

# AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

*Əlyazması hüququnda*

## **BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> HEKSAQONAL FERRİTLƏRİNİN QURULUŞU VƏ MAQNİT XASSƏLƏRİ**

İxtisas: 2223.01 – Kristalloqrafiya, kristallar fizikası

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Ramiz Eldar oğlu Hüseynov**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi  
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

### **AVTOREFERATI**

**Bakı – 2021**

Dissertasiya işi Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası Fizika İnstitutu “Qeyri - standart nəzarət və diaqnostika” laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbər: Fizika elmləri doktoru, dosent  
**Rəfiqə Zabil qızı Mehdiyeva**

Rəsmi opponentlər: AMEA-nın həqiqi üzvü,  
fizika–riyaziyyat elmləri doktoru, professor  
**Çingiz Oveys oğlu Qacar**

AMEA-nın müxbir üzvü,  
Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor  
**Oqtay Kazım oğlu Qasımov**

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor  
**Tariyel Hübət oğlu İsmayılov**

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının AMEA Fizika İnstitutu nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.14 Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının sədri:

AMEA-nın həqiqi üzvü,  
fizika–riyaziyyat elmləri doktoru, professor  
\_\_\_\_\_ **Nazim Timur oğlu Məmmədov**

Dissertasiya şurasının elmi katibi:

Fizika elmləri doktoru, dosent  
\_\_\_\_\_ **Mahmud Həşim oğlu Kazımov**

Elmi seminarın sədri:

Fizika elmləri doktoru, professor  
\_\_\_\_\_ **İmaməddin Rəcəbəli oğlu Əmiraslanov**

## İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

**Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi.** Təqdim edilən dissertasiya işi, bir çox maraqlı fiziki hadisələrin müşahidə edildiyi M tip heksaqonal quruluşa malik olan ferrimaqnit materialların alınmasına, onların kristal quruluşlarının, mikroquruluşlarının, atom dinamikasının və maqnit xassələrinin tədqiqinə istiqamətləndirilmişdir. Bu fiziki xassələrin öyrənilməsi müasir kondensə olunmuş hal fizikasının əsas aktual məsələlərindən biridir. Bildiyimiz kimi, seqnetoelektriklik kristal quruluşa malik olan bəzi materiallarda atomların öz ideal mövqelərindən müəyyən qədər sürüşməsi nəticəsində və yaxud sistemlərin nizamlı-nizamsız quruluşa malik olması ilə spontan polyarlaşmanın yaranması nəticəsində meydana gələn fiziki xassədir. Digər tərəfdən məlumdur ki, uzaq maqnit nizamlılığının yaranması da atomların birləşmələrin daxilində müəyyən məsafələrdə yerləşmələrindən və atomların istilik rəqslərindən asılıdır. Materialların fiziki xassələri ilə quruluşları arasındakı qarşılıqlı əlaqənin təyin edilməsi, sənaye texnologiyasında işlənilməsi üçün fiziki hadisələrin mikroskopik mexanizmlərinin öyrənilməsi yalnız kondensə olunmuş hal fizikasının deyil, ümumilikdə materialşünaslığın əsas problemlərindən biridir.

Aşağı temperaturlarda və yüksək maqnit sahəsinin təsiri altında maqnit xassələrinin tədqiqi ferromaqnit xassələrə malik olan birləşmələrin maqnit xassələrini öyrənmək üçün çox vacib tədqiqatlar hesab olunur. Eyni zamanda temperaturun və xarici maqnit sahəsinin təsiri ilə aparılan təcrübələr, materialların maqnit xassələrinin öyrənilməsi üçün mühüm əhəmiyyətə malikdirlər. Bu xarici təsirlərlə birləşmələrin maqnit xassələrini öyrənmək üçün barium heksaferrit ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) və onun əsasında alınmış bərk məhlullar model sistemlər məqsədilə istifadə edilə bilər.

Heksaqonal kristal quruluşa malik olan barium heksaferrit birləşməsi son zamanlarda ən çox tədqiq edilən multiferroiklərdən biridir. Barium heksaferrit normal şəraitdə, otaq temperaturunda ferrimaqnit xassələrinə malik materialdır və yüksək temperaturlu ferrimaqnit-paramaqnit faza keçidinə malikdir ( $T_C \approx 750 \text{ K}$ ). Əvvəlki quruluş tədqiqatları zamanı müşahidə edilmişdir ki, barium

heksaferritin tərkibindəki  $\text{Fe}^{3+}$  maqnit ionlarının qismən ,  $\text{Ga}^{3+}$ ,  $\text{In}^{3+}$ ,  $\text{Sc}^{3+}$  və s. diamaqnit metal ionları ilə əvəz edilməsi zamanı birləşmələrin kristal quruluşlarında və atom dinamikalarında əsaslı dəyişikliklər müşahidə edilir. Diamaqnit ionların konsentrasiyasının artması nəticəsində uzaq maqnit nizamlılığının qismən pozulması yaranır və bununla da maqnit xassələrinin zəifləməsi baş verir.

Heksaferritlər və onlar əsasında alınmış kompozit materiallar elektromaqnit uducu materiallar kimi kosmik texnologiyalarda və aviasiya sənayesində geniş istifadə edilir. Ona görə də, maqnit xassələrinin saxlanması şərtləri daxilində, Fe atomlarının Al ilə əvəz edilməsi, bu materialları aviasiya üçün vacib materiallar sırasına daxil edir. Temperatur dəyişkənliyinin aviasiya sahəsi üçün xarakterik olmasına əsasən qeyd etmək lazımdır ki, geniş temperatur oblastında bu materiallar üzərində aparılan tədqiqat işləri xüsusi əhəmiyyət kəsb edir.

Dissertasiya işi, Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının akademik H.M. Abdullayev adına Fizika İnstitutunun elmi tədqiqat planına əsasən yerinə yetirilmişdir.

### **Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri:**

Dissertasiya işinin əsas məqsədi  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  heksaferritlərində  $\text{Fe}^{3+}$  maqnit ionlarının  $\text{Al}^{3+}$  diamaqnit ionları ilə əvəz edilməsinin bu bərk məhlulların morfolojiyasına, kristal quruluşuna və maqnit xassələrinə təsirini öyrənmək, bu əvəzetmə nəticəsində kristal quruluşunda və maqnit xassələrində baş verən dəyişikliklərin Al atomlarının konsentrasiyasından ( $x = 0.1 - 1.2$ ) asılılıq mexanizmini müəyyən etməkdir.

Qoyulan məqsədə çatmaq üçün aşağıdakı məsələlər həll edilmişdir:

- $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1, 0.3, 0.6, 0.9$  və  $1.2$ ) bərk məhlullarında atom səviyyələrinin, poliedr (oktaedr, bipiramida və tetraedr) sistemlərinin əmələ gəlmə mexanizminin quruluş aspektlərinin tədqiq edilməsi. Bu bərk məhlulların morfolojiyasının və atom dinamikasının Al atomlarının konsentrasiyasından asılılıqlarının öyrənilməsi.
- Yüksək temperatur ( $300 - 1200$  K) oblastında  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  birləşmələrinin termik xassələrinin və kütlə itkisinin öyrənilməsi.

Yüksək temperatur oblastında dəmir atomlarının alüminium atomları ilə qismən əvəz edilməsinin birləşmələrin termik xassələrinə və kütlə itkisinə təsirinin Al atomlarının  $x = 0.1-1.2$  konsentrasiya intervalında tədqiqi.

- Ferrimaqnit xassələrə malik olan barium heksaferrit birləşməsində  $\text{Fe}^{3+}$  maqnit ionlarının qismən  $\text{Al}^{3+}$  diamaqnit ionları ilə əvəz edilməsi zamanı  $x = 0.1-1.2$  konsentrasiya intervalında alınmış  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  bərk məhlullarında müxtəlif kristalloqrafik mövqelərdə yerləşən Fe atomlarının maqnit momentlərinin təyin edilməsi, aşağı temperatur oblastında (5 - 300 K) və xarici maqnit sahəsinin təsiri altında maqnit xassələrinin dəyişmə mexanizminin öyrənilməsi.

### **Tədqiqat metodları:**

Tədqiqat obyektləri M tip heksaqonal sinqoniyaya malik olan  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1, 0.3, 0.6, 0.9$  və  $1.2$ ) bərk məhlullarıdır. Bu birləşmələrin kristal quruluşlarının və maqnit xassələrinin tədqiqi zamanı rentgen difraksiyası, neytron difraksiyası, skanedici elektron mikroskopiyası, Raman spektroskopiyası, infraqırmızı spektroskopiya, differensial termik analiz, termoqravimetrik analiz və vibrasiyalı maqnitometriya metodlarından istifadə edilmişdir.

### **Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:**

1. Al atomlarının  $x = 0.1 - 1.2$  konsentrasiyası intervalında  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  bərk məhlullarının kristal quruluşlarının dayanıqlı olması.
2. Otaq temperaturunda  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1 - 1.2$ ) bərk məhlullarının kristal quruluşlarında müxtəlif mövqelərdə yerləşən Fe atomlarının maqnit momentlərinin təyin edilməsi.
3.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) birləşmələrinin polikristallarının xüsusi maqnit momentinin  $\sigma = 49.6 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$  ( $x = 0.1$ ) qiymətindən  $\sigma = 32 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$  ( $x = 1.2$ ) qiymətinə qədər azalması.
4. Aşağı temperatur oblastında xarici maqnit sahəsinin təsiri ilə  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  sistemində xüsusi maqnit momentinin güclənməsi.
5.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) bərk məhlullarında  $T = 300-1220 \text{ K}$  temperatur intervalında sistemə verilən istilik enerjisinin monoton udulması və kütlə dəyişməsinin  $\sim 0.5\%$  olması.

6.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) sistemlərinin istilik rəqslərinin konsentrasiyadan asılı olaraq dəyişmə mexanizmi və  $k_v = -(1/v_0)(dv/dx)_{T,P}$  dəyişmə əmsallarının müəyyən edilməsi.

### **Tədqiqatın elmi yeniliyi:**

1.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1, 0.3, 0.6, 0.9$  və  $1.2$ ) heksaferritlərinin kristal və maqnit quruluşları tədqiq edilmiş, müxtəlif kristalloqrafik mövqələrdə dayanan  $\text{Fe}^{3+}$  maqnit ionlarının maqnit momentləri təyin edilmişdir. Qəfəs parametrlərinin və həcmi Al atomlarının konsentrasiyasından asılı olaraq dəyişmə mexanizmi verilmişdir.
2. İlk dəfə  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) heksaferritlərinin atom dinamikaları öyrənilmiş, otaq temperaturunda müşahidə edilən rəqs modalalarının tezliklərinin,  $\text{Fe}(\text{Al})$  və  $\text{O}$  atomlarının əmələ gətirdikləri oktaedr, bipiramida və tetraedrlərinin istilik rəqslərinə uyğunluğu müəyyən edilmişdir. Rəqs modalalarının tezliklərinin Al atomlarının konsentrasiyasından asılılıqları alınmışdır.
3. İlk dəfə  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) bərk məhlullarının yüksək temperatur oblastında ( $300 - 1220 \text{ K}$ ) termik xassələri və kütlənin temperaturdan asılı olaraq dəyişməsi tədqiq edilmişdir. Geniş temperatur intervalında ( $T = 300 - 1220 \text{ K}$ ) sistemə verilən istilik enerjisinin və nümunələrin kütləsinin dəyişmə mexanizmi öyrənilmişdir.
4. Xarici maqnit sahəsinin təsiri altında, aşağı temperatur ( $5 - 300 \text{ K}$ ) oblastında  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1 - 1.2$ ) heksaferritlərinin maqnit xassələri tədqiq edilmişdir. Maqnit xassələrə malik dəmir ionlarının diamaqnit alüminium ionları ilə əvəz edilməsi zamanı xüsusi maqnit momentinin dəyişməsi müəyyənləşdirilmişdir.

### **Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti:**

Bərk cisimlərdə kristal və maqnit quruluşların tədqiq edilməsi, xarici təsirlər vasitəsilə onların dəyişmə mexanizminin öyrənilməsi, atomların əmələ gətirdikləri konfigurasiyaların müəyyən edilməsi və onların atom dinamikalarının öyrənilməsi kondensə olunmuş hal fizikasında, materialşünaslıqda mühüm əhəmiyyətə malikdir.

Heksaqonal ferritlərin bir çox istiqamətlərdə tətbiqləri vardır ki, onlardan aşağıdakıları vacib hesab etmək olar: kiçik həcmli,

aşağı tezlikli və böyük tutumlu kondensatorların hazırlanması, dielektrik gücləndiricilər üçün böyük qeyri-xətti polyarizasiyalı materialların istifadəsi, modulyatorlar və başqa idarəetmə mexanizmləri, hesablama texnikasında yaddaş elementi kimi maqnit elementlərin istifadəsi, informasiya daşıyıcılarının hazırlanması, lazer şüalanmasında çeviricilər və modulyasiya üçün seqnetoelektrik və ferromaqnit kristalların istifadəsi, elektromaqnit uducu materiallar kimi radardan qorunma sistemlərində çeviricilərin hazırlanması və s.

### **Aprabosiyası və tətbiqi:**

Dissertasiya işinin aparılması zamanı alınmış tədqiqat nəticələri, aşağıda göstərilən Respublika və Beynəlxalq səviyyəli tədbirlərdə məruzə edilmişdir:

- Gənc tədqiqatçılar üçün beynəlxalq elmi məktəb: “Müasir neytronoqrafiya”, 28 oktyabr-1 noyabr 2013-cü il, Dubna, Rusiya Federasiyası;
- “Ümummilli lideri Heydər Əliyevin anadan olmasının 92-ci ildönümünə həsr olunmuş Gənc Tədqiqatçıların III Beynəlxalq elmi Konfransı”, 17-18 aprel, 2015-ci il, Bakı, Azərbaycan;
- “Peterburq Nüvə Fizikası İnstitutunun Kondensə olunmuş mühitlər” üçün XLIX məktəbi, 16-21 mart 2015-ci il, Sankt-Peterburq, Rusiya Federasiyası;
- “Ümummilli lideri Heydər Əliyevin anadan olmasının 94-cü ildönümünə həsr olunmuş Gənc Tədqiqatçıların IV Beynəlxalq elmi Konfransı”, 29-30 aprel 2016-cı il, Bakı, Azərbaycan;
- “IBR2-də kondensə olunmuş mühitlərin tədqiqi” Beynəlxalq Konfransı, 9-12 oktyabr 2017-ci il, Dubna, Rusiya;
- “Azərbaycan xalqının Ümummilli lideri Heydər Əliyevin anadan olmasının 95-ci ildönümünə həsr olunmuş Gənc Tədqiqatçıların II Beynəlxalq elmi Konfransı”, 27-28 aprel 2018-ci il, Bakı, Azərbaycan;
- “Elektrik mühəndisliyinin texniki və fiziki problemləri” 14-cü beynəlxalq konfrans, 15-17 oktyabr, 2018-ci il, Naxçıvan Dövlət Universiteti, Naxçıvan, Azərbaycan.
- “Azərbaycan xalqının Ümummilli lideri Heydər Əliyevin anadan olmasının 96-cı ildönümünə həsr olunmuş Gənc Tədqiqatçıların

III Beynəlxalq elmi Konfransı”, 29-30 aprel 2019-cu il, Bakı, Azərbaycan

Dissertasiyanın əsas materialları 14 publikasiyada dərc edilmişdir ki, onlardan 6-ı məqalə (o cümlədən 3-ü impakt faktorlu xarici elmi jurnal) və 8-i konfrans tezisidir. Alınmış nəticələr Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının akademik H.M. Abdullayev adına Fizika İnstitutunun elmi-tədqiqatlarının 4 hesabatında dərc olunmuşdur.

### **Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı:**

Dissertasiya işi, Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının akademik H.M. Abdullayev adına Fizika İnstitutunun “Qeyri-standart nəzarət və diaqnostika sistemləri” laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir.

### **Dissertasiyanın həcmi, quruluşu və əsas məzmunu:**

Dissertasiya işi girişdən, 5 fəsildən, nəticələrdən və 132 adda istifadə olunmuş ədəbiyyat siyahısından ibarətdir. İşin həcmi 28 şəkil, 17 cədvəldən və ümumilikdə 234558 işarədən ibarətdir.

## **İŞİN MƏZMUNU**

**Girişdə** dissertasiya işinin mövzusunun aktuallığı, dissertasiya işinin əsas məqsədi, elmi yeniliklər, praktikadakı əhəmiyyəti, qarşıya qoyulmuş məqsəd və müdafiəyə çıxarılan müddəalar əsaslandırılmış, müəllifin iştirak dərəcəsi göstərilmişdir.

Dissertasiya işinin **I Fəsl**i, tədqiqat obyektləri olan barium heksaferritin bərk məhlullarında və onlara yaxın olan birləşmələrdə aparılmış geniş tədqiqatların ədəbiyyat icmalına həsr edilmişdir.

**II Fəsil**, dissertasiya işində istifadə edilmiş təcrübi metodlara, nəticələrin analiz edilməsi üçün istifadə edilən analiz metodlarına və tədqiqatın yerinə yetirildiyi cihazlara həsr edilmişdir.

Tədqiq edilən  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1, 0.3, 0.6, 0.9$  və  $1.2$ ) bərk məhlullarının ovuntu halında hazırlanmış keramika nümunələri yüksək temperatur sobalarında standart metodla “yüksək təmiz” markalı  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  və  $\text{BaCO}_3$  – dan sintez edilmişdir.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  heksaferritləri sintez edilmiş, ovuntu halında alınmış tədqiqat nümunələrinin kristal quruluşları otaq temperaturunda, normal



şəraitdə rentgen difraksiyası metodu ilə, 40 kV, 40 mA,  $\text{CuK}\alpha$  - şüalanma ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) parametrlərə malik olan D8 Advance (Bruker) – toz difraktometrində tədqiq edilmişdir. Alınmış rentgen difraksiyası spektrləri əvvəlcə çoxkanallı analizatorda saxlanılmış və sonradan FullProf və Origin proqram paketləri vasitəsilə Ritveld metodu ilə analiz edilmişdir.

**III Fəsil**də  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1, 0.3, 0.6, 0.9$  və  $1.2$ ) bərk məhlullarının ovuntu halında hazırlanmış nümunələrin kristal quruluşları, atom dinamikaları müasir tədqiqat metodları ilə kompleks şəkildə tədqiq edilmişdir. Otaq temperaturunda quruluş tədqiqatları rentgen difraksiyası, atom dinamikası tədqiqatları isə Raman spektroskopiyası və infraqırmızı spektroskopiya metodları ilə aparılmışdır.

$\text{BaFe}_{12-x}\text{Me}_x\text{O}_{19}$  heksaferritlərinin kristal quruluşlarına üçvalentli dəmir atomlarının diamaqnit metal atomları ilə əvəzləmələrinin təsirini öyrənmək məqsədi ilə,  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1, 0.3, 0.6, 0.9$  və  $1.2$ ) keramika nümunələrinin kristal quruluşları otaq temperaturunda və normal şəraitdə rentgen difraksiyası metodu ilə tədqiq edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, Fe atomları Al atomları ilə qismən əvəz edildikcə Al atomlarının  $0.1 \leq x \leq 1.2$  konsentrasiyası intervalında  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  birləşmələri otaq temperaturunda və normal şəraitdə  $\text{P6}_3\text{mmc}$  (№194) fəza qruplu heksaqonal simmetriyalı kristal quruluşa malik olurlar.  $x = 0.1$  konsentrasiyalı  $\text{BaFe}_{11.9}\text{Al}_{0.1}\text{O}_{19}$  birləşmələsinin qəfəs parametrləri:  $a = 5.889(2) \text{ \AA}$ ,  $c = 23.186(6) \text{ \AA}$  qiymətlərinə alırlar ki, bu da əvvəlki tədqiqat nəticələrinə uyğun gəlir.  $Z = 2$  olduğu üçün  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  birləşmələrinin elementar qəfəsinə 2 barium, 24 dəmir və ya alüminium, 38 oksigen atomu daxil olur. Müəyyən edilmişdir ki,  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  birləşmələrində Al atomlarının  $x$  konsentrasiyasının artması ilə kimyəvi təzyiq nəticəsində qəfəs parametrlərinin qiymətlərində azalma baş verir. Bu azalma,  $\text{Fe}^{3+}$  ionlarının ( $r_{\text{Fe}} = 0.645 \text{ \AA}$ )  $\text{Al}^{3+}$  ionlarına ( $r_{\text{Al}} = 0.535 \text{ \AA}$ ) nəzərən daha böyük ion radiuslarına malik olması ilə əlaqədar olur. Birləşmələrin uyğun qəfəs parametrləri cədvəl 1-də verilmişdir.

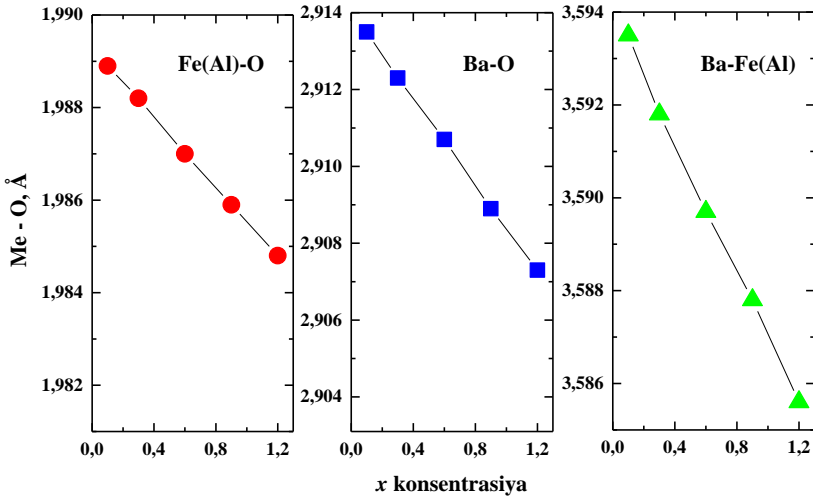
**Cədvəl 1. BaFe<sub>12-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>19</sub> (x = 0.1, 0.3, 0.6, 0.9 və 1.2) bərk məhlullarının otaq temperaturunda qəfəs parametrləri və həcmi.**

Birləşmə	a, Å	c, Å	V, Å <sup>3</sup>
BaFe <sub>11.9</sub> Al <sub>0.1</sub> O <sub>19</sub>	5.889(2)	23.186(7)	696.43295
BaFe <sub>11.7</sub> Al <sub>0.3</sub> O <sub>19</sub>	5.885(3)	23.163(8)	694.83184
BaFe <sub>11.4</sub> Al <sub>0.6</sub> O <sub>19</sub>	5.883(5)	23.160(8)	694.31598
BaFe <sub>11.1</sub> Al <sub>0.9</sub> O <sub>19</sub>	5.881(4)	23.146(2)	693.39213
BaFe <sub>10.8</sub> Al <sub>1.2</sub> O <sub>19</sub>	5.879(7)	23.117(7)	692.13241

Şəkil 1-də isə Fe(Al) və O atomları arasındakı məsafələrin x konsentrasiyadan asılılığı verilmişdir. Asılılıqlardan görünür ki, atomlararası məsafələr xətti olaraq azalır və azalma  $k_i = -(1/l_0)(dl/dx)_{T,P}$  qanunu üzrə baş verir. Ba, Fe və Al atomlarının arasındakı məsafələrə görə  $k_i$ -nin alınmış qiymətləri:  $k_{\text{Fe(Al)-O}}=0.00185(9)$ ,  $k_{\text{Ba-O}}=0.00192(1)$ ,  $k_{\text{Ba-Fe(Al)}}=0.00194(8)$  qiymətlərinə uyğundur. Şəkil 1 - də verilmiş asılılıqlardan görünür ki, Fe atomları Al atomları ilə qismən əvəz edildikcə, Fe(Al) və O atomlarının əmələ gətirdikləri oktaedrlər, bipyramidaları və tetraedrlər, Fe(Al) və Ba atomlarının arasındakı məsafələrə nisbətən daha dayanıqlı olurlar. Ba-O və Ba-Fe(Al) atomları arasındakı məsafələr demək olar ki, eyni mexanizmlə azaldıqları halda, Fe(Al)-O rabitələrinin uzunluqları daha kiçik sürətlə azalır. Buradan belə nəticəyə gəlmək mümkündür ki, oksigen atomları digər atomlara nəzərən daha dayanıqlı olurlar. Nəzərə alsaq ki, uzaq maqnit nizamlılığının əmələ gəlməsinin səbəbi Fe atomlarının c oxu boyunca nizamlı düzülüşüdür, bu zaman nəticəyə gəlmək mümkündür ki, Fe atomları Al atomlarıyla əvəz edildikcə atom düzülüşlərində nizamsızlıq meydana çıxır və uzaq maqnit nizamlılığı zəifləyir.

Raman spektroskopiyası tədqiqatları zamanı birləşmələrin atom dinamikası otaq temperaturunda və normal şəraitdə tədqiq edilmişdir. 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 (Şəkil 2). Bu tezlik intervalında müxtəlif rəqs modalarına uyğun gələn 8 maksimum müşahidə edilmişdir:  $\nu_1 = 289 \text{ sm}^{-1}$ ,  $\nu_2 = 337 \text{ sm}^{-1}$ ,  $\nu_3 = 413 \text{ sm}^{-1}$ ,  $\nu_4 = 469 \text{ sm}^{-1}$ ,  $\nu_5 = 525 \text{ sm}^{-1}$ ,  $\nu_6 =$

$617 \text{ sm}^{-1}$ ,  $\nu_7 = 684 \text{ sm}^{-1}$  və  $\nu_8 = 717 \text{ sm}^{-1}$ . Bu rəqs modaları barium heksaferritin və onun digər bərk məhlullarının rəqs modalarına uyğun olaraq aşağıdakı şəkildə interpretasiya edilmişdir:



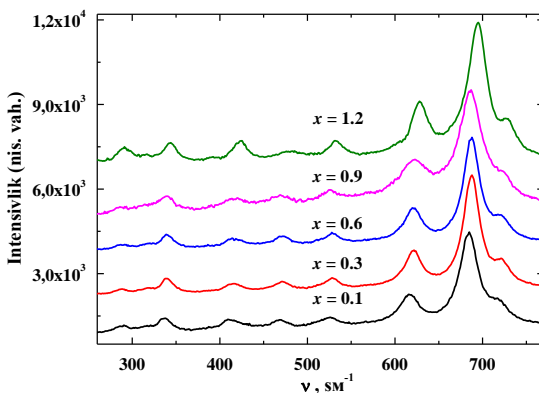
**Şəkil 1.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1, 0.3, 0.6, 0.9$  və  $1.2$ ) nümunələrində Fe(Al), Ba və O atomlarının arasındakı məsafələrin  $x$  konsentrasiyasından asılılığı**

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

- $\nu_7 = 684.24 \text{ sm}^{-1}$  modası:  $\text{Fe}(2b)/\text{Al}(2b)\text{O}_5$  bipiramidasının rəqslərinə uyğundur;
- $\nu_8 = 717.54 \text{ sm}^{-1}$  modası:  $\text{Fe}(4f_1)/\text{Al}(4f_1)\text{O}_4$  tetraedrinin rəqslərinin tezliklərinə uyğun gəlir.

Al atomlarının  $0.3 \leq x \leq 1.2$  konsentrasiyası intervalında  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  bərk məhlullarının alınmış Raman spektrlərinə baxsaq görərik ki, konsentrasiyanın qiyməti artdıqca rəqs modalalarının qiymətlərində yüksək tezliklər oblastına doğru sürüşmə baş vermişdir. Bu hadisə, Al atomlarının Fe atomlarına nəzərən daha kiçik ion radiusunun olması hesabına atomlar arasında əmələ gələn kovalent rabitələrin uzunluqlarının kiçilməsi ilə izah edilir. artma müşahidə edilir.

Otaq temperaturunda və normal şəraitdə Raman modalalarının tezliklərinin Al atomlarının  $x$  konsentrasiyasından asılı olaraq dəyişmə mexanizmi  $k_\nu = -(1/\nu_0)(d\nu/dx)_{T,P}$  münasibəti ilə öyrənilmişdir.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  bərk məhlullarının rəqs modaları və rəqs modalalarının konsentrasiyadan asılı olaraq dəyişmə mexanizmləri cədvəl 2 - də verilmişdir.



**Şəkil 2.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  nümunələrinin otaq temperaturunda alınmış Raman spektrləri**

Cədvəl 2-də təqdim edilən qiymətlərdən görüldüyü kimi, müşahidə edilən Raman modalalarının arasında ən böyük  $k_\nu$  dəyişmə

əmsalı  $\nu_4 = 469.42 \text{ sm}^{-1}$  modasında müşahidə edilmişdir. Bu rəqs modası müxtəlif kristalloqrafik mövqələrdə 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  $k_\nu$  əmsalı isə  $\nu_1 = 289.11 \text{ sm}^{-1}$  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.

**Cədvəl 2.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) bərk məhlullarının Raman spektroskopiyası ilə alınmış rəqs modaları və rəqs modalarının konsentrasiyadan asılı olaraq dəyişmə əmsalları.**

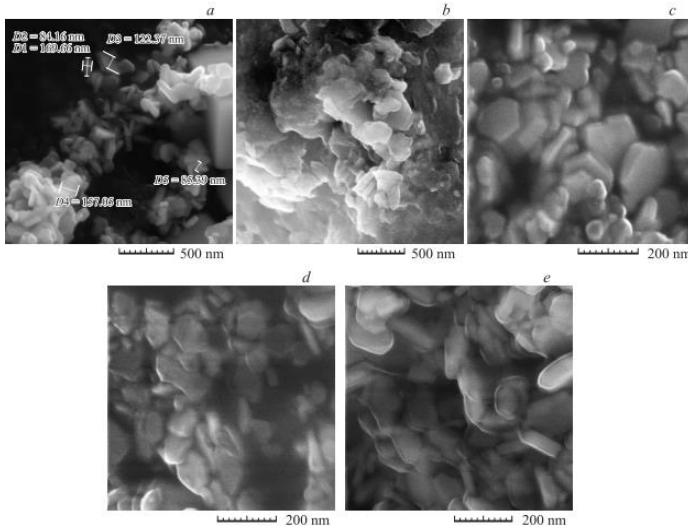
$X$	0.1	0.3	0.6	0.9	1.2	$k_\nu$
$\nu_1 (\text{sm}^{-1})$	289.11	288.77	289.27	289.61	292.32	0.00908
$\nu_2 (\text{sm}^{-1})$	337.19	339.23	340.11	340.88	343.26	0.01363
$\nu_3 (\text{sm}^{-1})$	413.56	416.41	416.98	417.29	423.06	0.01816
$\nu_4 (\text{sm}^{-1})$	469.42	471.85	472.44	472.44	482.19	0.02086
$\nu_5 (\text{sm}^{-1})$	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

Multiferroik xassələrə malik olan  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1 - 1.2$ ) birləşmələrinin atom dinamikasının digər tədqiqat metodları ilə də müqayisəli şəkildə öyrənmək məqsədi ilə infraqırmızı spektroskopiyaya metodu ilə atom dinamikası tədqiqatları aparılmışdır.

**IV - fəsil**də  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x=0,1 - 1,2$ ) heksaferritlərinin səth morfologiyası (ölçü effektləri) və termik xüsusiyyətləri (Diferensial termik analizləri və termoqramimetrik analizləri) müasir

tədqiqat metodları ilə tədqiq edilmişdir. Otaq temperaturunda səth morfoloqiyası tədqiqatları skanedici elektron mikroskopu,  $T = 300 - 1220$  K temperatur intervalında termik xassələrin tədqiqi diferensial termik və termoqravimetrik analiz metodları ilə aparılmışdır.

$\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1, 0.3, 0.6, 0.9$  və  $1.2$ ) bərk məhlullarının ovuntu halında alınmış nümunələrinin səth quruluşları və ölçü effektləri bərk cisimlərin morfoloqiyasını tədqiq etmək üçün istifadə edilən müasir skanedici elektron mikroskopunda tədqiq edilmişdir. SEM (Scanning Electron Microscope, ZEISS, SIGMA VP) cihazında alınmış səth morfoloqiyası şəkil 3 - də verilmişdir.



**Şəkil 3.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  bərk məhlullarının  $x = 0.1$  (a),  $0.3$  (b),  $0.6$  (c),  $0.9$  (d) və  $1.2$  (e) konsentrasiyalarda skanedici elektron mikroskopunda alınmış morfoloqiyası**

Göründüyü kimi,  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) bərk məhlullarında maqnit xassələri özündə daşıyan dəmir atomlarının qismən diamagnet Al atomları ilə əvəz edildiyi zaman, atomların ion radiuslarındakı fərqlərin hesabına birləşmələrin yalnız kristal quruluşlarında deyil həm də səth quruluşlarında (morfoloqiyasında)

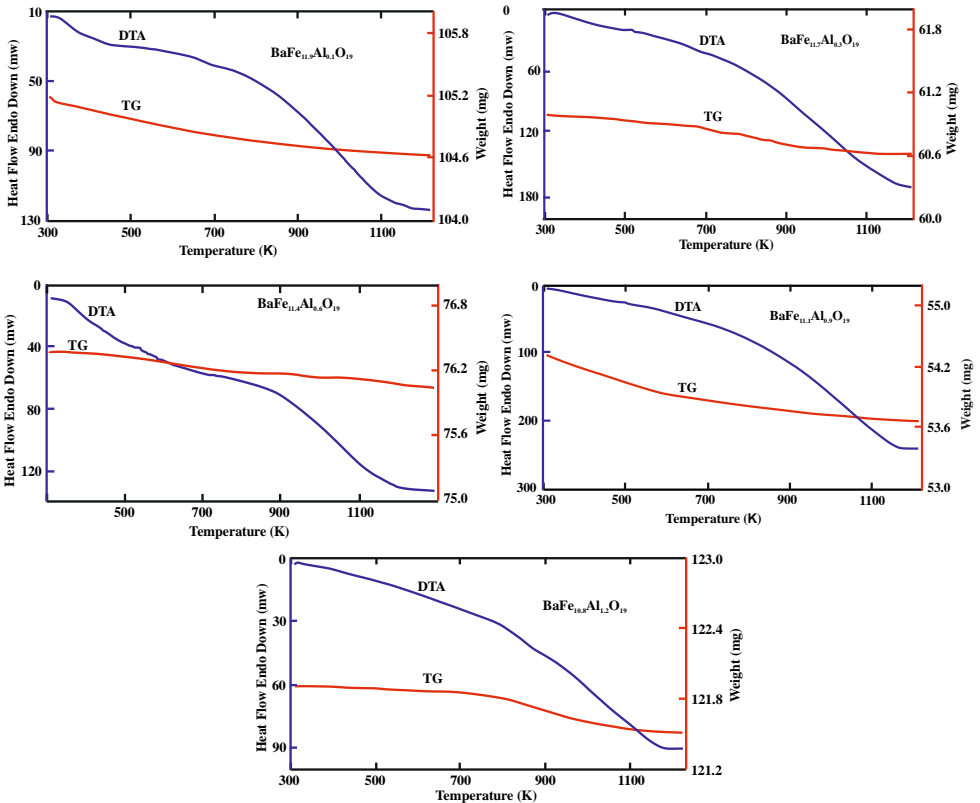
və ölçü effektlərində də kifayət qədər fərqlər müşahidə edilir. İon radiusunun qiyməti Fe atomlarının ion radiuslarının qiymətlərindən kiçik olan element atomları ilə əvəzləmələr aparıldıqca kristallitlərin ölçüləri daha kiçik oblastlara doğru sürüşür.

Əvvəlki tədqiqatlar zamanı  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Me}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) bərk məhlullarının kristal quruluşları və müxtəlif fiziki xassələri geniş tədqiq edilməsinə baxmayaraq, bu materiallarda termik proseslər kifayət qədər öyrənilməmişdir.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Me}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) sistemlərində termik prosesləri öyrənmək məqsədi ilə, Al atomlarının  $x = 0.1-1.2$  konsentrasiyası intervalında sintez edilmiş  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  bərk məhlullarının diferensial termik və termoqravimetrik analizləri aparılmışdır (Şəkil 4).

Şəkil 4 - dən görünür ki, diferensial termik analiz əyrisində heç bir istilik effekti müşahidə olunmamışdır ki, bu da bilavasitə termoqravimetrik analiz əyrisində heç bir effektin (endo və ekzo) baş verməməsi ilə əlaqədardır. Diferensial termik analiz əyrisində baş verən endo və yaxud ekzo effektlər mütləq termoqravimetrik analiz əyrisində də müşahidə (təsdiq) olunmalıdır. Tədqiq edilən  $x = 0.1$  konsentrasiyalı tədqiqat nümunəsində diferensial termik analiz 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, termoqravimetrik analiz və diferensial termik analiz əyrilərində 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.

Diferensial termik analiz əyrilərindən 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 temperaturalarda ferrimaqnit fazadan paramaqnit fazaya keçid baş verir. Şəkil 4 – də təsvir edilmiş diferensial termik analiz əyrilərindən

alınmış nəticələrdən görüldüyü kimi, bu birləşmələrdə ferrimaqnit fazaya nisbətən paramaqnit fazada istilik enerjisinin udulması daha böyük sürətlə baş verir.



**Şəkil 4.  $BaFe_{12-x}Al_xO_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) birləşmələrinin DTA və TG analizləri.**

Ona görə də  $BaFe_{12-x}Al_xO_{19}$  ( $x = 0.1 - 1.2$ ) sistemlərində ferrimaqnit fazaya nisbətən paramaqnit fazada atomların nizamlı düzülüşləri qismən pozulmuş olur. Termodinamika və bərk cisimlər fizikası kursundan məlumdur ki, nizamsız sistemlərdə enerjinin udulması nizamlı sistemlərdə enerji udulmasından daha çox olmalıdır.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Статистическая физика / – М.: Наука, 1964. - 568 с.

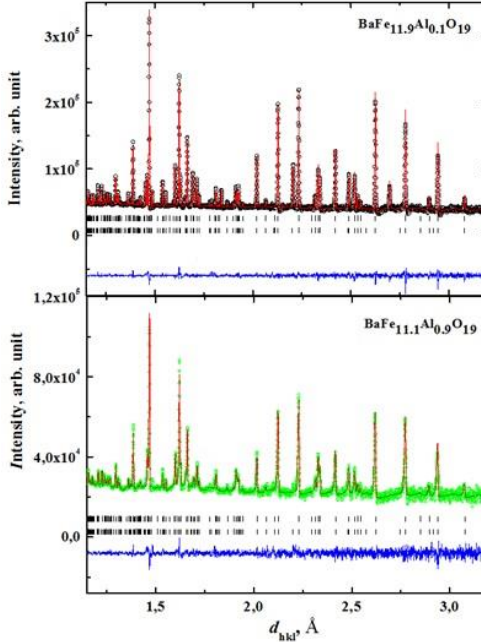


**V – fəsil**də  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) bərk məhlullarının maqnit xassələri tədqiq edilmişdir. Neytron difraksiyası metodu ilə müxtəlif kristalloqrafik mövqələrdə yerləşən Fe atomlarının maqnit momentləri və elementar qəfəs üçün yekun maqnit momentinin qiyməti təyin edilmişdir. Fe atomları qismən Al atomları ilə əvəz edildikcə, maqnit momentlərinin qiymətinin azalma mexanizmi müəyyən edilmişdir. Otaq temperaturundan  $T = 5 \text{ K}$  - ə qədər aşağı temperaturlar oblastında vibrasiyalı maqnitometriya metodu ilə  $\pm 2 \text{ Tl}$  xarici maqnit sahəsinin təsiri altında tədqiqat nümunələrinin maqnit xassələrinin dəyişmə mexanizmi müəyyən edilmişdir.

Neytron difraksiyası spektrləri  $2\theta = \pm 152^\circ$  bucaq altında yerləşən detektorlar vasitəsilə  $d_{hkl} = 0.6-3.6 \text{ \AA}$  müstəvilər arası məsafələr intervalında qeyd edilmişdir. Alınmış difraksiya spektrləri Ritveld metodu ilə VMRIA və FullProf proqram paketləri vasitəsilə yüksək dəqiqliklə analiz edilmişdir.  $\text{BaFe}_{11.9}\text{Al}_{0.1}\text{O}_{19}$  və  $\text{BaFe}_{11.1}\text{Al}_{0.9}\text{O}_{19}$  birləşmələrinin nümunələri üçün otaq temperaturunda və normal şəraitdə alınmış neytron difraksiyası spektrləri şəkil 5 - də göstərilmişdir. Fullprof proqramında işlənmiş formada təcrübi nöqtələr, hesablanmış profil və bunlar arasındakı fərq verilmişdir. Şaquli xətlərlə maqnit və kristal quruluşun difraksiya maksimumları göstərilmişdir.

Neytron difraksiya metodu ilə alınmış nəticələr rentgen difraksiyası metodu ilə alınmış nəticələrə tam uyğun gəlir. Atom dinamikası tədqiqatları zamanı Raman spektroskopiyası və infraqırmızı spektroskopiya metodları ilə alınmış nəticələr də, birləşmələrin tərkibində Al atomlarının konsentrasiyası artdıqca atomlararası rabitələrin uzunluqlarının azalmasını göstərdiyinə görə, demək olar ki, quruluş tədqiqatları zamanı istifadə edilmiş bütün təcrübi metodların nəticələri eyni olmuşdur.

Cədvəl 4-də Al atomlarının  $x$  konsentrasiyasının müxtəlif qiymətlərində  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) bərk məhlullarında müxtəlif kristalloqrafik mövqələrdə ( $2a$ ,  $2b$ ,  $4f\text{IV}$ ,  $4f\text{VI}$  və  $12k$ ) yerləşən dəmir maqnit ionlarının maqnit momentlərinin qiymətləri verilmişdir.



**Şəkil 5.  $\text{BaFe}_{11,9}\text{Al}_{0,1}\text{O}_{19}$  və  $\text{BaFe}_{11,1}\text{Al}_{0,9}\text{O}_{19}$  nümunələrinin otaq temperaturunda ölçülmüş və Ritveld metodu ilə analiz edilmiş neytron difrasiyası spektrləri**

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.

$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  heksaferritlərinin elementar kristal qəfəsinin T temperaturunda ümumi maqnit momentini hesablamaq üçün aşağıdakı sadə cəm düsturundan istifadə etməliyik:<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> J.Smit, H.P.J. Wijn, Ferrites / Philips Technical Library, Eindhoven, - 1960. - 387 p.

burada  $T$  – maqnit momentlərinin hesablandığı temperaturdur,  $\mu_i$  – hər bir  $\text{Fe}^{3+}$  ionunun maqnit momentidir.

**Cədvəl 4.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) birləşmələrinin müxtəlif kristalloqrafik mövqələrdə yerləşən Fe atomlarının FullProf programı ilə təyin edilmiş maqnit momentləri.**

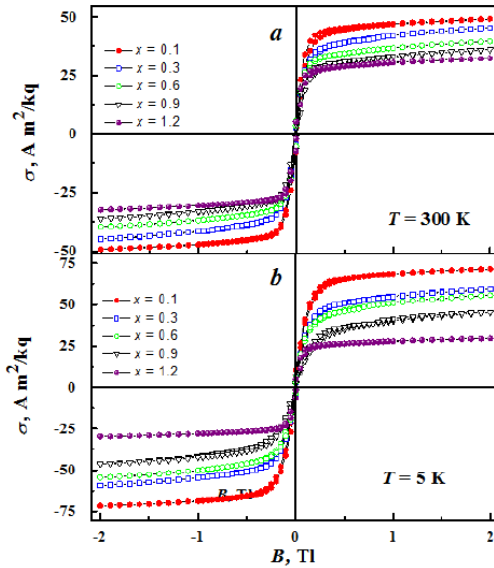
<b>Konsentrasiya</b>					
<b>X</b>	<b>0.1</b>	<b>0.3</b>	<b>0.6</b>	<b>0.9</b>	<b>1.2</b>
<b>Dəmir atomlarının maqnit momentləri (<math>\mu_B</math>)</b>					
<b>Fe1 (2a)</b>	3.82	3.77	3.25	3.36	2.16
<b>Fe2 (2b)</b>	4.08	4.11	3.09	3.74	2.18
<b>Fe3 (4f<sub>IV</sub>)</b>	3.65	3.68	3.25	3.60	1.47
<b>Fe4(4f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

Otaq temperaturunda  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  bərk məhlulları üçün ümumiləşmiş maqnit momentini hesablasaq görərik ki,  $\text{BaFe}_{11.9}\text{Al}_{0.1}\text{O}_{19}$  birləşməsi üçün  $\mu_{\text{cəm}} = 13.96 \mu_B$ ,  $\text{BaFe}_{10.8}\text{Al}_{1.2}\text{O}_{19}$  birləşməsi üçün  $\mu_{\text{cəm}} = 11.32 \mu_B$  qiymətinə malik olur. Al atomlarının  $0.1 \leq x \leq 1.2$  konsentrasiyası intervalında ümumiləşmiş maqnit momentlərinin qiymətləri cədvəl 5 - də verilmişdir. Cədvəldən görünür ki, birləşmələrin kristal qəfəslərində diamaqnit  $\text{Al}^{3+}$  ionlarının sayı çoxaldıqca, maqnit momentlərinin qiymətlərində azalma müşahidə edilir ki, bu da uzaq maqnit nizamlılığının zəifləməsinə səbəb olur.

**Cədvəl 5.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $0.1 \leq x \leq 1.2$ ) bərk məhlulları üçün ümumiləşmiş maqnit momentləri.**

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

Ferromaqnit, antiferromaqnit və ferrimaqnit xassələrə malik olan materialların maqnit xassələrinin dəyişmə mexanizminin öyrənilməsi üçün tətbiq edilən və ən geniş yayılmış metodlardan biri də vibrasiyalı maqnitometriya metodudur. Bu metod bizə imkan verir ki, temperatur və xarici sahənin təsiri altında maqnit materiallarının xüsusi maqnit momentlərini təyin edək. Tədqiqat obyektləri olan  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) bərk məhlullarının maqnit xassələrinin kompleks şəkildə öyrənilməsi və neytron difraksiyası metodu ilə alınmış nəticələrin bir daha təsdiq edilməsi məqsədi ilə vibrasiyalı maqnitometriya metodu ilə tədqiqatlar aparılmışdır (Şəkil 6).



**Şəkil 6. Otaq temperaturunda (a) və  $T = 5 \text{ K}$  temperaturda (b)  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1, 0.3, 0.6, 0.9$  və  $1.2$ ) bərk məhlullarının xüsusi maqnit momentlərinin xarici maqnit sahəsindən asılılıqları.**

Məlumdur ki, aşağı temperaturlar oblastında maqnit xassələrə malik olan materialların kristal quruluşlarında atomların istilik rəqslərinin amplitudunun və fluktuasiyaların azalması hesabına uzaq

maqnit nizamlılığının güclənməsi baş verir. Xarici maqnit sahəsinin təsiri ilə aşağı temperaturlar oblastında alınmış histerezis əyriləri, materialların maqnit xassələri haqqında geniş məlumatlar əldə etməyə imkan verir. Ona görə də,  $B = \pm 2$  Tl xarici maqnit sahəsinin təsiri altında vibrasiyalı maqnitometriya metodu ilə otaq temperaturundan  $T = 5$  K - ə qədər aşağı temperaturlar oblastında  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1 - 1.2$ ) heksaferritlərinin nümunələrinin maqnit xassələri tədqiq edilmişdir. Birləşmələrin tərkibində  $\text{Fe}^{3+}$  maqnit ionlarının  $\text{Al}^{3+}$  diamaqnit ionları ilə qismən əvəz edilməsi zamanı maqnit xassələrinin dəyişməsi müəyyənləşdirilmişdir. Otaq temperaturunda və  $T = 5$  K temperaturda (helium temperaturunda) Al atomlarının  $0.1 \leq x \leq 1.2$  konsentrasiyası intervalında  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  bərk məhlullarının təyin edilmiş xüsusi maqnit momentlərinin xarici maqnit sahəsindən asılılıqları (histerezis əyriləri) şəkil 6-da verilmişdir.

Otaq temperaturunda ( $T = 300$  K)  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  birləşmələrinin tədqiqat nümunələrinin tərkiblərində Al atomlarının konsentrasiyası artdıqca,  $B = \pm 2$  Tl xarici maqnit sahəsinin təsiri ilə xüsusi maqnit momentinin qiymətində  $\sigma = 49.6 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kq}$  ( $x = 0.1$ ) qiymətindən  $\sigma = 32 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kq}$  ( $x = 1.2$ ) qiymətinə qədər azalması baş vermişdir ki, bu da  $\text{Al}^{3+}$  diamaqnit ionlarının təsiri ilə uzaq maqnit nizamlılığının pozulmasının nəticəsidir.  $\Delta\sigma = 17.6 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kq}$  etmişdir. Aluminium atomlarının müxtəlif konsentrasiyalarında  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  bərk məhlullarında xüsusi maqnit momentinin qiymətləri cədvəl 6 verilmişdir.

**Cədvəl 6. Müxtəlif konsentrasiyalarda  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  bərk məhlullarında xüsusi maqnit momentinin qiymətləri.**

<b>Konsentrasiya</b>	<b>Maqnit momenti, <math>\text{A} \cdot \text{m}^2/\text{kq}</math></b>
$x = 0.1$	49.6
$x = 0.3$	45.3
$x = 0.6$	39.5
$x = 0.9$	36.1
$x = 1.2$	32.0

## NƏTİCƏ

1.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1- 1.2$ ) heksaferritlərinin kristal quruluşları tədqiq edilmiş, bərk məhlullarda atom koordinatları təyin edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, kristalda Al atomlarının konsentrasiyası artdıqca əsasən  $\vec{c}$  oxu istiqamətində sıxılma baş verir. Qəfəsin  $a$  parametri 0.16% ( $\Delta a = 0.0095 \text{ \AA}$ ),  $c$  parametri isə 0.29% ( $\Delta c = 0.0685 \text{ \AA}$ ) azalmışdır. Bu dəmir atomlarına nisbətən alüminium atomlarının ion radiuslarının kiçik olması ilə izah edilir.

2. İlk dəfə olaraq  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) bərk məhlullarının otaq temperaturunda müşahidə edilən rəqs modalarının kristal quruluşu əmələ gətirən poliedrlərin rəqslərinə uyğunluğu müəyyən edilmişdir. Rəqs modalarının tezliklərinin Al atomlarının konsentrasiyasından asılı olaraq  $k_v$  dəyişmə əmsalları təyin edilmiş və ən çox dəyişmə  $\text{Fe}(\text{Al})\text{O}_6$  oktaedrlərinin rəqslərinə uyğun  $\nu_4 = 469.42 \text{ sm}^{-1}$  modasında, ən az dəyişmə isə O-Fe-O rabitələrinin rəqslərinə uyğun  $\nu_4 = 289.11 \text{ sm}^{-1}$  modasında müşahidə edilmişdir. Rəqs modalarının orta dəyişmə sürəti  $k_{v \text{ otar.}} = 0.014$  təyin edilmişdir.

3. Al atomlarının  $x = 0.1, 0.3, 0.6, 0.9$  və  $1.2$  konsentrasiyası ilə ovuntu halında alınmış  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  heksaferritlərinin səth morfolojiyası tədqiq edilmiş, bu bərk məhlullar üçün ölçü effektləri müəyyən edilmişdir. Aşkar edilmişdir ki, konsentrasiyasının ən kiçik qiymətində ( $x = 0.1$ ) ovuntu dənələrinin ölçülərinin orta qiyməti  $D_{\text{or.}} \approx 120 \text{ nm}$  olduğu halda, konsentrasiyasının ən büyük qiymətində ( $x = 1.2$ ) ovuntu dənələrinin ölçülərinin orta qiyməti  $D_{\text{or.}} \approx 70 \text{ nm}$  olur, bu da dəmir atomlarına nisbətən alüminium atomlarının ion radiuslarının kiçik olması ilə izah edilir.

4. İlk dəfə olaraq  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) bərk məhlullarının yüksək temperatur oblastında termik xassələri öyrənilmiş və geniş temperatur intervalında ( $300 - 1220 \text{ K}$ ) sistemə verilən istilik enerjisinin və nümunələrin kütləsinin dəyişməsi müəyyən edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, bu birləşmələrdə ferrimaqnit fazaya nisbətən paramaqnit fazada istilik enerjisinin udulması daha büyük sürətlə baş verir ki, bu da kristal quruluşlarda ferrimaqnit fazanın paramaqnit fazaya nisbətən daha nizamlı olması

ilə əlaqədardır. Təyin edilmişdir ki, 300 - 1220 K temperatur intervalında bu birləşmələrdə 0.5% kütlə itkisi baş verir.

5.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) bərk məhlullarının Fe atomlarının maqnit momentləri təyin edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, birləşmələrdə diamaqnit Al atomlarının konsentrasiyası artdıqca müxtəlif kristalloqrafik mövqələrdə dayanan Fe atomlarının maqnit momentlərində  $\mu \approx 4.15 \mu_B$  - dən  $\mu \approx 1.25 \mu_B$  - ə qədər, elementar qəfəsin ümumiləşmiş maqnit momentində  $\mu_{\text{cəm}} \approx 13.96 \mu_B$  - dən  $\mu_{\text{cəm}} \approx 11.32 \mu_B$  - ə qədər azalma baş verir.

6. Xarici maqnit sahəsində, aşağı temperaturlar oblastında (5-300 K)  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 0.1-1.2$ ) heksaferritlərinin maqnit xassələri tədqiq edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki,  $\pm 2$  Tl xarici maqnit sahəsində  $\text{Fe}^{3+}$  maqnit ionlarının  $\text{Al}^{3+}$  diamaqnit ionları ilə əvəz edilməsi zamanı xüsusi maqnit momentinin qiyməti  $\sigma = 49.6 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kq}$  ( $x = 0.1$ ) qiymətindən  $\sigma = 32 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kq}$  ( $x = 1.2$ ) qiymətinə qədər azalır.

### Dissertasiya mövzusu üzrə çap olunmuş elmi işlər

1. Р.Э.Гусейнов, А.И.Маммадов, А.В.Труханов, Р.З.Мехтиева, С.Г.Джабаров. Влияние  $\text{Al}^{3+}$  ионов на кристаллическую структуру  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  / Международная молодежная научная школа “Современная нейтронография”, г. Дубна, Россия, 2013, с. 9
2. S.H.Jabarov, A.V.Trukhanov, S.V.Trukhanov, A.I.Mammadov, V.A.Turchenko, R.Z.Mehdiyeva, R.E.Hüseynov. XRD, DTA and TGA investigations of the  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  ( $x=0.3, 0.9$  and  $1.2$ ) solid solutions // Optoelectronics and Advanced materials – rapid communications, 2015, v. 9, No. 3-4, p. 468 – 470
3. R.E.Hüseynov, Ə.İ.Məmmədov, R.Z.Mehdiyeva, S.H.Cabarov.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  bərk məhlullarının raman spektrlərinin tədqiqi / Azərbaycan xalqının Ümummilli lideri Heydər Əliyevin anadan olmasının 92-ci ildönümünə həsr olunmuş Gənc Tədqiqatçıların III Beynəlxalq elmi Konfransının materialları, Qafqaz Universiteti, 17-18 Aprel 2015-ci il, Bakı, Azərbaycan, s. 95 - 96

4. Р.Э.Гусейнов, А.И.Мамедов, Р.З.Мехдиева, А.В.Труханов, С.Г.Джабаров, Н.Т.Данг. Особенности рамановского рассеяния света в кристаллах  $BaFe_{12-x}Al_xO_{19}$  / XLIX Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния, 2015, Санкт-Петербург, с. 76
5. A.V.Trukhanov, N.T.Dang, S.V.Trukhanov, S.H.Jabarov, I.S.Kazakevich, A.I.Mammadov, R.Z.Mekhdiyeva, V.A.Turchenko, R.E.Huseynov. Crystal structure, magnetic properties, and raman spectra of solid solutions  $BaFe_{12-x}Al_xO_{19}$  // Physics of the Solid State, 2016, v. 58, No. 5, p. 992 – 996
6. Р.Э.Гусейнов, А.В.Труханов, С.Г.Джабаров, С.В.Труханов, Р.З.Мехдиева, А.И.Маммадов. Магнитные свойства твердых растворах  $BaFe_{12-x}Al_xO_{19}$  / Azərbaycan xalqının Ümummilli lideri Heydər Əliyevin anadan olmasının 94-cü ildönümünə həsr olunmuş Gənc Tədqiqatçıların IV Beynəlxalq elmi Konfransının materialları, 29-30 Aprel 2016-ci il, Bakı, Azərbaycan, s. 19-21
7. R.E.Hüseynov, Ə.İ.Məmmədov, R.Z.Mehdiyeva, S.H.Cabarov.  $BaFe_{12-x}Al_xO_{19}$  bərk məhlullarının rentgen quruluş analizi // AJP Fizika, v. XXIII, № 1, sec. Az, 2017, s.16 – 19
8. R.E.Huseynov, A.I.Mammadov, R.Z.Mehdiyeva, A.V.Trukhanov, S.H.Jabarov. DTA and TGA study of the  $BaFe_{12-x}Al_xO_{19}$  solid solutions / International Conference Condensed Matter Research at the IBR-2, Dubna, Russia, 9 - 12 October, 2017, p. 113.
9. R.E.Hüseynov, Ə.İ.Məmmədov, V.A.Turçenko, A.V.Truxanov.  $BaFe_{12-x}Al_xO_{19}$  bərk məhlullarının maqnit quruluşu / Ümummilli lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 95-ci ildönümünə həsr olunmuş Gənc Tədqiqatçıların II Beynəlxalq elmi Konfransının materialları, 27-28 Aprel 2018-ci il, Bakı, Azərbaycan, s.139-140
10. A.I.Mammadov, R.Z.Mehdiyeva, S.H.Jabarov, R.E.Huseynov. Crystal structure and magnetic properties of solid solutions  $BaFe_{12-x}Al_xO_{19}$  // 14th International Conference on “Technical and Physical Problems of Electrical Engineering”, 15-17 October 2018, Nakhchivan State University, s. 111 – 114



11. R.E.Hüseynov.  $\text{BaFe}_{10.8}\text{Al}_{1.2}\text{O}_{19}$  multiferroikinin termik xassələri // AMEA-nın xəbərləri, fizika-texnika və riyaziyyat elmləri seriyası, fizika və astronomiya, 2018, cild. XXXVIII, № 5, s. 110 – 114
12. R.E.Huseynov, A.I.Mammadov, R.Z.Mehdiyeva, A.V.Trukhanov, S.V.Trukhanov, V.A.Turchenko, T.P.Hoang, N.T.Dang, S.H. Jabarov. Infrared Spectroscopy, X - ray Diffraction and Neutron Diffraction Study of  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  Solid Solutions // Journal of the Korean Physical Society, 2019, v.74, p. 584-588.
13. Əli Məmmədov, Ramiz Hüseynov, Rəfiqə Mehdiyeva, Sakin Cabarov, Xəqani Əhmədov.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  bərk məhlullarının rentgen difraksiyası və infraqırmızı spektroskopiyası / Ümummilli lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 96-cı ildönümünə həsr olunmuş Gənc Tədqiqatçıların III Beynəlxalq elmi Konfransının materialları, 29-30 Aprel 2019-cu il, Bakı, Azərbaycan, səh.71-74.
14. R.E.Hüseynov.  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$  bərk məhlullarının quruluş və maqnit xassələrinin tədqiq // AJP Fizika, vol. XXV №2, sec. Az, 2019, s.28-33.

Dissertasiyanın müdafiəsi \_\_\_\_\_ 2021-ci il tarixində saat \_\_\_\_\_-da Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.14 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: Az-1143, Bakı şəh., H. Cavid pr. 131  
e-mail: *director@physics.science.az*

Dissertasiya ilə Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası Fizika İnstitutunun kitabxanasında tanış olmaq olar.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası Fizika İnstitutunun rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat \_\_\_\_\_ 2021-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 19.02.2021

Kağızın formatı: A5

Həcm: 40262

Tiraj: 100