq temperaturunda ölçülmüş və Ritvelmetodu ilə analiz edilmiş neytron difraksiyası spektrləri.

Cədvəl 3.

BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x = 0.1-1.2$ ) birləşmələrinin müxtəlif kristalloqrafik mövqələrdə yerləşən Fe atomlarının maqnit momentləri.

X	Konsentrasiya				
	0.1	0.3	0.6	0.9	1.2
Dəmir atomlarının maqnit momentləri ( $\mu_B$ )					
Fe1 (2a)	3.82	3.77	3.25	3.36	2.16
Fe2 (2b)	4.08	4.11	3.09	3.74	2.18
Fe3 (4fiv)	3.65	3.68	3.25	3.60	1.47
Fe4 (4fvi)	4.09	4.15	3.75	3.57	1.25
Fe5 (12k)	3.59	3.55	3.25	3.12	2.07

Al atomlarının konsentrasiyasının ən az olduğu halda ( $x=0.1$ ) 2a mövqeyində yerləşən Fe<sub>1</sub> atomlarının maqnit momentinin qiyməti  $\mu=3.82\mu_B$  olur, lakin konsentrasiyasının ən yüksək olduğu halda ( $x=1.2$ ) maqnit momentinin qiyməti azalır və  $\mu=2.16\mu_B$  qiymətinə malik olur. Göründüyü kimi maqnit momentinin qiymətində  $\Delta\mu = 1.66 \mu_B$  olmuşdur ki, bu da 43.5% təşkil edir. Digər dəmir atomlarının maqnit momentlərinə də baxsaq görərik ki, Al atomlarının konsentrasiyasının artması onlara da kifayət qədər təsir göstərir. Ən çox təsir  $4f_{VI}$  kristalloqrafik mövqeyində yerləşən Fe4 atomlarında müşahidə edilir. Al atomlarının ən kiçik qiymətinə malik olan BaFe<sub>11.9</sub>Al<sub>0.1</sub>O<sub>19</sub> birləşməsində maqnit momentinin ən yüksək qiyməti  $4f_{VI}$  kristalloqrafik mövqeyində yerləşən Fe4 atomunda müşahidə edildiyi halda ( $\mu = 4.09 \mu_B$ ), Al atomlarının ən böyük qiymətinə malik olan BaFe<sub>10.8</sub>Al<sub>1.2</sub>O<sub>19</sub> birləşməsində

maqnit momentinin ən yüksək qiyməti 2b kristalloqrafik mövqeyində yerləşən Fe2 atomunda müşahidə edilir ( $\mu = 4.09 \mu_B$ ). Bu onunla əlaqədardır ki, Al atomlarının hansı mövqedə dayanmış Fe atomlarını əvəz etməsi ehtimal xarakteri daşıyır. Dəmir və alüminium atomları kristal quruluşda eyni mövqedə dayanırlar. Ona görə də,  $\vec{c}$  oxu istiqamətində ardıcıl olaraq bir neçə Al atomu yerləşərsə, bu zaman maqnit momentlərinin qiymətində əsaslı şəkildə azalma müşahidə edilə bilər. Lakin, əksinə, bir neçə Fe atomu ardıcıl gələrsə, o zaman maqnit momentinin qiyməti barium heksaferrit birləşməsində Fe atomları üçün alınmış maqnit momentlərinin qiymətlərinə yaxınlaşır.

Barium heksaferritin elementar qəfəsinin ümumi maqnit momentini aşağıdakı düsturla hesablamaq mümkündür :

$$M_{Cəm}(T) = 1[\mu_{2a}(T)] + 1[\mu_{2b}(T)] - 2[\mu_{4fIV}(T)] - 2[\mu_{4fV}(T)] + 6[\mu_{12k}(T)]$$

burada  $T$  – maqnit momentlərinin hesablandığı temperaturdur. Otaq temperaturunda BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> bərk məhlulları üçün ümumiləşmiş maqnit momentini hesablasaq görərik ki, BaFe<sub>11.9</sub>Al<sub>0.1</sub>O<sub>19</sub> birləşməsi üçün  $\mu_{Cəm} = 13.96\mu_B$ , BaFe<sub>10.8</sub>Al<sub>1.2</sub>O<sub>19</sub> birləşməsi üçün  $\mu_{Cəm} = 11.32\mu_B$  qiymətinə malik olur. Al atomlarının  $0.1 \leq x \leq 1.2$  konsentrasiyası intervalında ümumiləşmiş maqnit momentlərinin qiymətləri cədvəl 4-də verilmişdir. Cədvəldən görünür ki, birləşmələrin kristal qəfəslərində diamaqnit Al<sup>3+</sup> ionlarının sayı çoxaldıqca, maqnit momentlərinin qiymətlərində azalma müşahidə edilir ki, bu da uzaq maqnit nizamlılığının zəifləməsinə səbəb olur. Məlumdur ki,  $T=0K$  temperaturda barium heksaferritdə Fe<sup>3+</sup> ionlarının maqnit momentləri  $\mu=5\mu_B$  olmalıdır[117]. Bu halda BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> birləşməsi üçün  $\mu_{Cəm} = 20\mu_B$  alınır. Nəzərə alsaq ki, istilik rəqslərinin yaranması hesabına mütləq sıfır temperaturda müqayisədə otaq temperaturunda maqnit momentinin qiyməti xeyli aşağı olur, o zaman görərik ki, BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> bərk məhlullarında Al atomlarının  $0.1 \leq x \leq 1.2$  intervalında maqnit xassələri kifayət qədər saxlanılır.

Cədvəl 4.

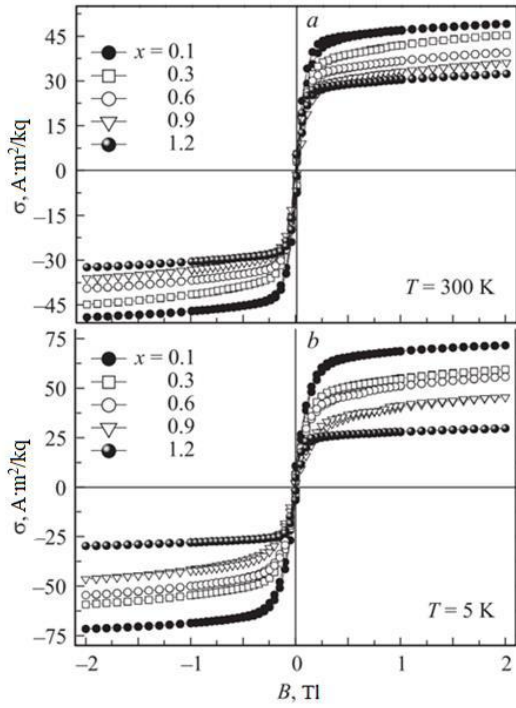
BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $0.1 \leq x \leq 1.2$ ) bərk məhlulları üçün ümumiləşmiş maqnit momentləri.

Konsentrasiya	Birləşmə	Ümumi maqnit momenti
$x = 0.1$	BaFe <sub>11.9</sub> Al <sub>0.1</sub> O <sub>19</sub>	13.96 $\mu_B$
$x = 0.3$	BaFe <sub>11.7</sub> Al <sub>0.3</sub> O <sub>19</sub>	13.52 $\mu_B$
$x = 0.6$	BaFe <sub>11.4</sub> Al <sub>0.6</sub> O <sub>19</sub>	11.84 $\mu_B$
$x = 0.9$	BaFe <sub>11.1</sub> Al <sub>0.9</sub> O <sub>19</sub>	11.48 $\mu_B$
$x = 1.2$	BaFe <sub>10.8</sub> Al <sub>1.2</sub> O <sub>19</sub>	11.32 $\mu_B$

#### a) Vibrasiyalı maqnitometriya

Vibrasiyalı maqnitometriya ferromaqnit, antiferromaqnit və ferrimaqnit materialların maqnit xassələrinin öyrənilməsi üçün tətbiq edilən və ən geniş yayılmış metodlardan biridir. Bu metod vasitəsilə temperatur və xarici maqnit sahənin təsiri altında maqnit materialların xüsusi maqnit momentləri təyin edilir. Vibrasiyalı maqnitometriya metodu ilə tədqiqat obyektləri

olan BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x = 0.1-1.2$ ) heksaqonal ferritlərinin maqnit xassələrinin kompleks şəkildə öyrənilməsi və neytron difraksiyası metodu ilə alınmış nəticələrin bir daha təsdiq edilməsi məqsədi ilə tədqiqatlar aparılmışdır. Məlumdur ki, aşağı temperaturda maqnit xassələrə malik olan materialların kristal quruluşlarında atomların istilik rəqslərinin amplitudunun və fluktuasiyaların azalması hesabına uzaq maqnit nizamlılığının güclənməsi baş verir. Aşağı temperaturalar oblastında xarici maqnit sahəsinin təsiri ilə alınmış histerezis əyri-ləri nümunələrin maqnit xassələri haqqında geniş məlumatlar əldə etməyə imkan verir. Ona görə də, otaq temperaturundan  $T = 5K$  temperatura qədər qədər aşağı temperaturalar oblastında xarici maqnit sahəsinin  $B=\pm 2Tl$  təsiri altında vibrasiyalı maqnitometriya metodu ilə BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x = 0.1 - 1.2$ ) heksaferrit nümunələrinin maqnit xassələri tədqiq edilmişdir. Birləşmələrin tərkibində Fe<sup>3+</sup> maqnit ionlarının Al<sup>3+</sup> diamaqnit ionları ilə qismən əvəz edilməsi zamanı maqnit xassələrinin dəyişməsi müəyyənləşdirilmişdir. Otaq temperaturunda və maye helium temperaturunda (5 K) BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $0.1 \leq x \leq 1.2$ ) bərk məhlullarının təyin edilmiş xüsusi maqnit momentlərinin xarici maqnit sahəsindən asılılıqları şəkil 7-də verilmişdir. Şəkildən görünür ki, xarici maqnit sahəsinin artması ilə xüsusi maqnit momentinin qiymətində artma baş verir. Bu sahənin təsiri ilə uzaq maqnit nizamlılığının güclənməsi ilə izah olunur. Eyni zamanda birləşmələrin tərkibində Al diamaqnit ionlarının konsentrasiyası artdıqca, xüsusi maqnit momentinin qiymətində azalma müşahidə edilir.  $T = 300K$  temperaturda (otaq temperaturunda) BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> bərk məhlullarının Al atomlarının konsentrasiyası artdıqca,  $B=\pm 2Tl$  xarici maqnit sahəsinin təsiri ilə xüsusi maqnit momenti  $\sigma=49.6 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kq}$  ( $x=0.1$ ) –dən  $\sigma=32 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kq}$  ( $x=1.2$ )-ə kimi azalması baş vermişdir. Bu Al<sup>3+</sup> diamaqnit ionlarının təsiri ilə uzaq maqnit nizamlılığının pozulmasının nəticəsidir. Xarici maqnit sahəsinin təsiri altında xüsusi maqnit momentinin qiymətinin  $\Delta\sigma=17.6 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kq}$  (35.5%) baş vermişdir. Cədvəl 5-də alüminium atomlarının müxtəlif konsentrasiyalarında BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> bərk məhlullarında xüsusi maqnit momentinin qiymətləri verilmişdir.



Şəkil 7.  $T = 300$  K (a) və  $T = 5$  K temperaturda (b) BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x = 0.1, 0.3, 0.6, 0.9$  və  $1.2$ ) bərk məhlullarının xüsusi maqnit momentlərinin xarici maqnit sahəsindən asılılıqları

Cədvəl 5.

BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> bərk məhlullarının müxtəlif konsentrasiyalarda xüsusi maqnit momentləri

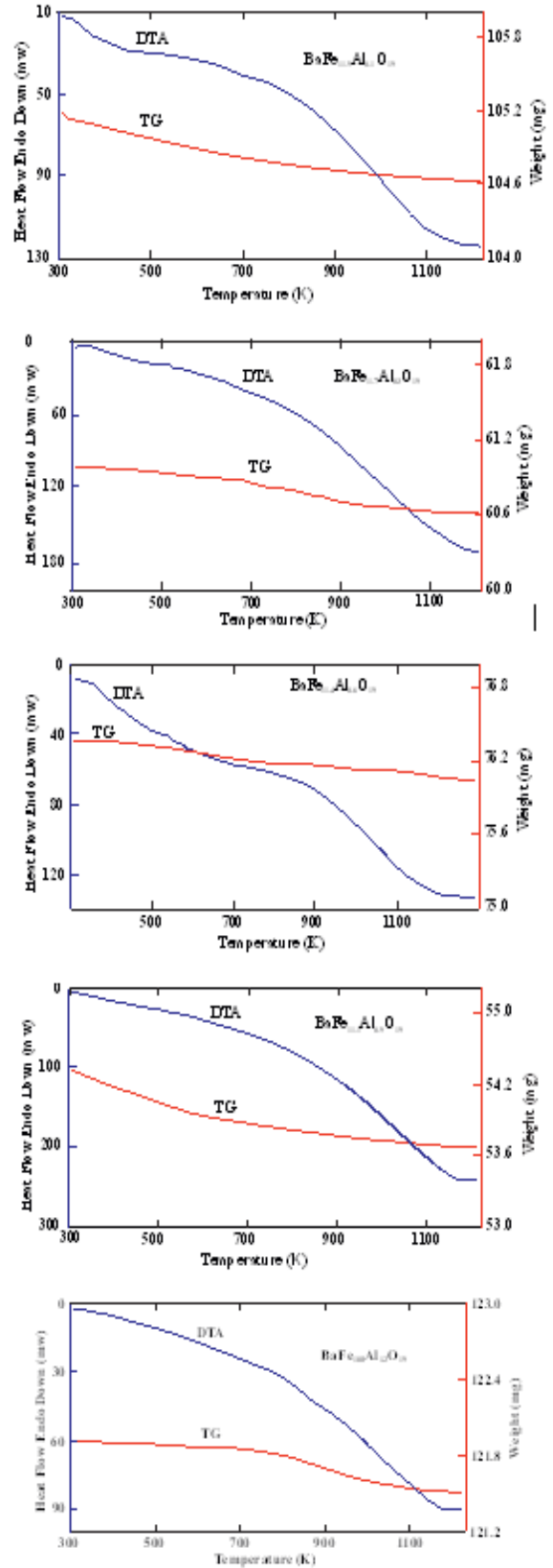
Konsentrasiya	Maqnit momenti, A·m <sup>2</sup> /kg
$x = 0.1$	49.6
$x = 0.3$	45.3
$x = 0.6$	39.5
$x = 0.9$	36.1
$x = 1.2$	32.0

Vibrasiyalı maqnitometriya üsulu ilə BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x=0.1-1.2$ ) birləşmələrinin maqnit xassələrinin tədqiqi nəticələri digər BaFe<sub>12-x</sub>Me<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x=0.1-1.2$ ) bərk məhlulları üçün aparılmış neytron difraksiyası tədqiqatları nəticələri ilə müqayisə etdikdə görünür ki, barium heksaferritin bərk məhlullarının demək olar ki, hamısı üçün maqnit xassələri və bu xassələrin dəyişmə mexanizmi eynidir. Fe atomlarını əvəz edən Me diamaqnit element atomlarının ion radiuslarından asılı olaraq, maqnit xassələrdə baş verən fərqləri müşahidə etmək mümkündür.

#### f) Termik analiz

Əvvəlki tədqiqatlar zamanı BaFe<sub>12-x</sub>Me<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x = 0.1-1.2$ ) bərk məhlullarının kristal quruluşları və müxtəlif fiziki xassələri geniş tədqiq edilməsinə baxmayaraq, bu materiallarda termik proseslər kifayət qədər öyrənilməmişdir. BaFe<sub>12-x</sub>Me<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x = 0.1-1.2$ ) sistemlərində termik hadisələri öyrənmək məqsədi ilə, Al atomlarının  $x = 0.1-1.2$  konsentrasiyası intervalında sintez edilmiş BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> bərk məhlullarının dife-

rensial termik (DTA) və termoqramimetrik analizləri (TGA) aparılmışdır (Şəkil 8).



Şəkil 8. BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x=0.1-1.2$ ) birləşmələrinin DTA və TG analizləri.

Şəkil 8-dən görünür ki, DTA əyrisində heç bir istilik effekti müşahidə olunmamışdır ki, bu da bilavasitə TGA əyrisində heç bir effektin (endo və ekzo) baş verməməsi ilə əlaqədardır. DTA əyrisində baş verən



endo və yaxud ekzo effektlər mütləq termoqravimetrik analiz əyrisində də müşahidə (təsdiq) olunmalıdır. Tədqiq edilən  $x=0.1$  konsentrasiyalı tədqiqat nümunəsində DTA əyrisində monoton olaraq azalma müşahidə edilmişdir ki, bu da, sistemə verilən istilik enerji selinin fiziki olaraq sistem tərəfindən tam udulması və istilik enerjisinin həmin sistemdə faza keçidi yarada biləcək səviyyəyə çatmaması ilə əlaqədardır. Sistemə verilən istilik enerjisi sistem tərəfindən tam udulmuşdur, TGA və DTA ayrılarda monoton azalma baş vermişdir, endo və ekzo effektlər müşahidə edilməmişdir. Bu verilənlər sintez edilmiş birləşmələrin geniş temperatur diapozonunda termik dayanıqlılığını və eyni quruluş fazanın mövcud olmasının göstəricisidir.

DTA ayrılardan görünür ki,  $t \sim 770$  K temperaturdan sonra dəyişmə baş verir. Maqnit xassələrinin tədqiqi istiqamətində aparılmış əvvəlki tədqiqatlardan məlumdur ki,  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Me}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) bərk məhlullarında və, o cümlədən də,  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) bərk məhlullarında  $t > 770$  K yüksək temperaturlarda ferrimaqnit fazadan paramaqnit fazaya keçid baş verir. Şəkil 8-də təsvir edilmiş diferensial termik analiz ayrılardan alınmış nəticələrdən görüldüyü kimi, bu birləşmələrdə ferrimaqnit fazaya nisbətən paramaqnit fazada istilik enerjisinin udulması daha böyük sürətlə baş verir. Ona görə də  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x=0.1-1.2$ ) sistemlərində ferrimaqnit fazaya nisbətən paramaqnit fazada atomların nizamlı düzülüşləri qismən pozulmuş

olur. Termodinamika və bərk cisimlər fizikası kusunadan məlumdur ki, nizamsız sistemlərdə enerjinin udulması nizamlı sistemlərdə enerji udulmasından daha çox olmalıdır (15).

#### 4. NƏTİCƏ

Toz halında olan  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x=0.1-1.2$ ) heksaferrit nümunələri rentgen difraksiyası metodu ilə tədqiq edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, normal şəraitdə,  $P6_3/mmc$  fəza qəfəsləli heksaqonal simmetriyaya malikdirlər və konsentrasiyanın  $x=0.1-1.2$  intervalında bu kristal quruluş saxlanılır. Mikroquruluşa uyğun olaraq, atom səviyyələrində olan ölçülərdə də  $x$  konsentrasiyasından asılı olaraq azalma baş verir. Birləşmələr neytron difraksiyası metodu ilə tədqiq edilmiş, müxtəlif kristalloqrafik mövqelərdə yerləşən  $\text{Fe}^{3+}$  ionlarının maqnit momentləri təyin edilmişdir. Raman və infraqırmızı spektroskopiyaya metodları ilə atom dinamikası tədqiqatları aparılmış, modaların dəyişmə dinamikasının mexanizmi izah edilmişdir. Vibrasiyalı maqnetometriya metodu ilə Xüsusi maqnit momenti təyin edilmiş və  $\sigma=49.6 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kq}$  ( $x=0.1$ ) qiymətindən  $\sigma=32 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kq}$  ( $x=1.2$ ) qiymətinə qədər azalması müəyyən edilmişdir. Termik analiz nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, sintez edilmiş birləşmələr geniş temperatur diapozonunda termik dayanıqlılığını və eyni quruluş fazasını saxlayır.

- [1] V.G. Kostishin, L.V.Panina, L.V.Kozhitov, A.V.Timofeev, A.K.Zyuzin, A.N.Kovalev. Technical Physics, 2015, v.60, p. 1189.
- [2] D.P.Kozlenko, N.T.Dang, S.H.Jabarov, A.A.Belik, S.E.Kichanov, E.V.Lukin, C.Lathe, L.S.Dubrovinsky, V.Yu.Kazimirov, M.B.Smirnov, B.N.Savenko, A.I.Mammadov, E.Takayama-Muromachi, L.H.Khiem. J. Alloy Compd., 2014, v.585, p.741.
- [3] D.P. Kozlenko, N.T.Dang, S.E.Kichanov, E.V.Lukin, A.M.Pashayev, A. I.Mammadov, S.H. Jabarov, L.S.Dubrovinsky, H.-P.Liermann, W.Morgenroth, R.Z.Mehdiyeva, V.G.Smotrakov, B.N.Savenko. Phys. Rev. B., 2015, v.92, p. 134409.
- [4] A.V.Trukhanov, N.T.Dang, S.V.Trukhanov, S.H.Jabarov, I.S.Kazakevich, A.I.Mammadov, R.Z.Mekhdiev, V.A.Turchenko, R.E.Huseynov. Physics of the Solid State, 2016, v.58, p.992
- [5] S.V.Trukhanov, A.V.Trukhanov, V.A.Turchenko, V.G.Kostishin, L.V.Panina, I.S.Kazakevich, A.M.Balagurov. J. Mag. Mag. Mat., 2016, v.417, p.130.
- [6] S.V.Trukhanov, A.V.Trukhanov, V.G.Kostishin, L.V.Panina, I.S.Kazakevich, V.A.Turchenko, V.V.Oleinik, E.S.Yakovenko, L.Yu.Matsui. J. Exp. Theor. Phys., 2016, v.123, p.461.
- [7] E.W. Gorter. IEEE Suppl. B., 1957, v.104 p.255.
- [8] A.B.Труханов, С.В.Труханов, В.Г.Костишин, Л.В.Панина, М.М.Салем, И.С.Казакевич, В.А.Турченко, В.В.Кочервинский, Д.А.Кривченя. ФТТ, 2017, v.59, p.721
- [9] G.Tan, X.Chen. J. Mag. Mag. Mat., 2013, v. 327, p.87.
- [10] В.Г.Костишин, Л.В.Панина, Л.В.Кожитов, А.В.Тимофеев, А.К.Зюзин, А.Н.Ковалев. ЖТФ, 2015, v.85, p.85.
- [11] С.В.Труханов, И.О.Троянчук, А.В.Труханов, И.А.Бобриков, В.Г.Симкин, А.М.Балагуров. Письма в ЖЭТФ, 2006, v.84, p.310.
- [12] J.Rodriguez-Carvajal. Physica B., 1993, v.192, p.55.
- [13] Л.Т.Бугаенко, С.М.Рябых, А.Л.Бугаенко. Вестн. Моск. Ун-та. Сер.2.,Химия., 2008, v.49, p.363.
- [14] S.Jabarov., A.Trukhanov, E.Kornieva. Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2014, v.8, No.6, p. 1198.
- [15] Л.Д. Ландау, Е.М.Лифшиц. Статистическая физика, М.: Наука, 1964, 568 с.

**A.I. Mammadov, R.Z. Mehdiyeva, S.H. Jabarov, R.E.Hüseynov, A.H. Asadov, H.A. Ahmadov**

**STUDY OF THE STRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES OF BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> SOLID SOLUTIONS**

The crystal structures of solid solutions of hexaferrites BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> ( $x = 0.1 - 1.2$ ) have been studied using X-ray diffraction. It has been found that, at normal conditions, the samples are characterized by space group  $P6_3/mmc$ . It has been noted that the diamagnetic substitution of Al<sup>3+</sup> ions for Fe<sup>3+</sup> leads to a decrease in the unit cell parameters due to the smaller aluminum ion radius. The field dependences of the specific magnetic moment have been studied in fields of  $\pm 2T$  at 5K and 300K using vibrating magnetometry. It has been found that the specific magnetic moment decreases from 49.6 A·m<sup>2</sup>/kg ( $x=0.1$ ) to 32 A·m<sup>2</sup>/kg ( $x = 1.2$ ) as the concentration of the diamagnetic ions increases. The microstructure has been studied using scanning electron microscopy. The Raman spectra have been measured in the range of 200 – 800 cm<sup>-1</sup>.

**А.И. Мамедов, Р.З. Мехтиева, С.Г. Джабаров, Р.Э. Гусейнов, А.Г. Асадов, Х.А. Ахмедов**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub>**

Исследована кристаллическая структура и магнитные свойства твердых растворов BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> в диапазоне концентраций атомов Al  $x = 0.1 - 1.2$  методами рентгеновской дифракции, нейтронографии, сканирующей электронной микроскопии, рамановской спектроскопии, инфракрасной спектроскопии и методом колебательной магнитометрии. Установлено, что кристаллические структуры твердых растворов BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> стабильны в диапазоне концентраций атомов Al от  $x=0.1$  до 1.2. Определен магнитный момент каждого атома Fe входящего в твердые растворы BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> и установлено уменьшение магнитных моментов ионов Fe<sup>3+</sup> с уменьшением концентрации диамагнитных ионов Al<sup>3+</sup>. Наблюдается уменьшение удельного магнитного момента от  $\sigma = 49.6$  А·м<sup>2</sup>/кг ( $x = 0.1$ ) до  $\sigma = 32$  А·м<sup>2</sup>/кг ( $x=1.2$ ). Методами рамановской и инфракрасной спектроскопии определен механизм изменения концентрационной зависимости тепловых колебаний в этих твердых растворах и проведено сравнение результатов полученных методом спектроскопии комбинационного рассеяния с результатами, полученными с помощью инфракрасной спектроскопии.