

**AZƏRBAYCAN MİLLİ ELMLƏR AKADEMİYASI**  
**akademik H.M.Abdullayev adına FİZİKA İNSTİTUTU**

---

---

*Əlyazması hüququnda*

**ŞƏHLA NURƏDDİN QIZI ƏLİYEVƏ**

**NİLXZNXFE2O4 MİKROTOZLARININ VƏ NAZİK  
TƏBƏQƏLƏRİNİN MAQNİT XASSƏLƏRİ**

(2203.01-Elektronika)

Fizika üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün  
təqdim edilmiş dissertasiyanın

**A V T O R E F E R A T I**

**Bakı – 2016**

Dissertasiya işi Azərbaycan MEA akademik H.M. Abdullayev adına Fizika İnstitutunda yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbəri:  
Fizika- riyaziyyat elmləri  
doktoru

**T.R. Mehdiyev**

**Rəsmi opponentlər:**

Fizika elmləri doktoru

**S.S. Rəhimov**

Fizika-riyaziyyat elmləri  
doktoru, professor

**K.R. Allahverdiyev**

**Aparıcı təşkilat:** Bakı Dövlət Universitetinin “Fiziki elektronika” kafedrası

Dissertasiyanın müdafiəsi “19” oktyabr 2016-cü il saat 11<sup>00</sup> – da Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının akademik H.M.Abdullayev adına Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən D.01.011 Dissertasiya Şurasının iclasında olacaq.

Ünvan: AZ-1143, Bakı ş., H.Cavid pr. 131.

E-mail: [director@physics.ab.az](mailto:director@physics.ab.az)

Dissertasiya ilə AMEA akademik H.M.Abdullayev adına Fizika İnstitutunun elmi kitabxanasında tanış olmaq olar.

**Avtoreferat “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2016-cı ildə göndərilmişdir.**

D.01.011 Dissertasiya Şurasının  
Elmi katibi, fizika-riyaziyyat elmləri  
doktoru, professor

**D.H. Arash**

## İŞİN ÜMUMU XARAKTERİSTİKASI

**Mövzunun aktuallığı.** İfratyüksək tezliklərdə müasir bərkcisim elektronikasının inkişafı, bir tərəfdən verilmiş xassəli materialların alınması və intensiv təkmilləşdirilməsi, digər tərəfdən isə informasiyanın ötürülmə və işlənməsi sistemlərində istifadə üçün yararlı olan yeni tip rəqs və dalğaların axtarışı ilə əlaqədardır. Bu perspektiv istiqamətlərdə ferritlərin tədqiqinə böyük maraq var. Ferritlərin maqnit xüsusiyyətlərinin unikalığı yeni tip selektiv tezlik və idarəedici qurğuların yaradılmasına, dalğa mühitində ferrit-dielektrik-metal tipli periodik strukturların tətbiqinə, ferromaqnit rezonans hadisəsinin (FMR) praktiki istifadəsinə və s-ə imkan yaradır. Həmçinin hazırda maddələrin maqnit frustrasiyalı düzülüşü və mübadilə qarşılıqlı təsirinin xarakterinin müəyyənəşdirilməsi maqnit hadisələri fizikasının aktual olan fundamental problemlərindəndir. Qeyd edək ki, şpinel quruluşa malik ferritlərdə frustrə olunmuş maqnit struktur hər iki altqəfəsin qeyri-maqnit ionlarla qarışması və yaxud onlarda işarə və qiymətcə müxtəlif olan mübadilə qarşılıqlı təsirlərin mövcudluğu nəticəsində əmələ gəlir. Maqnit ionu qeyri-maqnit ionla əvəz olunduqda spin zəncirinin qırılması və sinqlet vəziyyətin lokal pozulması baş verir. Nəticədə qeyri-maqnit atomların yaxınlığında spinin antiferromaqnit-korrelyasiya olunmuş sıfırdan fərqli proyeksiyalı oblastları (lokal antiferromaqnit düzülüşlü oblastlar) yaranır. Energetik nöqtəyi nəzərdən maqnit əlaqələrinin frustrasiyası bütün mübadilə əlaqələrinin enerjisinin eyni vaxtda minimallaşmasının qeyri-mümkünlüyü ilə şərtlənib. Bunun nəticəsində maqnit sistemdə qeyri-bircins vəziyyət, uzaq antiferromaqnit düzülüşlü qarşılıqlı təsir sahələri- klasterlər yaranır. Qeyri-maqnit ionları daxil olduğu zaman maqnit düzülüşün yaranmasının izahı spin klasterlərinin “qanadlarının” örtülməsi, qonşu zəncirdəki klasterlərin isə zəif zəncirlərarası qarşılıqlı təsir ilə korrelyasiya olunmasıdır. Antiferromaqnit hala faza keçidində maqnit rezonansın signalı əsasən paramaqnit rezonans signalından (EPR) antiferromaqnit rezonans signalına (AFMR) çevrilir.

Ferrimaqnitlərdə maqnit çevirmələrinin daha geniş öyrənilməsinə əsaslı şəkildə maraq vardır, çünki ferrimaqnitlərdə spontan maqnitlənmanın yaranma mexanizmi ferromaqnit materiallardakı mexanizmdən fərqlidir. Beləki, ferrimaqnitlərdə maqnit düzülüş dolaylı mübadilə qarşılıqlı təsiri ilə əlaqədardır. Dissertasiya işində şpinel quruluşa malik  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  nümunələrindən istifadə edilib. Bu ferritlər qiqaheers diapzonun da daxil

olduğu geniş tezlik intervallarında radiouducu material kimi, radioelektronikada yüksək tezlikli filtrlərdə geniş tətbiqə malikdir. Messbauer tədqiqatlarına uyğun olaraq bu ferritlərin tərkiblərindəki maqnit ionları dolayı mübadilə qarşılıqlı təsirində iştirak etməsinə baxmayaraq, onların maqnit strukturu ferrimaqnit düzülüşün üstünlük təşkil etdiyi ayrıca spontan-maqnitlənmiş oblastlardan ibarətdir. Adətən bu ferritlərdə frustrasiyalı maqnit strukturun əmələ gəlməsi qeyri-maqnit ionlarının mövcud olması ilə bağlıdır. Bu ferritlərin Messbauer spektrlərində bir neçə sekstetin mövcudluğu struktura qeyri-maqnit Zn və Ni ionlarının daxil olması ilə Fe-O-Fe əlaqəsinin qırılması hesabına yaranan dəmir ionlarının qeyri-ekvivalent vəziyyətləri ilə izah olunur. Belə ki, dəmir nüvəsində maqnit sahəsinin qiyməti qırılmış əlaqənin sayından asılıdır (qırılmış əlaqə nə qədər çox olarsa, maqnit sahəsinin qiyməti bir o qədər də kiçik olar). Ferritlərin Messbauer spektrlərində dubletin mövcud olması mübadilə qarşılıqlı təsirindən (qeyri-maqnit Zn və Ni ionlarının ferritin strukturuna daxil olması zamanı) çıxan dəmir ionlarının olması ilə izah olunur, çünki tetraedrik (A altqəfəsi) altqəfəsdə yerləşmiş diamaqnit  $Zn^{2+}$  ionlarının nüvələrində ifratincə maqnit sahəsinin olmadığı müəyyən edilmişdir.

Dissertasiya işində tezliyin və temperaturun geniş oblastında  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75; 1$ ) mikrotozlarının və nazik təbəqələrinin maqnit xassələrinin tədqiqinin nəticələri təqdim edilmişdir. Alınmış nəticələr işin ifadə edilmiş məqsədlərinin praktiki olaraq reallaşmasının mümkünliyünü təsdiq edir.

**İşin məqsədi.**  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  mikrotozları və nazik təbəqələrinin maqnit spektrlərinin xüsusiyyətlərinin təbiətini və bu materiallar əsasında santimetrlik və millimetrlik diapazonlarda nanoelektronika qurğularının yaradılması imkanlarının müəyyənləşdirilməsindən ibarətdir.

**Göstərilən məqsədə çatmaq üçün aşağıdakı məsələlər həll edilmişdir:**

- $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75; 1$ ) mikrotozları və nazik təbəqələrinin sintezi;
- $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  mikrotoz və nazik təbəqələrin rentgen faza analizi və nazik təbəqələrin səthlərinin topoqrafiyasının atom qüvvə mikroskopu (AQM) ilə analizi;
- DSK (diferensial skan kalorimetr) metodu ilə  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  mikrotozlarının mümkün faza keçidlərinin öyrənilməsi və termodinamik parametrlərinin hesablanması;

- Maqnit xassələrinin öyrənilməsi: aşağı tezliklərdə, yüksək tezliklərdə və geniş temperatur oblastlarında (4K-300K)  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  tozlarının EPR və FMR spektrlərinin tədqiqi;
- $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  mikrotoz və nazik təbəqələrinin İQ (infraqırmızı)- və Raman spektrlərinin tədqiqi;
- $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  nazik təbəqələrinin səthlərinin maqnit xassələrinin tədqiqi;
- Metal-dielektrik- $(Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4)$  ferrit strukturunun formalaşdırılması;
- Metal-dielektrik- $(Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4)$  ferrit strukturunda səthi maqnitostatik və spin dalğalarının yaranma şərtlərinin öyrənilməsi.

**Tədqiqat obyektləri və üsulları.** Tədqiqat obyektini kimi aşağıdakı nümunələr götürülmüşdür:

- $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75; 1$ ) mikrotozları;
- Saphir altlıqlı  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75$ ) nazik təbəqələri.

Tədqiqat üsulları kimi rentgenfaza analizi, DSK metodu, İQ-, Raman- və EPR spektroskopiyaya metodlarından, keçirici elektron mikroskopu və AQM-dan istifadə edilmişdir. Həmçinin  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  nazik təbəqəsi- dielektrik- metal strukturunda elektromaqnit səth dalğalarının yayılma şərti nəzəri olaraq (Mathcad və Mathematica proqramları) öyrənilmişdir.

**Elmi yeniliklər.** Dissertasiyada ilk dəfə:

1.  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75; 1$ ) mikrotozlarının infraqırmızı spektrlərində  $Ni^{2+}$  kationlarının  $Zn^{2+}$  kationları ilə əvəz olunma (yaxud əksinə) prosesini və  $Fe^{2+}$  və  $Fe^{3+}$  kationlarının miqdarını əks etdirən incə quruluş və parçalanma müşahidə edilmişdir. Müəyyən olunmuşdur ki, tədqiq olunan tərkiblərin infraqırmızı spektrlərinin intensivlikləri  $Fe^{2+}$  və  $Fe^{3+}$  kationlarının konsentrasiyasından asılıdır.
2.  $Al_2O_3$  altlığı üzərinə çökdürülmüş  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75$ ) nazik təbəqələrinin Raman spektrlərində “əlavə” spektral zolaqların iştirakı müəyyən edilmişdir. Bu “əlavə” spektral zolaqların intensivliyi, tezliyi və xəttinin eni maqnit domenlərinin ölçülərinin dəyişməsi ilə, həmçinin  $Fe^{2+}$  və  $Fe^{3+}$  kationlarının konsentrasiya nisbəti və maqnit nüfuzluğu ilə korrelyasiya olunur. Müəyyən olunmuşdur ki, bu dəyişikliklər  $x=0.25-0.6$  konsentrasiya intervalında baş verir və çevrilmiş şpineldən normal şpinelə (yaxud əksinə) struktur keçidinə uyğundur.

3.  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75$ ) nazik təbəqələrinin Raman spektrləri normal rəqs spektrlərinin, maqnon və maqnon-fonon qarşılıqlı təsirinin nəzərə alındığı model çərçivəsində interpretasiya olunmuşdur.
4.  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75$ ) nazik təbəqələrinin Raman səpilmə spektrlərində 26.4THs tezlikli ( $880\text{sm}^{-1}$ ) yüksək intensiv spektral xəttin süalanma generasiyası aşkar edilmişdir.
5.  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.5; 0.75; 1$ ) mikrotozlarının EPR spektrlərində “zəif” maqnit altqəfəs müşahidə olunmuşdur.
6.  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.5; 0.75; 1$ ) mikrotozları üçün spin konsentrasiya təyin edilmişdir.  $Ni_{0.75}Zn_{0.25}Fe_2O_4$  və  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  tərkibləri üçün spinlərin istiqamətinin dəyişildiyi “kompensasiya” nöqtələrinin (Morin keçidi) olması müəyyən edilmişdir:  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  üçün  $\sim 180\text{K}$  və  $\sim 250\text{K}$ ;  $Ni_{0.75}Zn_{0.25}Fe_2O_4$  üçün  $\sim 120\text{K}$  və  $\sim 290\text{K}$ .
7.  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O$  təbəqəsi- dielektrik- metal strukturunda elektromaqnit səth dalğasının yaranma şərti qısaca ifadə edilmiş, tezliyin, dalğanın qrup sürətinin və onun dispersiyasının, qeyri-xəttilik əmsalının, dayanıqsızlığın yaranma şərtinin, difraksiya əmsalının dalğa vektoru və dielektrik layının qalınlığından və həmçinin xarici maqnit sahəsinin intensivliyindən asılılığı müəyyən edilmişdir.

**İşin praktiki əhəmiyyəti.**  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  mikrotozları və nazik təbəqələrində yaradılmış nanoelementlərin elektron və maqnit blokları əsasında nanoelektronika və müasir informasiya-kommunikasiya sistemlərinin praktiki məsələlərinin həlli üçün yeni nəsil mürəkkəb funksional sxem və konstruksiyaların yaradılması işin əsas elmi-praktiki əhəmiyyətidir. Dissertasiya işinin nəticələri “SmS və (Ni,Zn)-ferritləri əsasında funksional nanoölçülü elektron və maqnit elementləri” (EIF-2013-9(15)-46/05/1-M-12) qrantının icrasında istifadə olunur.

#### **Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar.**

1.  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ferritlərin strukturunda Ni və Zn ionlarının miqdarının dəyişməsinin və onların əsas maqnit xassələrinin formalaşmasına təsiri ilə bağlı qanunauyğunluğun təcrübi tədqiqatlarının nəticələri.
2.  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  mikrotozları və nazik təbəqələrinin AQM, Raman-, EPR-, FMR- və maqnit spektrləri kimi təcrübi tədqiqatlarının nəticələrinin təhlili və interpretasiyası.
3. Müxtəlif tərkibli  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  əsasında bəzi qurğularının idarəetmə prinsiplərinin işlənməsi və praktiki mümkünlüyünün əsaslandırılması.

**Tədqiqatın nəticələrinin aprobeiasiyasi.** Dissertasiya işinin əsas nəticələri AMEA Fizika İnstitutunun seminarlarında, ICTPE-7, Lefkosa, TR Northern Cyprus 2011; ICTPE-8, Norway 2012; ICTMC-19, Niigata, Japan 2014; Baku World Forum of Young Scientists, Baku 2014; ICTF-16, Croatia 2014 konfranslarda məruzə və müzakirə edilmişdir.

**Nəşr olunmuşlar:** Dissertasiya materiallarına aid 17 iş dərc edilmişdir. Bunlardan 12-i məqalə, 5-i isə beynəlxalq konfrans materialıdır. Dissertasiya mövzusunə aid əsas nəşrlərin siyahısı avtoreferatda göstərilmişdir.

**Dissertasiya işinin strukturu və həcmi.** Dissertasiya girişdən, 5 fəsildən, nəticədən və ədəbiyyat siyahısından ibarətdir. Dissertasiyanın həcmi 66 ədəd şəkil və 22 ədəd cədvəl, həmçinin 162 adda istinad olunmuş ədəbiyyat siyahısı daxil olmaqla 199 səhifədən ibarətdir.

### **İşin qısa məzmunu.**

**Girişdə** mövzunun aktuallığı əsaslandırılmış, tədqiqatın məqsədi ifadə edilmiş, elmi yeniliklər, müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar, praktiki əhəmiyyəti verilmişdir.

**Birinci fəsildə**  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  mikrotozlarının və nazik təbəqələrinin sintezinin müvafiq rejimləri və texnologiyasının seçimi və bu nümunələrin termodinamik və rentgenstruktur tədqiqləri göstərilmişdir.

$Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ -ün sintezi üç əsas mərhələdən ibarətdir. Birinci mərhələdə sink ferriti yaranır, bu halda NiO və  $Fe_2O_3$  hissələri sərbəst vəziyyətdə qalır. İkinci mərhələdə isə stexiometriyaya zidd olaraq nikelin artıqlığı ilə ferrit formalaşır. Eyni zamanda  $ZnFe_2O_4$  qəfəsində  $Ni^{2+}$  ionlarının düzülüşü başlayır. Üçüncü mərhələdə  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  tərkibli qarışıq bərk məhlulların formalaşmasının son mərhələsi baş verir.

Şpinel quruluşa malik ferritlərin sintezi yalnız oksidləşmə dərəcəsinin dəyişməsi və izomorf heterovalent əvəz etməsi ilə deyil, həmçinin tərkibin stexometriya və faza bircinsliyinə görə “özünütənzipləmə” ilə müşayiət olunur. Şpinel quruluşlara deffektli quruluş kimi baxmaq olmaz. Bu halda konfigurasiya entropiyası sıfıra, sərbəst enerji isə maksimal qiymətə yaxınlaşır. Sintez prosesində strukturda nöqtəvi deffektlər və vakansiya şəklində nizamsızlığın müxtəlif formaları yaranır. Termodinamik tarazlıq pozulmaya qədər bu nizamsızlıqlar və onların konsentrasiyası praktiki olaraq dəyişməyəcək. Elektrikkeçiriciliyin qiyməti  $Ni^{+3}$  vakansiyalarının konsentrasiyası ilə düz mütənasibdir. Buna görə də  $NiFe_2O_4$ - $ZnFe_2O_4$  sistemlərində  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  bərk məhlullarının

yaranma şərtlərinin öyrənilməsi üçün onların termodinamik xassələrinin təcrübi və nəzəri tədqiqi aparılmışdır. Rentgen şüalanmasının difraksiya nəticələrinə əsasən alınmış ferritlər  $Fd\bar{3}m - O_h^7$  qrup simmetriyasına malik şpinel qrupuna aiddirlər. Məlumdur ki,  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ferritləri NiO və ZnO-nun artıq qalan miqdarını həll etmir.  $Fe_2O_3$ -in miqdarı artıq qaldıqda Küri temperaturunun artması müşahidə olunur ki, bu da məlum ferrit və  $Fe_3O_4$  maqnetitindən ibarət bərk məhlulun əmələ gəlməsi ilə izah edilir.

$Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75$ ) nazik təbəqələri sapfir altlığın səthinə termik vakuum yolu ilə çökdürülmüşdür. Təbəqələrin kristallıq dərəcəsi isə rentgen metodu ilə D8 ADVANCE və D2 PHASER (Bruker, Germany) difraktometrində qiymətləndirilmişdir. Alınmış təbəqələrin mükəmməlliyinə 3D Laser Raman Microspectroscopy Nanofinder 30 (Tokyo Instruments, Japan) konfokal Raman spektrometri və AIST-NT (Tokyo Instruments, Japan) ölçü başlıqlı SmartSPM™ atom qüvvə mikroskopu (AQM) vasitəsilə nəzarət olunmuşdur.  $600^\circ\text{C}$ -dən yuxarı temperaturalarda tablandırma təbəqələrin doyma maqnitlənməsini formalaşdırdırılmışdır.  $NiFe_2O_4$ -də  $Ni^{2+}$  ionları  $Fe_2O_3$ -dəki  $Fe^{2+}$  ionları kimi asanlıqla oksidləşmədiyindən digər fazalar  $NiFe_2O_4$  təbəqələrində müşahidə edilmir. Müəyyən edilmişdir ki,  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75$ ) təbəqələrin kristallaşması qisməndir. Beləliklə, təbəqənin maqnitlənməsinin anomal xassələrini kristal və amorf oblastlar arası maqnit qarşılıqlı təsirlə izah etmək olar.

**İkinci fəsilə**  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  mikrotoz və nazik təbəqələrinin infraqırmızı və Raman spektrlərinin tədqiqi və bu ferritlərdə fonon altsistemlərin parametrlərinin analizi təqdim edilmişdir.

$Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75; 1$ ) mikrotozlarının infraqırmızı spektrləri vaakum kamerasında, standart spektral ayırd etməsi  $0,5\text{sm}^{-1}$  olan,  $4000 - 50\text{sm}^{-1}$  spektral diapazonunda, diffuz əksətmə əlavəli infraqırmızı Furye Vertex70 spektrometrində (Bruker, Germany) tədqiq olunmuşdur. Spektrlər  $NiFe_2O_4$ ,  $ZnFe_2O_4$ , ( $Fe_3O_4$ ) maqnetitinə və bir neçə ferrit tərkiblərinə dair nəşr olunmuş işlərlə müqayisə edilərək qiymətləndirilmişdir. Bütün hallarda alınmış spektrlərdə incə quruluş və parçalanma müşahidə olunur. Tədqiq olunan  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75; 1$ ) mikrotozlarının rəqs spektrləri faktor-qrup metodunun qrup nəzəriyyəsi analizi əsasında interpretasiya olunur. Müəyyən olunmuşdur ki, müşahidə olunan spektral xətlər, onların incə quruluşu və parçalanmaları  $Ni^{2+}$  kationlarının  $Zn^{2+}$  kationları ilə əvəz olunma



prosesində dəyişir. Beləliklə, kationların əvəz olunması yeni yük əlaqələrinə səbəb olur. Xüsusilə, infraqırmızı spektrlərin intensivliklərin dəyişməsi ilə tərkiblərdə  $Fe^{2+}$  və  $Fe^{3+}$  kationlarının nisbət dəyişmələri arasında əlaqə müəyyən edilmişdir. Bu əlaqə  $Ni^{2+}$  kationlarının  $Zn^{2+}$  kationları ilə əvəz olunma prosesində dəyişir.

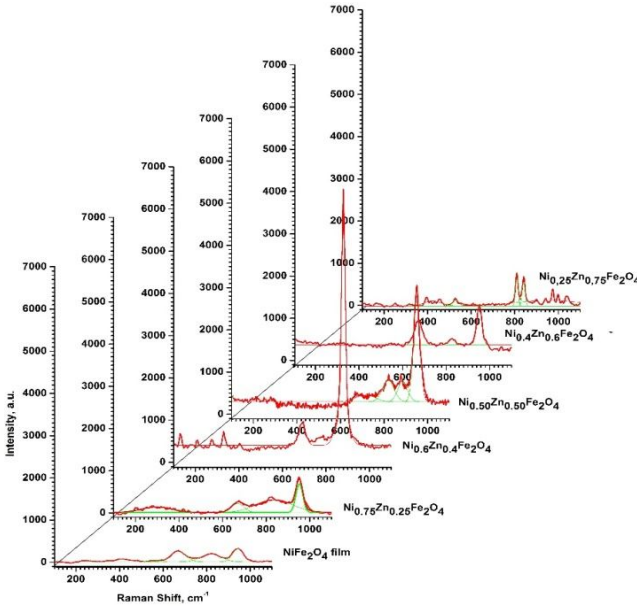
$Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  mikrotozlarının və nazik təbəqələrinin Raman-spektrləri tədqiq olunmuşdur. Raman spektrlərindən əldə olunmuş spektral xətlərdə müşahidə olunan bütün maksimumlar  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ -ün strukturunda nizamlı düzülüşün mümkün iki tipini ( $\alpha$ -tip və  $\beta$ -tip) nəzərə alan model əsasında interpretasiya edilmişdir.  $NiFe_2O_4$ -da  $\alpha$  və  $\beta$  nizam tipləri tetraqonal  $P4_122/P4_322$ -  $D_{2d}^3/D_{2d}^7$  və ortorombik  $Imma$ -  $D_{2h}^{26}$  strukturlarına uyğundur.  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75; 1$ ) mikrotozlarının Raman spektrlərində müşahidə olunan əlavə maksimumların təbiətini sadəcə strukturdakı vakansiya və defektlərin xaotik paylanması ilə izah etmək çətindir. Məlumdur ki, stexiometriyadan kənara çıxdıqda meydana gələn şpinel qəfəsinin təhrifi Raman spektrlərinə cüzi təsir edir. Digər yanaşma isə  $Zn^{+2}$  ion radiusunun  $Ni^{+2}$  radiusundan böyük olması ilə əlaqədardır. B-altqəfəsində  $Ni^{2+}$  və  $Fe^{3+}$  kationlarının nizamlı yaxud xaotik düzülüşü ehtimal edilərək qəfəs dinamikasının hesablanmışdır və müəyyən olunmuşdur ki, mikroskopik səviyyədə  $NiFe_2O_4$  strukturuna B-altqəfəsində düzülmüş  $Fe^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$  yaxud  $Ni^{2+}$  kationlarının mövcudluğu ilə fərqlənən, mümkün iki strukturun qarışığı kimi baxılmalıdır. Beləliklə, Raman spektrlərindəki əlavə maksimumların mövcudluğu strukturda qeyri-ekvivalent kationların paylanması və uyğun olaraq keçidlərin simmetriyasının və xüsusi ilə öncədən qadağan olunmuş fonon modlarının seçmə qaydası ilə əlaqələndirilmişdir.

Dissertasiya işində  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75; 1$ ) mikrotozlarının Raman spektrlərinin Qauss funksiyalarının vasitəsi ilə tədqiqi bir çox əlavə maksimumları kənarlaşdırmışdır və alınmış spektrlərin Qauss funksiyası dəsti ilə analizi əsas tezliklər dəstini təyin etməyə imkan verir.

$Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75; 1$ ) mikrotozlarının İQ spektrlərində müşahidə olunan  $76\text{sm}^{-1}$ -ə yaxın tezlik zolağı, bu tərkiblərin Raman spektrlərində də müşahidə olunmuşdur. Seçmə qaydasına görə İQ və Raman spektrlərində  $F_{1u}$  tip simmetriya rəqsləri eyni zamanda müşahidə olunmamalıdır, onda verilmiş zolağın yaranma təbiətinin baxılan zolağın yaranma təbiətindən fərqli olduğu aydındır.  $NiO$  və  $Fe_2O_3$ -ün Raman spektrlərində maqnon həyəcanlanmaları müşahidə edilmişdir və bu fakta

əsaslanaraq spektrin mövcud zolağı və həmçinin yaxın  $1126\text{cm}^{-1}$  və  $1313\text{cm}^{-1}$  tezliklər zolağı maqnonların həyəcanlanması ilə interpretasiya edilir. Spekrdə bu zolaqların vəziyyətinin dəyişməsi  $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ -ün tərkiblərində Ni və Zn- in miqdarının dəyişməsinə uyğundur ki, bu da onlarda spin rəqslərinin dəyişməsinə səbəb olur.

$\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75$ ) nazik təbəqələrinin Raman spektrlərində maqnonların qatqısı daha aydın müşahidə olunur (şək.). Spektral xətlərin xassələrinin interpretasiyası üçün ferrit nazik təbəqələrinin tərkibində maqnit strukturun dəyişmə xarakterinin nəzərə alınmalı olduğu “yeni” spektral oblast müşahidə olunmuşdur. Maqnit strukturundakı bu dəyişikliklər  $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  nümunələrinin iki tip qəfəsdən – normal və çevrilmiş şpineldən ibarət olması ilə bağlıdır.  $x=0,4\div 0,6$  diapazonunda  $\text{Fe}^{3+}$  ionlarının miqdarının, adacıqların ölçülərinin, xətlərin tezliklərinin və intensivliklərinin dəyişməsi ilə bu qəfəslərdən hər birinin qatqısının dəyişməsi müşahidə olunur.



$\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75$ ) nazik təbəqələrinin Raman spektrləri

“Yeni” spektral xətlərdən birincisinin tezliyinin dəyişmə xarakteri  $x=0,4\div 0,6$  diapazonunda birinci növ faza keçidinə oxşar, normal və

çevrilmiş qəfəsin hər birinin qatqısının dəyişmə prosesini göstərir. Aralarında “sıçrayışlı” dəyişmə baş verən tezlik xəttlərinin 2 asılılığı müşahidə olunur. Birinci və ikinci spektral xətlərin tezliklərinin dəyişmə xarakterləri eyni deyil.  $\text{Ni}_{0,6}\text{Zn}_{0,4}\text{Fe}_2\text{O}_4$  nazik təbəqəsində xəttin nisbi intensivliyi  $7 \cdot 10^3$ -ə qədər çatır. Bu isə maqnit nüfuzluğunun kəskin böyüməsi və altqəfəslər arası spinlərin istiqamətinin dəyişməsi və s. ilə xarakterizə olunur.

$\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  nazik təbəqələri üçün alınmış maqnit AQM profillər  $\text{Ni}_{0,6}\text{Zn}_{0,4}\text{Fe}_2\text{O}_4$  tərkibli təbəqədə maqnit domenlərinin ölçüsünün kiçildiyini göstərir. Messbauer effektinin tədqiqlərinə əsasən, tərkiblərdə iki və üç valentli dəmir kationlarının nisbət dəyişmələri ilə müşahidə olunan bütün dəyişikliklər uyğun gəlir.  $\vec{k} = 0$  dalğa vektorlu spin dalğasının həyəcanlanması və antiferromaqnit rezonans ilə müəyyən olunan bircins presessiya tezliyinə uyğun maksimumdan əlavə  $\sim 26,4$ THs tezlikli kifayət qədər intensivliyə malik maksimum müşahidə olunur ( $\text{Ni}_{0,6}\text{Zn}_{0,4}\text{Fe}_2\text{O}_4$  tərkibində -  $880\text{sm}^{-1}$ ). Bu maksimum Brillüen zona sərhəddində spin dalğasının ikiləşmiş enerjisinə uyğun gəlir. İkimaqnonlu səpilmənin intensivliyi maqnit düzülüşündən asılıdır. Elektron polyarizasiyası ferromaqnit və antiferromaqnitlərin ikimaqnonlu səpilməsinə böyük təsir göstərir. Maqnit anizotropiyasının enerjisi mübadilə enerjisi ilə müqayisə olunduğu halı istisna olmaqla, bu ferromaqnetiklərdə müşahidə olunmur. İzah üçün əsas mahiyyəti onun maqnit ionları arasında qarşılıqlı təsiri nəticəsində yaranan spin dalğası ilə kristalın polyarizasiyasında olan mübadilə mexanizmi təklif olunmuşdur. Xarici maqnit sahəsi tətbiq etdikdə müşahidə olunan ikimaqnonlu xətlər yerlərini dəyişmir. Bunu, eynizamanda həyəcanlanan maqnonun spin dalğasının iki qoluna aid olması kimi başa düşmək asandır. Zeeman enerjisini saxlamaqla, həyəcanlanma hər bir alt qəfəsdən spini bir vahid azaldır. Adətən temperatur artdıqda işığın maqnon səpilməsi zəifləməyə başlayır, xətlər isə genişlənir, Küri temperaturundan yuxarı temperaturalarda işığın paramaqnit səpilməsi zəif və yayılındır.

**Üçüncü fəsil**  $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  ferrit mikrotoz və nazik təbəqələrinin maqnit xassələrinin tədqiqlərinin nəticələrindən bəhs edir.

AQM-da aparılan eksperimental tədqiqatlar görə  $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  nazik təbəqələrin səthində maqnitlənmə müxtəlif paylanmışdır.  $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  nazik təbəqələrinin səthlərinin skan nəticələri adacıqlı strukturun mövcud olmasını və adacıqların ölçülərini müəyyən etməyə imkan yaratdı. Adacıqların ölçüsü tərkiblərdə  $\text{Fe}^{2+}$  və  $\text{Fe}^{3+}$  kationlarının

konsentrasiyalarının, Rentgen və Raman spektrlərinin, intensivliklərinin və s.-nin dəyişməsi ilə uyğunluq təşkil edir. Aşkar olunmuş maqnit oblastlar maqnitlənmə üçün xarakterik olan maqnit kontrasta malik olurlar, spontan maqnitlənmə nəticəsində isə maqnit momentləri müxtəlif orientasiyaya malik olur ki, bu da onların birdomenli hesab etməyimizə əsas yaradır. Qalınlığı 20nm olan  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  nazik təbəqəsində maqnit domen və xətlərin XY müstəvisində qradient analizi göstərdi ki, domen XY müstəvisinə perpendikulyar istiqamətlənir və iki struktur vahiddən ibarət olur. Belə ki, domen ya uzunsov, ya da silindrik formada olur. Yumşaq maqnitlənmə oxu səth müstəvisinə perpendikulyar olur. XY müstəvisində domenin ölçüsünün  $\sim 100\text{nm}$  olduğu AQM tədqiqatları ilə müəyyənənmişdir.  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ -də təbəqənin səthindən “yuxarı” istiqamətdə (spinin istiqaməti  $\text{CoCr}$  iynəsində spinin istiqaməti ilə təyin olunur) yüksək maqnit cavablanma qeyd olunduğundan, onu “güclü” altqəfəsin təsiri ilə interpretasiya etmək olar. Müvafiq olaraq səthin müstəvisində “aşağı” orientasiya “zəif” altqəfəsin spininə uyğundur.

Dənəciklərinin ölçüsü  $\sim 20\text{nm}$  olan  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  mikrotozlarının 300K-4K temperatur intervalında EPR spektrləri çəkilmişdir. Temperatur dəyişmələri  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  (10nm) nanohissəciklərinin Messbauer tədqiqatları ilə müqayisə olunmuşdur. Məhz 4,2K temperaturda Messbauer tədqiqatlarında şpinel strukturunun tetra- və oktaedrik pozisiyalarında  $\text{Fe}^{+3}$ -ə aid olan sekstet müşahidə olunur. 4,2K-dən yuxarı temperaturlarda sekstetin dubletə keçməsi müşahidə olunur ki, bu da  $^{57}\text{Fe}$  ilə bağlı ifrat nazik larmor presessiyasından daha sürətlə rəqs edən maqnitlənməyə malik hissəciklərin çəkisinin artmasını əks edir. Nəticələr neytron səpilmə təcrübələri ilə təsdiq olunur. Neytron səpilməsi tədqiqatlarından 100-120K temperaturlara qədər yaxın düzülüşün saxlanıldığını və  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ -ün superantiferromaqnit olduğu görünür. 300K-də paramaqnit vəziyyətində olan hissəciklərin daha çox olmasına baxmayaraq, EPR tədqiqatları  $\sim 179\text{K}$  temperaturuna qədər  $\sim 20\text{nm}$  ölçülü zərrəciklər üçün yaxın düzülüşün saxlanıldığını təsdiq etməyə imkan verir.

Müəyyən olunmuşdur ki,  $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0.25; 0.5; 0.75; 1$ ) mikrotozlarının EPR spektrləri  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  və  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  nümunələrində müşahidə olan strukturlardan ibarətdir.  $\text{Ni}_{0.40}\text{Zn}_{0.60}\text{Fe}_2\text{O}_4$  nümunəsində maqnit həyəcanlanmasının mövcudluğu və təbiəti haqqında mülahizə kiçik bucaqlı neytron səpilməsinin energetik analizinə aid işlərdə bildirilmişdir. Ehtimal edilmişdir ki, uzununa dalğa maqnit həyəcanlanma ( $w$ -və  $nw$ ) halının sıxlığının artma səbəbi altqəfəslər arası və altqəfəslər daxili

mübadilə qarşılıqlı təsir ilə şərtlənən  $\text{Ni}_{0.40}\text{Zn}_{0.60}\text{Fe}_2\text{O}_4$ -ün qeyri-bircins maqnit strukturudur. Göstərilmişdir ki, aşağı temperaturalarda  $x(\text{Zn})=0.60, 0.68, 0.75$  konsentrasiyaları üçün qeyri-kollinear maqnit strukturu üçün xarakterik olan yüksək sahə qavrayıcılığı müşahidə olunur, həmçinin maqnit momentlərinin z-proyeksiyalarının maqnit qeyri-bircinsliyinin yaranması nəticəsində intensiv kiçik bucaq səpilməsi baş verir. Maqnit qeyri-bircinsliyin effektiv ölçüsü 1–10nm təşkil etmişdir.  $x(\text{Zn})=0.90$  və 1.0 konsentrasiyalarında ferrit tərkibləri ferrimaqnit olurlar,  $x(\text{Zn}) = 0.90$ -da uzaq maqnit düzülüş deyil, yalnız yaxın maqnit düzülüş müşahidə olunur.

Xarici maqnit sahəsinin 100-1300Oe intervalında və 300K-4K temperatur intervalında  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  mikrotozlarının EPR spektrlərinin forması temperaturdan zəif asılıdır. EPR xətlərindəki assimetriya adətən signala cavabdeh olan molekulların anizotropiyaya malik olmasını göstərir. Digər tərəfdən, məlumdur ki,  $\text{Fe}^{3+}$  ionlarının EPR spektri hər bir temperaturda müşahidə olunur. EPR spektrində  $\text{Fe}^{2+}$  ionları kristallik sahənin oktaedrik simmetriyadan xaotik kənara çıxması hesabına adətən enli xətlər verir. Oktaedrik simmetriyada təhrifin mövcud olması enli xətlərə uyğun sahənin yarı qiymətində  $AM=2$  qadağan keçidinə müvafiq olan xəttin yaranmasına səbəb olur.  $\text{Ni}^{2+}$  ionları hətta oktaedrik ətrafda da çox enli EPR spektrləri verir,  $\text{Ni}^{2+}$  xətlərinin eni 40G çata bilər.  $\text{Ni}^{2+}$  ionu cüt sayda elektronlardan ibarət olduğuna və Kramers teoremi tətbiqə yararlı olmadığından müşahidə olunan spektrdə xətlər qeyri-bircins enlənər.

Qarışıq sistemlərdə qeyri-bircins maqnit tipli spinlərin kiçik mübadilə sürətli qarşılıqlı təsiri zamanı spektrin müxtəlif qiymətli g-faktorlara malik ayrı-ayrı əyrilərdən ibarət olmasını nəzərə alaraq,  $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0.25; 0.5; 0.75; 1$ ) tozları üçün EPR spektrlərinin təhrifi qauss əyrilərinin cəmi kimi interpretasiya olunmuşdur.  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  mikrotozları üçün iki qauss əyrisinin cəmi vasitəsilə hesablanan əyriyə yaxınlaşmasında orta kvadratik xətanın kvadratkökünün hesablanan əyrinin yayılmasına nisbəti bütün temperatur diapazonunda 0.2%-dən böyük olmur. g-faktorun  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  üçün alınmış qiymətinin 2.0023-ə (belə ki, sərbəst elektronun qiyməti) yaxın olması güclü delokalizə olunmuş molekulyar orbitinin mövcudluğunu göstərir. g-faktorun qiyməti ilə sərbəst elektronun g-faktorunun qiyməti arasında fərqin böyük olması isə kristal qəfəsində olan cütləşməmiş elektronun ionla əlaqəsini təsdiq edir. Belə ki, cütləşməmiş elektronun hərəkəti qəfəsin strukturu ilə bağlı güclü daxili elektrik və maqnit sahələrində baş verir. Bu sahələr atomun orbital

momentinə də təsir edirlər və onun enerjisini kifayət qədər dəyişə bilirlər. Bununla həmçinin ferritlərin tərkibinin dəyişməsinin hər bir qauss komponentinin g-faktorlarının qiymətlərinə kifayət qədər təsir etdiyi izah olunur və bu da  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  strukturunda antiferromaqnit (yaxud ferrimaqnit) komponentin təsirini vurğulayır.

$ZnFe_2O_4$ -də 300K–149K intervalında ikinci qauss əyrisinin g-faktorunun qiyməti çox cüzi, yəni 2.03257 – 2.04828 aralığında dəyişir. 129K-dən 13.5K-ə qədər temperatur intervalında isə g-faktor qiymətini sürətlə, yəni 2.05725-dən 2.20061-ə qədər dəyişir. 13.5K –3.7K temperatur intervalında g-faktorun qiymətinin 2.20061-dən 5.86137-ə kəskin artması müşahidə olunur. Elə bu intervallarda birinci qauss əyrisinin g-faktoru ikinci qauss əyrisinin g-faktorundan çox fərqlənir. Hər ikisinin g-faktoru 3.7K temperaturunda eyni 5.86137 qiymətini alır. Bu asılılıqların izahı  $ZnFe_2O_4$  üçün müəyyən edilmiş supermaqnit effekti ilə bağlıdır.

$Ni_{0.25}Zn_{0.75}Fe_2O_4$ -də qauss əyrilərinin g-faktorlarının dəyişməsi oktaedrik pozisiyalarda  $Ni^{+2}$  ionunun meydana çıxması ilə xarakterizə olunur. Belə ki, ikinci qauss komponentinin g-faktoru kəskin şəkildə artaraq bu tərkibin qəfəsində cütləşməmiş elektronların sayının artması ilə özünü biruzə verir. Eyni zamanda sərbəst elektronun mövcudluğunu xarakterizə edən birinci qauss komponentinin g-faktoru isə cüzi dəyişir.

$x(Ni)=0.5$  və  $0.75$  konsentrasiyalarında antiferromaqnit  $ZnFe_2O_4$  komponentinin azalması kompensasiya nöqtələrinin mövcudluğunu göstərir:  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  üçün  $\sim 180K$  və  $\sim 250K$ ,  $Ni_{0.75}Zn_{0.25}Fe_2O_4$  üçün  $\sim 120K$  və  $\sim 290K$  temperaturlarında. Bu intervallara uyğun olaraq altqəfəsdə spinlərin istiqamətləri dəyişir. Məhz bu tərkiblərin Raman spektrlərinin intensivlik maksimumlarında “anomaliyalar” müşahidə olunur. Belə ki, spinlərin istiqamətlərinin dəyişmə effektinin müşahidə olunduğu temperatur intervalında tərkibdən asılı olaraq spinlərin nəinki qiyməti, həmçinin vəziyyəti də dəyişir.

İkialtqəfəsli kolinear ferrimaqnitlər üçün mövcud olan nəzəriyyə (Neel, Verveey və b.) ilə alınmış nəticələr, yəni ferritin tərkibindən və temperaturdan asılı olan üçüncü maqnit altqəfəs aydın izah olunmurdu. Qeyd edək ki, ferritin bu tərkibləri üçün Neel temperaturu (superparamaqnitizmin yaranması)  $\sim 120K$  tərtibindədir. Digər tərəfdən isə hər bir cüt oktaedrik kationa bir “sıçrayışlı” elektron uyğun olur, yəni ferritin elementar özəyi 8 belə elektrondan ibarət olur. Buna görə də,  $a=8.39 \cdot 10^{-8} \text{sm}$  elementar qəfəs parametrlərini bilməklə “sıçrayışlı” elektronların konsentrasiyasını hesablamaq olar:  $N = \frac{1}{a^3} \cdot 8 \approx 1.35 \cdot 10^{22} \cdot N$

üçün alınmış qiymət metallarda elektronların konsentrasiyası ilə müqayisə olunur. Məhz elə bu cəhəti Belov maqnetit üzrə işlərində göstərmişdir. Öz işində o qeyd etmişdir ki, maqnetitin elektrik xassələrinin tədqiqinə aid işlərin əksəriyyətində elektrikkeçiriciliyin sıçrayışlı mexanizminə üstünlük vermişdir. Aşqar və başqa defektlər tərəfindən maqnetitə daxil edilən elektronlar maqnetitin elektrik xassələrinə cüzi qatqı verirlər.  $s-d$  mübadilə qarşılıqlı təsiri (burada  $s$ -elektronların əvəzinə  $B$  altqəfəsindəki  $Fe^{2+}$  və  $Fe^{3+}$  arasında sıçrayan  $3d$ -elektronları götürülmüşdür) elektronların effektiv kütlələrinin böyüməsinə səbəb olmalıdır. Mənfə  $s-d$  mübadilə qarşılıqlı təsiri maqnetiddə sıçrayışlı elektronların maqnit əlaqəli halına gətirib çıxarır ki, bu da maqnit müqavimət effektinə aid təcrübi nəticələri izah edir.  $T_t$  oblastında maqnetitin maqnit strukturunu üç maqnit altqəfəs şəklində təsəvvür etmək olar. Elektron altsistemlər altqəfəslər rolunu oynayır. Bu altqəfəs  $T \leq T_t$  temperaturalarda maqnetitin maqnitlənməsini (OK temperaturunda doyma maqnitlənməsi daxil olmaqla) qəfil azaldır. Nəzərə almaq lazımdır ki,  $Fe^{2+}$  kationu  $4\mu_B$  spin momentindən başqa  $\Delta M \approx 1\mu_B$  orbital momentinin dondurulmamış hissəsinə malikdir (oktaedrdə o triplet orbital halında  $l=1$  olduğuna görə), yəni bu kation  $\approx 5\mu_B$  momentə malikdir. Təcrübələrin göstərdiyi kimi  $T \leq T_t$  temperaturalarda mənfə  $s-d$  mübadilə nəticəsində maqnitlənmə  $\sim 22\%$  azalır. Maqnetitin maqnitostriksiyası və anizotropiyasına əsas qatqını  $Fe^{2+}$  ( $3d^6$ ) kationu verir.  $Fe^{2+}$  kationu kristallik sahə tərəfindən tam dondurulmamış orbital maqnit momentə malikdir. Beləliklə,  $o$ ,  $K_1$  maqnit anizotropiya və anizotrop maqnitostriksiya sabitlərinin yüksək qiymətlərini verməlidir.

Məlumdur ki,  $T_m \sim 260K$ -da  $\alpha-Fe_2O_3$ -da spinlərin istiqamətinin

“Morin keçidi” adlandırılan dəyişməsi baş verir.  $T_m$ -dan aşağı qiymətlərdə iki maqnit altqəfəsdə momentlər antiparalleldir və  $[111]$  romboedrik oxu boyunca nizamlı düzülürlər (AF faza).  $T_m$ -dan yuxarı qiymətlərdə momentlər  $(111)$  səthində azacıq meyl edirlər, bu da Dzyaloşinskiy-Moriya qarşılıqlı təsiri (WF faza) ilə şərtlənən zəif ferromaqnit momentin yaranmasına səbəb olur. Spinin oriyentasiyasının dəyişməsi  $T_m$  temperaturunda anizotropiya sabitinin işarəsinin dəyişməsi ilə bağlıdır.

Belovun işində maqnetiddə aşağı temperaturalı çevrilmə modeli, “maqnit –elektron” keçid modeli təklif olunmuşdur. Bu model  $s-d$

mübadilə qarşılıqlı təsirinin rolunu (Dzyaloşinskiy) və onun iki altqəfəslə kollinear ferrimaqnitlərdə sıçrayışlı elektronlara təsirini göstərir. Beləliklə, bu model  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ferritlərinin maqnit xassələrinin müşahidə olunan xüsusiyyətlərini ətraflı şəkildə izah edir.

Praktiki olaraq  $NiFe_2O_4$  mikrotozunun qauss əyrisinin g-faktoru temperaturdan asılı olmur. Tətbiq edilmiş xarici maqnit sahəsi  $H_{xar}$  impulsun əlavə orbital momentini induksiya edir, elektronun orbital hərəkəti isə tətbiq sahəsinə əks istiqamətə yönəlmiş  $H_{induk}$  maqnit sahəsini yaradır. Beləliklə, elektron spini  $H_{lok} = H_{xarici} - H_{induk}$  bərabər olan lokal maqnit sahəsində yerləşir.

$Ni_{0.35}Zn_{0.65}Fe_2O_4$  nümunəsinin maqnit rezonansın eksperimental tədqiqi:  $H||H^{iYT}$  və  $H\perp H^{iYT}$  polarizasiyaları və dörd tezlik 26, 28, 30, 32 QHs üçün aparılmışdır. Analiz göstərir ki, 1QHs-ə qədər tezlik oblastında müşahidə olunan yüksək tezlikli rezonans (Ni-Zn) ferriti strukturunda dəmir oksidinin mövcudluğu ilə də təyin oluna bilər. Müxtəlif tezliklər üçün  $H\perp H^{iYT}$  polarizasiya halında siqnalın amplitudları demək olar ki, tətbiq olunmuş maqnit sahəsinin artması ilə xətti böyüyür,  $H||H^{iYT}$  halında isə azalır. Hər iki polarizasiya halında rezonans xətti daha güclü maqnit sahəsinə doğru yerini dəyişir. Bu effektin izahı  $H\perp H^{iYT}$  halı üçün tezliyin artması ilə rezonatorun məxsusi rezonans tezliyinin böyüməsi,  $H||H^{iYT}$  halında isə daxili sabit sahənin vektorunun istiqamətinin xarici sahə istiqamətinə yaxınlaşması ilə əlaqələndirilmişdir.

**Dördüncü fəsilə** metal-dielektrik və ferrimaqnit təbəqə-dielektrik-metal strukturlarında elektromaqnit səth dalğasının yaranma şərti öyrənilmişdir. Metal kimi parametrləri  $\sigma_0 = 3.7 \cdot 10^{17} c^{-1}$ ;  $r_s/a_0 = 2.07$ ;  $l_s = 161 \text{ \AA}$ ;  $\Gamma = 12.5 \cdot 10^{13} c^{-1}$ ;  $\tau = 0.8 \cdot 10^{-14} c$ ;  $\omega_p = 2.4 \cdot 10^{16} c^{-1}$  olan aliminium layından istifadə olunmuşdur. Dielektrik kimi polivinilxlorid götürülmüşdür. Skin layının qalınlığı sərbəst qaçış yolunun uzunluğundan böyük olduqda aliminium üçün skin layın dərinliyinin tezlik asılılığı hesablanmışdır. Burada  $\omega\tau \ll 1$  şərtini ödəyən dəyişən sahənin tezliyi üçün normal skin-effekt müşahidə olunur.  $1 \ll \omega\tau \ll \omega_p\tau$  şərtini ödəyən tezlik oblastı relaksasiya oblastına uyğundur. Rəqs tezliyi toqquşma tezliyindən kifayət qədər böyük olduqda skin layının qalınlığı tezlikdən asılı olmur. Skin- layın qalınlığının sərbəst qaçış yolunun uzunluğundan kiçik olduğu bəzi tezlik oblastlarında anomal skin effekt müşahidə olunmalıdır. Aliminium üçün 273°K temperaturunda zəif anomal effekt müşahidə edilmişdir. Səth dalğasının mövcud olduğu aşağı 0.382MHs və yuxarı  $6.962 \cdot 10^5$  MHs tezlik



sərhəddi, dalğanın yayılma  $\lambda_1$  və sönmə əmsalinin  $\delta_1$  tezlikdən asılılığı təyin edilmişdir.

(Ni-Zn) ferrit-dielektrik-aluminium strukturunda maqnitostatik səth dalğasının xarakteristikaları hesablanmışdır: tezliyin, qrup sürətinin, dispersiyanın, qeyri-xəttilik əmsalinin, dayanıqsızlığın yaranma şərtinin, difraksiya əmsalinin dalğa vektoru və dielektrik layının qalınlığından və həmçinin xarici maqnit sahəsinin intensivliyindən asılılığı müəyyənləşdirilmişdir.

**Bəşinci fəsilə** tədqiqatın nəticələrinin terahers lazer çeviricisi və maqnitostatik səth dalğalarında ifratyüksək tezlik modulyator kimi bəzi praktiki tətbiqlərinin reallaşdırılması araşdırılmışdır.

### **İşdə alınan əsas nəticələr.**

1.  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75; 1$ ) mikrotozlarının infraqırmızı spektrlərində  $Ni^{+2}$  kationlarının  $Zn^{+2}$  kationları ilə əvəz olunma (yaxud əksinə) prosesini və  $Fe^{2+}$  və  $Fe^{3+}$  kationlarının miqdarını əks etdirən incə quruluş və parçalanma müşahidə olunur. Müəyyən olunmuşdur ki, tədqiq olunan tərkiblərin infraqırmızı spektrlərinin intensivlikləri  $Fe^{+2}$  və  $Fe^{+3}$  kationlarının konsentrasiyası ilə təyin edilir.
2.  $Al_2O_3$  altlığı üzərində çökdürülmüş  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75$ ) nazik təbəqələrinin Raman spektrlərində “əlavə” spektral zolaqlar iştirak müəyyənləşdirilmişdi. Bu “əlavə” spektral zolaqların intensivliyi, tezliyi və xəttinin eni maqnit domenlərinin ölçülərinin dəyişməsi ilə, həmçinin  $Fe^{+2}$  və  $Fe^{+3}$  kationlarının konsentrasiya nisbəti və maqnit nüfuzluğu ilə korrelyasiya olunur. Bu dəyişikliklər  $x=0.25-0.6$  konsentrasiya intervalında baş verir və çevrilmiş şpineldən normal şpinele (yaxud əksinə) struktur keçidinə uyğundur.
3.  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75$ ) nazik təbəqələrinin Raman spektrləri normal rəqs spektrlərinin, maqnon və maqnon-fonon qarşılıqlı təsirinin nəzərə alındığı model çərçivəsində yaxşı interpretasiya olunur.
4.  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75$ ) nazik təbəqələrinin Raman səpilmə spektrlərində ilk dəfə olaraq 26,4 THs tezlikli ( $880\text{sm}^{-1}$ ) yüksək intensiv spektral xətt aşkar edilmişdir. Bu spektral xəttin spin təbiəti onun xarici maqnit sahəsindən asılı olmaması ilə təsdiq olunur.
5. Temperaturdan asılı olaraq  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.5; 0.75; 1$ ) mikrotozlarının EPR spektirlərində meydana çıxan “zəif” maqnit altqəfəs spektroskopik parçalanmanı kifayət qədər dəyişir. Bu “zəif” maqnit

komponentin mövcud olması maqnetitin maqnit xassələrinin izahı üçün təklif edilmiş Belov modelində izah edilir.

6. Bütün tərkiblər üçün spin konsentrasiya təyin edilmişdir və ilk dəfə olaraq  $Ni_{0.75}Zn_{0.25}Fe_2O_4$  və  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  tərkibləri üçün spinlərin istiqamətini dəyişildiyi “kompensasiya” nöqtələri (Morin keçidi) müəyyən edilmişdir:  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  üçün  $\sim 180K$  və  $\sim 250K$ ;  $Ni_{0.75}Zn_{0.25}Fe_2O_4$  üçün  $\sim 120K$  və  $\sim 290K$ .

7. Ferrimaqnit təbəqə-dielektrik-metal strukturunda elektromaqnit səth dalğasının yaranma şərti qısaca ifadə edilmiş, tezliyin, qrup sürətinin, dispersiyanın, qeyri-xəttilik əmsalının, dayanıqsızlığın yaranma şərtinin, difraksiya əmsalının dalğa vektoru və dielektrik layının qalınlığından və həmçinin xarici maqnit sahəsinin intensivliyindən asılılığı müəyyənləşdirilmişdir.

### **Dissertasiya işinin əsas nəticələri aşağıdakı işlərdə nəşr olunmuşdur:**

1. Aliyeva Sh.N., Amirov A.S., Babayeva N.R., Mehdiyev T.R. The composite magnetic properties with  $Ni_xZn_{1-x}Fe_2O_4$  filler / Proc of 7th Intern. Conf. ICTPE, Lefkosa, TR Northern Cyprus, 2011, p.327-332
2. Əliyeva Ş.N.  $Zn_xNi_{1-x}Fe_2O_4$  bərk məhlullarının maqnit xassələri // AJP Fizika, 2011, v.XVII, № 1, March, səh.6-9
3. Həbibzadə A.H., Əliyeva Ş.N., Əliyeva S.İ., Mehdiyev T.R. Tezlikdən asılı rezistorun perkolyasiya modeli çərçivəsində cərəyanaxma xüsusiyyətləri // AJP Fizika, 2011, v. XVII, №3, s. 23–28
4. Habibzade A.H., Aliyeva S.I., Aliyeva Sh.N., Mehdiyev T.R. Thermodynamic parameters of solid solutions of  $NiFe_2O_4$ - $ZnFe_2O_4$  system // AJP Fizika, 2011, v.XVII, No 4, p.14-19.
5. Aliyeva Sh.N., Aliyeva S.I., Mehdiyev T.R. SHF-magnetic properties of FD-resistor shell / Proc. Of The 8th Intern. Conf. ICTPE, Fredrikstad, Norway, 2012, p.313-320.
6. Habibzade A.H., Aliyeva S.I., Aliyeva Sh.N., Mehdiyev T.R. SHF-magnetic resonances in nickel-zinc ferrite // AJP Fizika, 2012, v.XVIII, No 3, p.3-16.
7. Aliyeva Sh.N., Aliyeva S.İ., Mehdiyev T.R. SHF-magnetic properties of FD –resistor shell / Abstract book of International Conference “Large scale research projects-2012: Materials science and informatics for high technologies”, Baku, 2012, p.31.

8. Aliyeva Sh., Aliyeva S., Mehdiyev T. SHF-magnetic properties of FD –resistor shell // Technical and Physical Problems of Engineering, 2013, v. 5, No 1, 2013, p.119-126.
9. Aliyeva Sh., Aliyeva S., Mehdiyev T. SHF magnetic properties of ((Ni-Zn)- ferrit)- dielectric-metal // EURAS Academic Journal, Winter 2012-2013, v.1, No 2, p. 31-44.
10. Алиева Ш.Н., Наджафов А.И., Мехтиев Т.Р. О некоторых особенностях в спектрах ЭПР (Ni,Zn) ферритов // AJP Fizika, 2013, v.XIX, No 2, с.107-114
11. Aliyeva Sh.N., Mehdiyev T.R. EPR spectra of (Zn, Ni)-ferrites / Abstract book of Baku World Forum of Young Scientist 2014, Baku, Azerbaijan, p.200-201
12. Aliyeva Sh.N, Aliyeva Y.N, Nadjafov A.I., Hasanov I.S., Huseynov E.K., Mehdiyev T.R. EPR and SPM studies of Zn-Ni ferrites // Phys. Status Sol.(c) 12, 2015, No 6, p.615-619
13. Aliyeva Sh., Aliyeva Y., Nadjafov A., Mehdiyev T. EPR spectra and AFM-analysis of thin film surfaces of (Zn, Ni) ferrites / Abstract book of ICTMC-19, Niigata, JAPAN, 2014, p.113.
14. Aliyeva Sh.N., Aliyeva Y.N., Mamiyev Z.Q., Karimova A.M., Huseynov E.K., Alekperov O.Z., Mammedov N.T., Mehdiyev T.R. The peculiarities of low-temperature spectra of paramagnetic resonance of nanodimensional powders and magnetic structure of thin film surfaces of (Ni-Zn)-ferrites / Abstract book of ICTF-16, Dubrovnik, Croatia, 2014, p.178.
15. Aliyeva Sh., Aliyeva Y., Balayeva N., Mehdiyev T. The ferromagnetic properties of (Zn, Ni)-ferrites / Abstract book of the role of multidisciplinary approach in solution of actual problems of fundamental and applied sciences (earth, technical and chemical), Baku, Azerbaijan, 2014, p.166-168
16. Əliyeva Ş.N., Kərimova A.M., Babayev S.S., Hüseynov E.K., Mehdiyev T.R.  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ferritlərinin Raman spektrləri // AJP Fizika, 2015, vol.XXI, No 4, s.17-28
17. Aliyeva Sh.N., Kerimova A.M., Mehdiyev T.R. IR spectra of (Ni, Zn) ferrite micropowders // AJP Fizika, 2016, vol. XXII, No 1, p.6-10

**ШАХЛА НУРАДДИН кызы АЛИЕВА**

**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МИКРОПОРОШКОВ И ТОНКИХ  
ПЛЕНОК  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$**

**РЕЗЮМЕ**

В диссертационной работе в качестве материала для исследования выбраны твердые растворы  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75; 1$ ), широко применяемых в радиоэлектронике, в качестве радиопоглощающих материалов в интервале частот, включающего гигагерцовый диапазон.

Целью проведенных исследований было установление природы особенностей магнитных спектров микропорошков и тонких пленок  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ферритов для создания эффективных устройств наноэлектроники сантиметрового и миллиметрового диапазонов.

В работе использован комплекс экспериментальных методов исследований, включающий рентгенофазовый анализ микропорошков и нанотолщинных пленок  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ , ИК-, Раман- и ЭПР-спектров, магнитных состояний поверхностей тонких пленок, температурных зависимостей термодинамических функций и др. с применением программ (ORIGIN, MATHCAD, MATHEMATICA и др). Было установлено, что Раман-спектры тонких пленок  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75$ ) интерпретируются в рамках модели, учитывающей спектры нормальных колебаний, магнонов и магнон-фононных взаимодействий. Анализ спектров ЭПР ферритов позволил впервые установить наличие зависящей от температуры, «наведённой» магнитной подрешетки (модель Белова), объясняющей переориентацию спинов (переход Морина), точек “компенсаций” и изменение размеров магнитных доменов в зависимости от содержания катионов  $Fe^{+2}$  и  $Fe^{+3}$ . Впервые в спектрах Раман-рассеяния тонких пленок всех составов  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ферритов обнаружена генерация излучения спектральной линии высокой интенсивности с частотой

26,4 THz ( $880\text{cm}^{-1}$ ). Сформулированы условия возникновения поверхностной электромагнитной волны в структуре ферромагнитная пленка  $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ -диэлектрик–металл. В качестве примеров в работе приведены некоторые лабораторные реализации устройств, использующих результаты проведенных исследований.

**ALIYEVA SHAHLA NURADDIN**

## **MAGNETIC PROPERTIES OF $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ MICROPOWDERS AND THIN FILMS**

### **SUMMARY**

In the thesis as the material for investigation was selected the solid solutions of  $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75; 1$ ), which widely used in radioelectronics as radio-absorbing materials in a wide range of frequencies, involving gigahertz range.

The aim of the research was to determine the nature of the features of the magnetic spectra of  $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  micropowders and thin films for the creating efficient nanoelectronics devices in centimeter and millimeter ranges.

In work were used a wide range of experimental research methods, including X-ray analysis of the synthesized  $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  micropowders and nano thickness films, IR-, Raman- and EPR spectra, magnetic states of thin film surfaces, the temperature dependence of thermodynamic functions, etc. with using programs (ORIGIN, MATHCAD, MATHEMATISA et al). It was found that the Raman spectra of  $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75$ ) thin films are interpreted within in a model, taking into account the spectrum of normal vibrations, the magnon and magnon-phonon interactions. EPR spectra analysis of this ferrites for the first time allowed to establish the existence of "the induced" magnetic sublattice depend on temperature (Belov model), explaining the reorientation of the spins (Morin transition), "compensation" points and the change of the magnetic domain sizes depending on the  $\text{Fe}^{+2}$  and  $\text{Fe}^{+3}$  cations content. For the first time in the Raman scattering spectra of  $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75$ ) thin films detected spectral lines generated high intensity radiation with a  $26,4$  THz ( $880\text{cm}^{-1}$ ) frequency. The conditions of occurrence the surface electromagnetic waves in the  $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ -dielectric-metal structure were formulated. Some laboratory

implementations of devices, using the results of research are given in the work as examples.

Kağız formatı: 60/84 16/1  
Sayı: 100 nüsxə

---

AMEA-nın mətbəəsində çap olunmuşdur

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК АЗЕРБАЙДЖАНА  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени академик Г.М. Абдуллаева**

---

*На правах рукописи*

**ШАХЛА НУРАДДИН кызы АЛИЕВА**

**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МИКРОПОРОШКОВ И ТОНКИХ  
ПЛЕНОК  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$**

**2203.01- Электроника**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

Диссертации на соискание ученой степени  
доктора философии по физике

**БАКУ – 2016**