

## QRANULLAŞDIRILMIŞ $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ NANOTƏBƏQƏLƏRİNİN OPTİK XASSƏLƏRİ

Ş.N. ƏLİYEVƏ

*Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutu,  
H. Cavid pr. 131, AZ 1143 Bakı, Azərbaycan*

Şüşə altlıq üzərində qranullaşdırılmış  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  nanotəbəqəsi lazer şüasının təsiri ilə submikron ölçülü ferrimaqnit hissəciklərinin əridilməsi yolu ilə əldə olunmuşdur. Bu təbəqələrdə ferritlər və şüşə altlıq arasında islatma effekti müəyyən edilmişdir. İslatma prosesinə xarici maqnit sahəsinin və domenlərin yaratdığı daxili maqnit sahəsinin təsiri böyükdür. Bu zaman yaranan qranulaların müstəvi formada olması, həmin hissəciklərin alt hissəsinin şüşə altlığın səthini yaxşı islatmasını göstərir. Belə təbəqələrdə qranulalar sferik formada olmurlar və qranulalar arası orta məsafə onların ölçüləri tərtibində olur. Bu isə əldə olunmuş qranullaşdırılmış nazik təbəqələrin yüksək maqnit-transport və ferromaqnit xassəli olmasını təmin edir. Beləliklə, yaradılan ferrit çeviricilər, makrostrukturun seçilmiş ölçüsü sayəsində xüsusi fəza modulyasiyalı maqnit və elektrik profillərinə malik olacaqdır.

Bir və ikifotonlu həyəcanlandırma ilə  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  nanotəbəqələrinin lüminensensiya spektrlərinin tədqiqi yüksək intensivliyə malik  $880\text{cm}^{-1}$  maksimumunun yaranma təbiətinin nanotəbəqə strukturunda qranulaların nizamlı düzülüşü ilə əlaqəli olduğunu, yəni onların bütün maqnit momentlərinin eyni istiqamətli və xarici maqnit sahəsilə sinxron olaraq döndüyünü təsdiqlədi. Qranullaşdırılmış  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  nazik təbəqəsinin THz əks olunma və buraxma spektrlərinin analizi, Ni-Zn ferritlərinin analoqu olan maqnetit təbəqələrində də müşahidə olunan akustik fonon modlarının parçalanma ardıcılığının olduğunu göstərir.

**Açar sözlər:** ferrit, altqəfəs, terahers spektroskopiyası,

**PACS:** 41.20Gz;42.72Ai

### GİRİŞ

Bir-birinə qarışmayan, qeyri-keçirici yaxud metal matrisa üzərində nano- və ya submikron maqnit hissəciklərdən ibarət qranullaşdırılmış nazik təbəqələr süni şəkildə strukturlaşdırılmış xüsusi materiallar sinifini təşkil edir. Zəruri fəza modulyasiyalı maqnit və elektrik profilləri, yüksək koersitivlik və maqnit müqaviməti, spin-orientasiya keçidləri və s. kimi makroskopik effektləri təmin edən verilmiş ölçüyə malik mikrostrukturların formalaşdırılmasının və modelləşdirilməsinin mümkünlüyü sayəsində belə təbəqələr yeni texniki tətbiqlər üçün çox əhəmiyyətlidir [1-6].

İşdə ilkin material kimi Ni-Zn ferrit zərrəciklərdən istifadə olunmuşdur.  $Fe^{2+} \rightarrow O^{2-} \rightarrow Fe^{3+}$  tipli qarşılıqlı təsirində elektron keçidlərinin mövcudluğu bu ferritlər üçün səciyyəvidir [7-10]. Bununla belə əsas faktor zərrəcik və matrisa arası əlaqənin möhkəmliyidir. Qeyd edək ki, sərbəst zərrəciklərin zamanla konqlomerasiyaya meyilliliyi maqnit hissəciklərin  $x_v$  həcmi payından və  $2r$  ölçüsündən asılı olan qranullaşdırılmış maqnit sistemlərin bəzi əsas xassələrinin deqredasiyasına səbəb olur.  $x_v$  parametri 0-dan 1-ə kimi kəsilməz olaraq dəyişə bilər.  $2r$  parametri isə yalnız  $x_v$  -nin aşağı qiymətlərində əhəmiyyət kəsb edir [11,12]. Bu parametrləri dəyişdirərək, sistemlərin fiziki xüsusiyyətlərini əhəmiyyətli dərəcədə dəyişdirmək olar. Bu parametrlərin dəyişməsilə qranullaşdırılmış mikrostrukturların tədricən yaranmasını belə təsvir etmək olar: bircins dispersiyalı istənilən qranullaşdırılmış sistem üçün ferrit aşqarının  $x_p$  perkolyasiya həcmi hissəsi mövcud olur [11,12] və əsasən bu həcmi hissə  $x_p=0.5-0.6$  yerləşir.  $x_v < x_p$  olduqda izolə olunmuş ferrit qranulaları,  $x_v > x_p$  halında

isə davamlı qarşılıqlı təsirdə olan qranulalar dəstəsi mövcud olur.

Qranullaşdırılmış real sistemlərdə hissəciklər sferik formada olmurlar. Bu zərrəciklər arası məsafə onların ölçüsü tərtibində olarsa, o zaman nəhəng maqnit-transport xassələrin yaranması müşahidə olunur [1]. Qranullaşdırılmış sistemlərdə maqnit hissəciklərinin birdomenli halı aşağı həcmi konsentrasiyalarda ( $x_v < x_p$ ), adi maqnit xassələr isə  $x_v > x_p$  olduqda müşahidə olunur. Silisium dioksid yaxud alüminium oksidi kimi izoləedici matrisalarda səpilməmiş Fe,  $Fe_2O_3$  və Ni aşqarlı qranullaşdırılmış sistemlərin maqnit xassələrində həmin nümunələrin ekvivalent həcmi materialları ilə müqayisədə xeyli dəyişikliklər müşahidə olunur [13-16]. [2] işində göstərilmişdir ki, əridilmiş kvarts matrisaya daxil edilmiş  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  qranulaları hətta 2 saat müddətində  $1100^\circ\text{C}$  temperaturda qızdırıldıqdan sonra da superparamaqnit xassələrinə malik olurlar. (NiZn-ferrit/ $SiO_2$ ) sistemində həcmi hissəni və zərrəciklərin diametrini dəyişdirməklə maqnit xassələr dəyişdirilə bilər. Belə ki,  $x < 34\%$  olduqda  $SiO_2$  matrisada təmiz stexiometrik NiZn-ferriti,  $x > 34\%$  olduqda isə az miqdarda  $Fe_2O_3$  də müşahidə olunur. Messbauer tədqiqatlarında Ni-Zn ferritinin superparamaqnit xassələri aşkar olunmuşdur [2]. Ferritin müxtəlif konsentrasiyalarının termoişlənməsi ilə doyma maqnitlənməsi 1,3 – 68 emu/g və koersitiv qüvvəsi 0 – 123 Oe olan nümunələri əldə etməyə imkan yaradır ki, bu koersitiv qüvvə NiZn ferritinin həcmi nümunələrinin koersitivliyindən iki dəfə böyükdür [17]. Qeyd edək ki, [18] işində saphir altlıqlı təbəqələr out-of-plane and in-plane həndəsələrində yüksək koersitiv qüvvəyə  $\sim 32\text{mT}$  malikdirlər.

Qəfəs parametrləri və elastiklik əmsalları ( $C_{11}=174$  GPa,  $C_{12}=67$  GPa) nəzərə alınmaqla [19] təbəqə-altlıq sərhəddində deformatsiyaya aid hesablamalardan

## S.N. ÖLİYEVA

koersitiv sahə və maqnitlənmə müəyyənləşdirildir. Belə ki, sıxılma zamanı *in-plane* həndəsəsində koersitiv sahə 32.5mT və *out-of-plane* həndəsəsində 32.5mT, dartılma zamanı isə uyğun olaraq 0 və 25mT-dir. Sıxılma zamanı *in-plane* həndəsəsində maqnitlənmə 10G və *out-of-plane* həndəsəsində 5G; dartılma zamanı uyğun olaraq 26 G və 23G-dur.

Beləliklə, son zamanlar müasir fizikanın aktual problemlərindən biri olan, qeyri-bircins maqnit hallarına və elektromaqnit sahəsinin mübadilə qarşılıqlı təsir probleminə marağın artmasının səbəbi aydın olur. İnformatikanın, nanoelektronikanın, müasir informasiya və kommunikasiya sistemlərinin qarşısına qoyulan tapşırıqların həlli məqsədi ilə  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ferritlərinin profiləşdirilmiş nanoölçülü təbəqələri əsasında nanoelementlərin yaradılması vacib faktorlardandır.

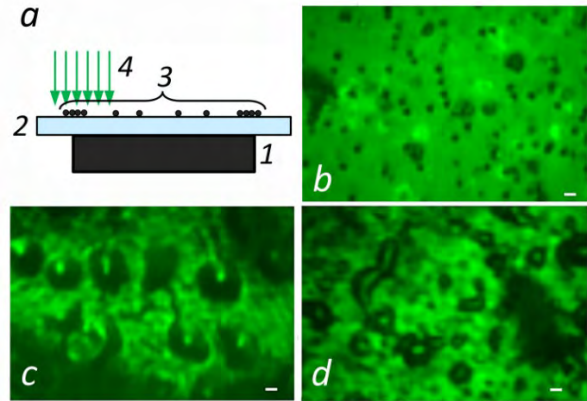
## NÜMUNƏLƏRİN HAZIRLANMASI

Bu işdə şüşə (optik şüşə K8 və Schott AG firmasının istehsalı olan analogi şüşə BK7) altlıq üzərində fəza modulyasiya olunmuş elektrik və maqnit profilli qranullaşdırılmış  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  ferrit mikrostrukturlarını əldə etmək üçün PLD metodundan istifadə olunmuşdur. Qeyd edək ki, K8 şüşəsinin kimyəvi tərkibi  $SiO_2$ – 73,5mol%,  $B_2O_3$ – 9,83 mol%,  $As_2O_3$ – 0,12 mol%,  $BaO$ – 1,28 mol%,  $K_2O$ – 4,28 mol%,  $Na_2O$  – 10.74 mol% komponentlərdən ibarətdir. PLD (pulsed laser deposition–impuls lazer tozlandırma) metodundan müxtəlif qızdırılma temperaturlarında və oksigen təzyiqlərində fərqli altlıqlarda böyüdülmüş Ni-Zn ferritin nazik təbəqələrinin morfoloji, struktur və maqnit xassələri öyrənilməsi üçün istifadə olunub [20]. Müəyyən olunmuşdur ki, əldə olunmuş nazik təbəqələr kompozitdir, belə ki, kristal adacıqların amorf faza ilə örtülməsi müşahidə olunmuşdur. Sonrakı tablandırma isə onların teksturlaşmasına və maqnit xassələrinin güclənməsinə səbəb olur. Belə təbəqənin maqnitlənməsi həcmi ferritin maqnitlənməsi tərtibində olmasına baxmayaraq, təbəqənin koersitiv maqnit sahəsi həcmi materialın koersitiv maqnit sahəsindən böyükdür. Bu xüsusiyyət Ni-Zn ferrit təbəqələrinin mikrostrukturlarında müşahidə olunan kristallitlərin anizotropiyası ilə əlaqədardır [20].

[3] işində  $SiO_2$  altlıq üzərinə lehmlənərək qranullaşdırılmış  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ –ferrit nazik təbəqəsinin hazırlanması haqqında məlumat verilmişdir. Hissəciklərin ölçüsü yüz nanometrdən mikrometrə, onlar arası məsafə isə yüz nanometrdən bir neçə mikrometrə qədərdir. Təcrübənin sxemi Şək.1,a-da göstərilmişdir.  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  nanotozlarının modifikasiyası Spectra – PhysicsTsunami lazeri ilə həyata keçirilmişdir.

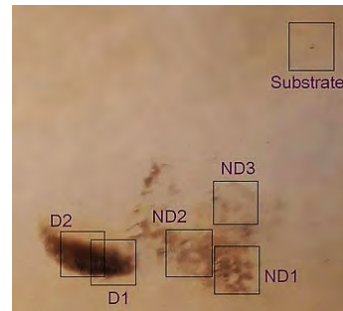
Şək.1-də maqnit sahəsi olmadan (b) və sabit maqnit sahəsinin təsiri ilə (c,d) ferrit hissəcikli altlığın ayırtılması 250nm-dən yüksək olan mikrofotolu göstərilmişdir. Qeyd edək ki, şüalandırmanın parametrləri: şüanın dalğa uzunluğu 1.064 mkm, impulsların uzunluğu 10nsan, enerji sıxlığı 480mC/sm<sup>2</sup>-dir (Şək.1,b-d). Şək.1-dən görüldüyü kimi, ~10nsan uzunluqlu lazer impulslarının təsiri ilə

konqlomeratlar əriyir və onlar birləşərək damcışəkilli struktur yaradırlar. Şək.1,c-də təsvir olunan mikrokristal strukturun analizi göstərdi ki, az sayda kristalloqrafik olaraq formalaşmamış, izometrik əlavəli müxtəlif ölçüyə malik sferoidlərdən ibarət təbəqədə həmin hissəciklər qeyri-bərabər paylanıb.



Şək.1. (a). Təcrübə sxemi (1 – sabit maqnit; 2 – şüşə altlıq; 3 – submicron hissəcikli  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  tozları; 4 – lazer şüalanması), (b), (c), (d) maqnit sahəsi olmadan və sabit maqnit sahəsində şüalandırma. Şkala 1mkm.

THs impulslarını əldə etmək üçün 1.03mkm dalğa uzunluğunda generasiya olunan femtosaniyəli ittirim lazerinin vasitəsi ilə həyəcanlanan dipol fotokeçirici antenadan istifadə olunub. Fotoantenna-detektor bu şüalarla qapanır və tədqiqat obyektindən keçən THs impulslarının elektrik sahəsinin amplitud və fazaları qeydə alınır.

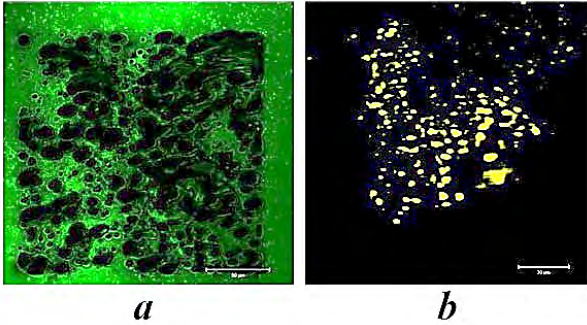


Şək.2. Qeyd olunmuş hissələrdə tədqiqat aparılmışdır: D1, D2 (Dense); ND1, ND2, ND3 (NotDense); Altlıq –  $SiO_2$

Şək.3-də qranullaşdırılmış  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  təbəqəsi və ölçü aparılan hissələr göstərilmişdir. Zərrəciklərin yüksək konsentrasiyalı (Dense) sahələri (D1)və (D2), aşağı konsentrasiyalı (Not Dense) sahələri isə– ND1, ND2 və ND3 kimi qeyd olunmuşdur. Əksolunma spektrlərinin çəkilməsi zamanı terahers şüalar nümunəyə  $f=5$  sm fokus uzunluqlu parabolik alüminium güzgüsü vasitəsilə 15 mm diametrlə başlanğıc şüasından təxminən 2mm diametrlə bir nöqtəyə fokuslaşdırılır. Terahertz buraxma və əks olunma spektrləri nümunənin eyni hissələrindən çəkilmişdir. Şüa əsasən fokus məsafəsi ~  $10^4$  mm olan güzgülərlə fokuslanmışdır; bölgənin ölçüsü isə ~5 mm-dir.

## TƏCRÜBƏ HİSSƏSİ VƏ MÜZAKİRƏ

Quruluşda müxtəlif deffektlərin yaranması, mikrostrukturun qismən yenidən qurulması, ölçülərdəki qeyri-bərabər dəyişikliklər, nümunələrin termik emalı prosesində yaranan faza çevrilmələri  $SiO_2$  altlıqlı qranullaşdırılmış nazik təbəqələrin mikroskopik quruluşunda müşahidə olunan xüsusiyyətlərin səbəbləridir. Alınmış təcrübə nəticələrinin analizi işlərinin [21,22] nəticələrini təsdiq edir. [23,24] işlərində qranulaların ölçüsündən asılı olaraq A və B altqəfəsləri üçün maqnit momentlərinin orta qiyməti hesablanmışdır. Bu isə maqnit xassələrinin formalaşmasına oksigen vakansiyası ilə bağlı dominant mexanizmdən başqa, həm də A və B altqəfəslərin kristalloqrafik pozisiyaları arasında maqnit kationlarının yenidən paylanmasının təsiri göstərir. [23,24] işlərində Morin effekti də, yəni anizotropiya sabitinin və maqnit momentlərinin yenidən orientasiyasının mövcudluğunu göstərən A və B altqəfəslərində spinlərin konsentrasiyalarının temperatur asılılığı təyin olunmuşdur.



Şəkil 3. a. Lazerlə işlənəndən sonra əks olunan işıqda ferrit layının bir hissəsinin fotosu; b. ikifotonlu həyəcanlandırmada lüminisent ferrit hissəcikləri

Şək. 3, a-da nazik təbəqənin lazerlə işlənmiş hissəsi göstərilmişdir. Alt hissəsi müstəvi olan damcılardan yaranmış əridilmiş ferritin şüşə altlığının səthini islatdığını göstərir. Təcrübələr göstərdi ki, sabit maqnit sahəsinin təsiri olmadan (250-300Oe) damcı formalı qranulaların konsentrasiyası çox aşağı olur (Şək.1,b) və çarpaz polarizatorla aparılan mikroskopik tədqiqatlarda təbəqədə struktura malik olmayan hissələr müşahidə edilmişdir. Bu hissələrin sahəsi bir neçə  $mm^2$  olur və təbəqə fonunda zərrəciklər və təmiz şüşə altlıqdan daha parlaq görünən depolarizasiya şüaları arasında kontrast müşahidə edilmişdir. Analoji nəticələr [23] işində,  $C_3: H = 7.87 \cdot 10^3$  A/m ( $1Oe = 79,577$  A/m) simmetriyalı xarici maqnit sahəsinin təsiri zamanı da müşahidə edilmişdir. [23] işində elektromaqnit sahəsi olmadan və elektromaqnit sahəsinin təsiri ilə termoişlənəndən sonra  $Al_2O_3$  altlığı üzərində tozların mikrostrukturunun formalaşma xüsusiyyətləri tədqiq olunmuşdur.

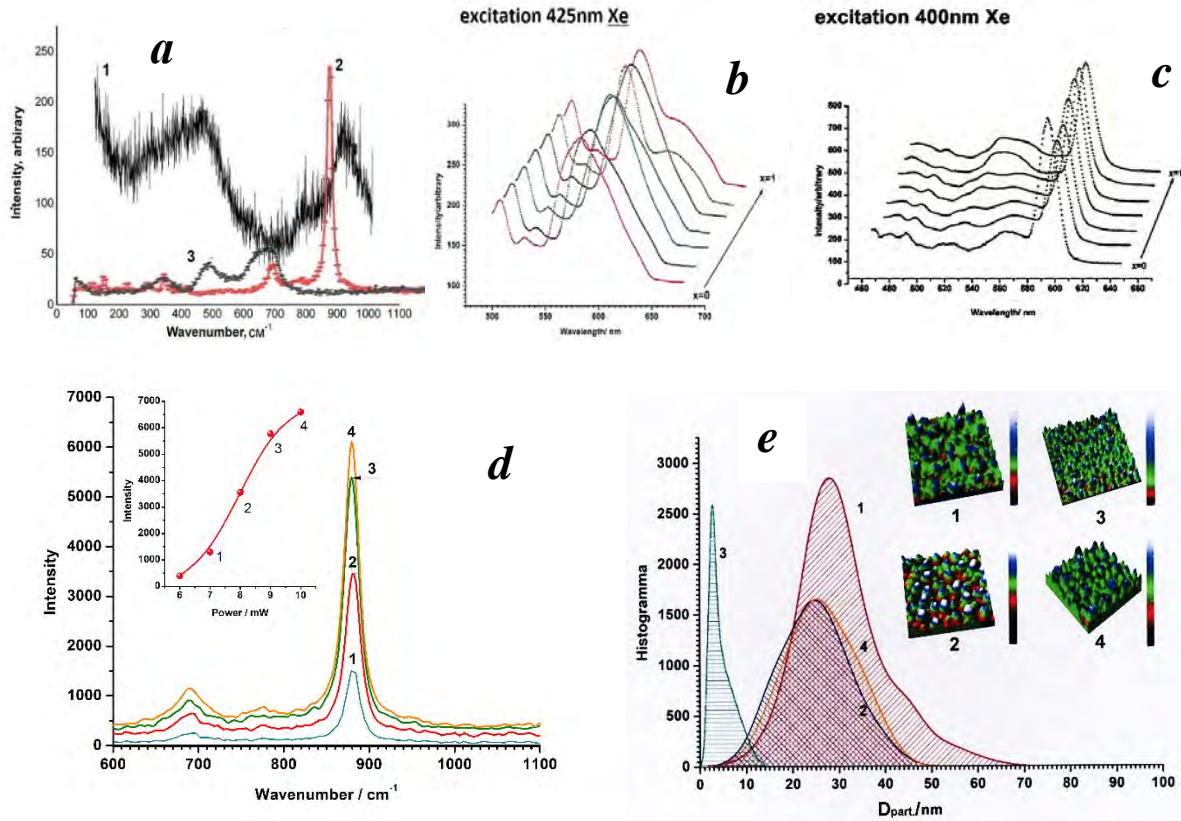
Lazımı effektin əldə olunması üçün prosesə texnoloji nəzarət [24] işində qeyd olunan qaydada həyata keçirilmişdir.  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  damcılardan alt

hissəsinin müstəvi formada olması bu ferritin şüşə altlığının səthini islatdığını göstərən faktlardandır, başqa sözlə ferrit ərintisi şüşə səthi isladır.

Şüşə altlıq üzərində lehimlənən Ni-Zn ferritlərinin şüşəni islatmasının möhkəmlik xarakteristikasına aid tədqiqatlardan bəhs edən [17] işində, lehimlərin alınması üçün optimal rejim parametrləri təyin olunmuş, daxili (domenlərin yaratdığı) və xarici maqnit sahəsinin rolu müəyyən edilmişdir. Beləliklə, makrostrukturların seçilmiş həndəsəsi sayəsində yaradılan ferrit mikrostrukturuları spesifik fəza modulyasiyalı maqnit və elektrik profillərinə malik olacaqdır. Digər tərəfdən, makroskopik qeyri-bircinslilik və udulma xüsusiyyətlərinə malik olan Ni-Zn ferritlərinin nazik təbəqələrinin Raman və lüminensensiyasına dair tədqiqatlar [25-27] onlarda işığın hiper-Reley və hiper-Raman səpilməsinin mümkünlüyünü göstərir [28].

Düşən şüanın dalğa uzunluğu tədqiq olunan obyektin ölçüsündən 10-20 dəfə böyük olduqda rezonans hadisəsi müşahidə edilə bilər.  $\lambda=456.7nm$  dalğa uzunluqlu arqon lazeri ilə həyata keçirilən ikifotonlu həyəcanlandırma zamanı modifikasiya olunmuş  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  nazik təbəqəsində 600 nm dalğa uzunluqlu lüminensensiya maksimumu müşahidə olunur (Şək.3, b). Qeyd edək ki, modifikasiya olunmamış zərrəcikləri ksenon lampadan şüalanan  $\lambda=425nm$  dalğa uzunluqlu şüalar ilə həyəcanlandırdıqda lüminensensiyanın intensivliyi (Şək.4,b)  $\lambda=400nm$  dalğa uzunluqlu şüalar ilə həyəcanlandırma zamanı müşahidə olunan lüminensensiyanın intensivliyindən kiçikdir (Şək.4,c). Bu isə rezonans effektin, yəni spektrin strukturunun daha mürəkkəb olduğunu göstərir [22].

Femtosekond uzunluqlu lazer şüası ilə aparılan tədqiqatlar alınmış nəticələri təsdiqləyir. Bu təcrübələrdə 100 fs uzunluqlu və 82MHz tezlikli şüa impulslarını generasiya edən, dalğa uzunluğu tənzimlənən Spectra-Physics Tsunami lazerindən istifadə edilmişdir. İkifotonlu mexanizm üzrə həyəcanlandırmaqla 488nm dalğa uzunluqlu arqon lazerinin və mikrospektrometrin birgə quraşdırıldığı lazer skan mikroskopunda fluorensent cavablanma qeydə alınmışdır. Modifikasiya olmuş ferritin 200-1000  $cm^{-1}$  diapazonunda Raman spektrləri bu ferritin modifikasiya olunmuş hissəciklərin Raman spektrlərindən çox fərqlənir (Şək. 4,a). Şək.4,a-da müqayisə üçün  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  ferritinin nanotoz və  $Al_2O_3$  altlığı üzərinə çökdürülmüş nanoqalınlıqlı təbəqəsinin Raman spektrləri göstərilmişdir [25-27]. Göründüyü kimi, nazik təbəqənin Raman spektrində yüksək intensivliyə malik zolaq müşahidə edilir. Bu işlərin müəllifləri yüksək intensivlikli piklərin yaranma səbəbini maqnit qarşılıqlı təsir ilə əlaqələndirirlər. Şək.4,d-də bu zolağın intensivliyinin həyəcanlandırıcı işığın gücündən asılılığı göstərilmişdir. Şək.4,e-də müxtəlif tərkibli  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ferritlərin qranullaşdırılmış təbəqələrinin AQM profilləri və ölçüyə görə nanoqranulların paylanması göstərilmişdir.



Şəkil 4. *a.* Modifikasiya olunmuş  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  ferritinin (1),  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  nazik təbəqəsinin (2) və bu materialın nanotuzunun Raman spektri (3) [25-27]. (2) və (3) Raman spektrlərinin intensivlikləri ikifotonlu həyəcanlanma rejimində əldə olunan Raman spektrlərinin intensivliklərindən böyükdür. (Şəkil.5,a); *b.* və *c.* Ksenon lampadan  $\lambda=425nm$  (b) və  $\lambda=400nm$  (c) dalğa uzunluqlu şüalarla həyəcanlandırılan müxtəlif tərkibli  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ferritlərinin lüminensensiya spektrləri [25]. *d.*  $880sm^{-1}$  maksimumunun intensivliyinin həyəcanlandırıcı şüanın gücündən asılılığı. *e.* 1.  $NiFe_2O_4$ , 2.  $Ni_{0.75}Zn_{0.25}Fe_2O_4$ , 3.  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ , 4.  $Ni_{0.25}Zn_{0.75}Fe_2O_4$  ferritlərinin AQM profilləri və mikro qeyri-bircinsliyin paylanma histoqramması

Qeyd edək ki,  $x=0.5$  tərkibində qranulaların ölçüsü daha kiçikdir. Analoji hal,  $Si(100)$  altlığı üzərinə sintez olunmuş müxtəlif qalınlıqlı (176, 118, 87 və 62nm)  $NiFe_2O_4$  nazik təbəqəsinin Raman spektrlərində  $520cm^{-1}$  tezliyində intensiv maksimum müşahidə edilmişdir və müəlliflər bu maksimumu altlığın Raman spektrinə aid etmişlər [29]. Bizim tədqiqatlarda isə altlıq kimi saphirdən istifadə olunduğuna görə bu maksimum müşahidə edilməmişdir.

[1] işdə qeyd olunduğu kimi,  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  nazik təbəqələrinin Raman spektrləri onlara normal rəqslərin spektrlərinin qatqısını, maqnon və maqnon-fonon qarşılıqlı təsirini və səth dalğasını nəzərə almaqla daha düzgün interpretasiya olunur. Bu isə xüsusilə iki-altqəfəslü ferritlərdə fenomenoloji relaksasiya nəzəriyyəsi baxımından da inandırıcıdır [30]. Bu nəzəriyyənin əmələ gəlməsi bəzi təcrübi faktlarla əlaqəlidir: femtosaniyəli lazerin impulsları ilə metal ferromaqnitlərin qızdırılması zamanı bir neçə pikosaniyə müddətində materialın maqnitlənməsi dəyişir; davam etmə müddəti 100 femtosaniyədən az olan lazerin impulslarının təsiri ilə altqəfəslərin maqnitlənmə istiqaməti dəyişir və s. Altqəfəslər arası mübadilə qarşılıqlı təsiri və altqəfəs daxili güclü mübadilə qarşılıqlı təsiri ilə şərtlənən antiferromaqnit vektorunun uzunluğunun relaksasiya prosesi daha

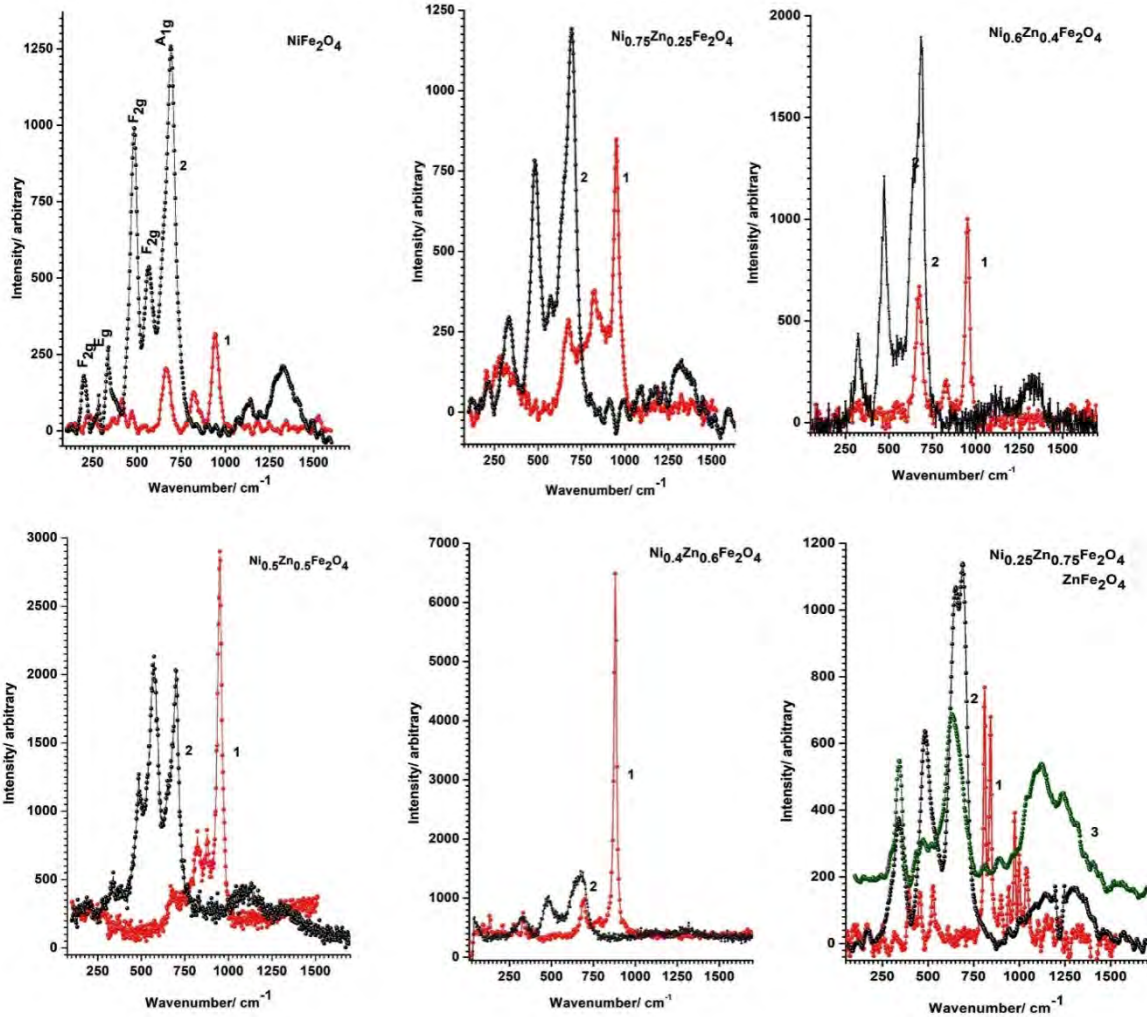
sürətlə baş verir. Optik modların sönməsi mübadilə sabiti ilə təyin olunur. Xüsusən də  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  ferritinin 3D strukturundan elektromaqnit dalğaları əks olunarkən müşahidə olunan güclü antirezons hadisəsi bu fikirin aktuallığını təsdiqləyir [31]. Müəyyən edilmişdir ki, mikro dalğa dəyişmələrinin əsas səbəbi nanokompozitlərdə baş verən maqnit rezons hadisəsidir.

Rezonans hadisəsindən başqa, bu tip ferrit zərrəcikləri üçün minimum udulmalara uyğun bəzi tezliklərdə antirezons hadisəsi də müşahidə edilir. [32-34] işlərində metal nanohissəciklərdən ibarət plazmon nanoantennaların elektromaqnit sahəsini cəmləşdirdiyi və nahamar səthli dielektrik mühitlərin elektromaqnit sahəsinin intensivlik maksimumlarının qeyri-bərabər paylanmasına səbəb olduğu qeyd olunmuşdur [34]. Plazmon metamateriallarda kombinasiyalı səpilmə siqnalı lokal elektrik sahəsinin dördüncü dərəcəsi ilə mütənəsb olduğundan, metal nanoantennaların sahəni  $10^2-10^3$  dəfə gücləndirməyə imkan verdiyini nəzərə alsaq, Raman səpilmə siqnalının  $10^8$  dəfədən çox güclənəcəyini gözləmək olar [35]. Qeyd edək ki,  $\omega$  və  $\omega'$  tezlikli şüalar üçün müxtəlif udulma mühitləri ikifotonlu mexanizm üzrə həyəcanlandırmada müşahidə olunan hiperkombinasiyalı səpilmə üçün tipikdir. Lakin qeyri-

rezonans hiperkombinasiya səpilmə signalı adi səpilmə signallarına nisbətən çox zəifdir

Səpilmə işıq tezliyinin sürüşməsi kristalın məxsusi udulma zolağı yaxınlığında yaranan məcburi və spontan kombinasiyalı səpilmələrində də müşahidə oluna bilər [28]. Şək.5-də qranullaşdırılmış təbəqələrinin Raman spektrlərinin analogi tərkiblərin tozlarının Raman spektrlərinə nisbətən sürüşməsi təsvir olunmuşdur. Müxtəlif səpilmə zolaqları üçün sürüşmənin qiyməti fərqlidir (orta hesabla sürüşmə təxminən  $200\text{cm}^{-1}$ -dir). Bundan başqa, maksimal intensivlik  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  ferritinin Raman spektrində  $880\text{cm}^{-1}$  tezliyində müşahidə edilmişdir. [28] işinin müəlliflərinin göstərdiyi kimi, silisium təbəqəsinin Raman spektrinə nisbətən sürüşməsi, [18, 36] nəzəriyyəsinə uyğun olaraq təbəqələrin soyudulması prosesində yaranan gərginliklə ilə əlaqəlidir.

Maqnetitin B alt qəfəsində yüklərin lokalizasiyasının tədqiqi göstərdi ki [37-39], B-altqəfəsinin  $t_{2g}$  elektronları  $Fe^{2+}$  halında tamamilə lokallaşmayıb, 3 ion:  $Fe^{3+}$ -  $Fe^{2+}$ -  $Fe^{3+}$  trimeronu arasında paylanıb və  $d_{xy}$  enerjisi  $d_{yz}/d_{zx}$  enejisindən azdır. Trimeronun dörd Fe-O əlaqəsinin hamısının deformasiyası  $\Delta t_{2g}$  enerjisinin  $d_{xy}$  və  $d_{yz}/d_{zx}$  arasında effektiv bölünməsinə formalaşdırır. Beləliklə, xy müstəvisində deformasiya olunmuş Fe-O əlaqələri tetraqonal təhrifli  $Fe^{2+}O_6$ - oktaedrlərini trimeronun  $Fe^{3+}O_6$ - oktaedrləri ilə əlaqələndirir.  $Fe^{2+}O_6$ - oktaedrlərinin tetraqonal təhrifi  $t_{2g}$ -orbitallarının cırlaşmasını aradan qaldırır ( $O_h$  simmetriyasından  $D_{4h}$  simmetriyasına keçid). Spin-orbital əlaqəsi olmadıqda, xy müstəvisində Fe-O əlaqələrindən dördü dartılmış və ya sıxılmış olarsa, onda  $d_{xy}$  və  $d_{yz}/d_{zx}$  arasında  $\Delta t_{2g}$  paylanmanın effektiv enerjisi yaranar.



Şəkil 5. Qranullaşdırılmış  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x=0;0.25;0.4;0.5;0.6;0.75;1.0$ ) nazik təbəqələrinin (1);  $d=20\text{nm}$  ölçülü  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  nanotozlarının (2) və  $ZnFe_2O_4$  nanotozlarının (3) Raman spektrləri

[40,41] işinin müəllifləri, maqnetitin rentgen spektrlərində  $90\text{meV}$  intensiv maksimumlu qeyri-elastiki rezonans səpilməsinin müşahidə edildiyini və bu maksimuma uyğun  $FeL_3$ -kənarının fononların həyəcanlanmasından zəif asılı olduğunu təyin etdilər.

Qeyd edək ki,  $90\text{meV}$  mübadilə molekulyar sahəsində B-pozisiyalarının  $Fe^{3+}$  ionları üçün aparlan çoxsaylı hesablamalar göstərir ki,  $90\text{meV}$  həyəcanlanma enerjisi molekulyar sahə tərəfindən yaradılan  $100\text{meV}$  Zeeman parçalanmasına uyğundur [42]. Bu enerji spin-

flip prosesini, yəni maqnit faza keçidini xarakterizə edir və neytronların qeyri-elastik səpilməsi zamanı müşahidə olunan 80-85meV–da demək olar ki, dispersiyasız mod enerjisində uyğundur [42,43].

Maqnetitə aid [37] işinin nəticələri,  $Fe^{3+}O_6$  oktaedri ilə əlaqəli güclü təhrif olunmuş  $Fe^{2+}O_6$  oktaedrləri olan qranullaşdırılmış Ni-Zn ferrit nanotəbəqələri üçün də tətbiq oluna bilər. Aydındır ki, Raman spektrlərində müşahidə olunan  $880\text{sm}^{-1}$  ( $109\text{meV}$ ) intensiv maksimumu [37] modeli çərçivəsində izah oluna bilər. Yüksək intensivlikli  $880\text{sm}^{-1}$  ( $109\text{meV}$ ) maksimumunun Raman səpilmə spektrlərində müşahidəsi neytronların qeyri-elastik səpilməsinə dair tədqiqatlardan da müşahidə edilən  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  nanotəbəqələrində qeyri-dispersiya modlarının həyəcənlanmasının nəticəsidir. Bu isə Ni-Zn ferritlərində maqnit polyaronlarının olma ehtimalını göstərir[37].

Bu tədqiqatlarda güclü lazer impulsları (10ns) ilə şüalandırıldıqdan sonra  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  ferritin K8 tipli şüşə altlıq ilə aşkar edilmiş islatma effekti ərimiş ferrit və altlığın qarşılıqlı təsirini göstərir. Belə ki, bu zaman aralıq laylar yaranır. [1] işinə aid tədqiqatların nəticələri də göstərdiyi kimi ferrit və altlıq arasındakı qarşılıqlı təsir spinlərin düzülmə istiqamətinə və iri ferrit klasterlərinin formalaşmasına təsir edən xarici maqnit sahəsindən asılıdır. Bu isə öz növbəsində lüminensensiya və Raman spektrlərində intensiv maksimumların yaranmasına səbəb olur. Raman spektrlərindəki bu maksimumlar terahers tezliklidir. Bu nümunələrin terahers şüalanmanın əks olunma və buraxma rejimlərində tədqiqi böyük maraq kəsb edir.

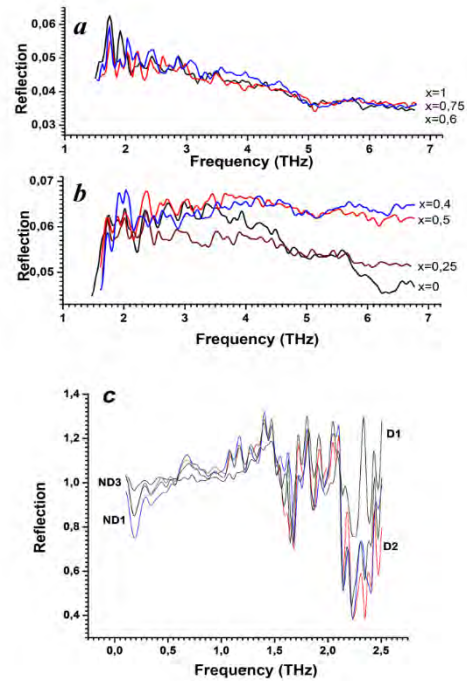
Təbii ki, PLD texnologiyası modifikasiya prosesində altlıq ilə birbaşa təmasda olan təbəqə layını dəyişmədən yalnız ferrit nazik təbəqəsinin səthə yaxın qatının əriməsinə səbəb ola bilər [28]. Nəticədə lüminensensiya və uyğun olaraq Raman spektrlərindəki müşahidə olunan zolaqların sürüşməsinin səbəbi, təbəqənin üst layının daha az sıxlığa və dartılmaya malik olmasıdır. Müşahidə olunan rezonansın intensivliyi  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ferritlərin tərkibindən asılıdır (Fig. 5) [17]. [44] işində qeyd olunduğu kimi,

[45] işinin müəlliflərinə görə, 2THz-ə qədər oblastlarda elektronların maqnit sahəsi ferrit nümunələrdə antiferromaqnit rezonansın yaranmasına səbəb ola bilər [46].  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ferritlərinin infraqırmızı diffuz əks olunma spektrlərində zəif intensivliyə malik səciyyəvi maksimumlar müşahidə olunmuşdur [44]. Şək.6.a, b  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  nanotozlarının müxtəlif tərkibləri üçün 1-7 THz diapazonda əks olunma spektrləri verilmişdir. Bu spektrlər müxtəlif vaxtlarda Belarus və Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutlarında əldə olunmuşdur.

[47]-dən məlum olduğu kimi, 0,4-2 THz aralığında  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ferritlərinin analoqu olan  $Fe_3O_4$ -maqnetitin udulma spektrində 0,24THz intervalı ilə 0,57-1,76 THz diapazonda zəif struktur müşahidə olunur. [48] işində bu struktur akustik fonon modlarına aid edilir. Bunlardan başqa, (0,57, 0,82, 1,05, 1,28 və 1,56 THs) piklərinin iki ardıcıl akustik fonon piklərinə (0,49 və 0,62; 0,74 və 0,86; 0,97və 1,08; 1,21 və 1,32;

1,45 və 1,55 THs) parçalanması haqqında [49] işində qeyd olunmuşdur.

İşdə, qranullaşdırılmış  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  nazik təbəqəsinin THz spektrlərində (0,343 və 0,483; 0,571 və 0,727; 0,815 və 0,967; 1,05 və 1,211; 1,288 və 1,444; 1,516 və 1,680; 1,763 və 1,955; 2,012 və 2,131; 2, 236THz) ardıcıl akustik modlara parçalanma müşahidə edilir. Bu nəticələrə əlavə olaraq, (0,876; 1,124; 1,352; 1,6; 1,87; 2,14THz) parçalanmaları da müşahidə edilmişdir. Akustik modların hər iki ardıcılığı  $\sim 0,24\text{THz}$  ( $0,9\text{meV}$ ) intervalına malikdir, qrup daxilində bölünmə ardıcılığı  $\sim 0,15\text{THz}$  ( $0,6\text{meV}$ ), qruplar arası bölünmə ardıcılığı isə  $\sim 0,08\text{THz}$  ( $0,33\text{meV}$ ) intervalı ilə baş verir. Bundan başqa, şək.7 a, b-də müxtəlif tərkiblərinin spektrlərində eyni təbiətli akustik modlar ardıcılığına malik olan ossilyasiya müşahidə edilir. Qranullaşdırılmış  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  ferrit nazik təbəqəsinin THs spektrlərindəki piklərinin vəziyyəti təbəqənin qalınlığından praktiki olaraq asılı deyildir. Bunun səbəbi isə qeyri-məhdud akustik fonon modlarıdır [47].

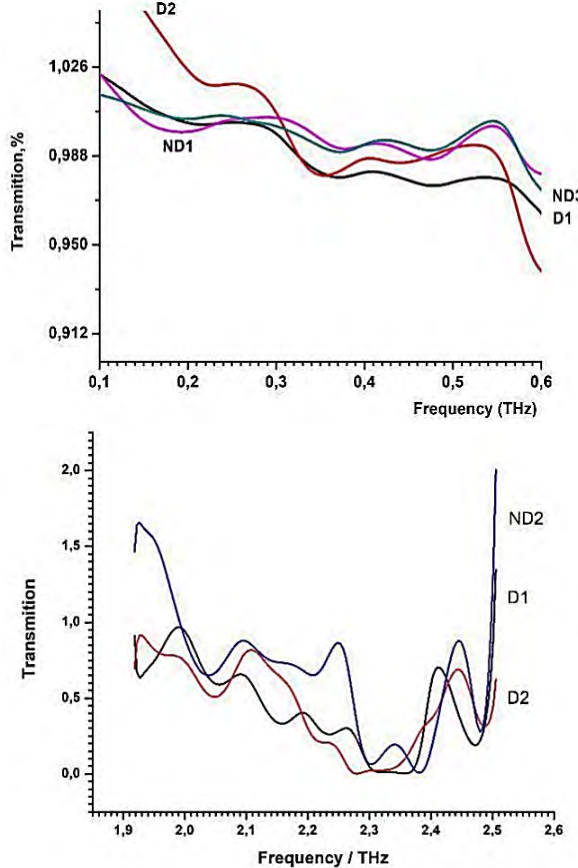


Şəkil.6. THz əks olunma spektrləri: a, b - 1-7THz diapazonda  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ferrit nanotozları; c. -0,2,5THz diapazonda qranullaşdırılmış  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  təbəqəsinin şək.3-də qeyd olunmuş hissələrindən

[49] işində göstərilmiş kimi, spinlərin nizamlı düzülüş səbəbi ilə 0,4-2THz diapazonda maqnetiddə elektromaqnit şüalarının udulması çox zəifdir. Belə ki, spinlərin yenidən orientasiya tezliyi maqnit nümunələrdə 0,02THz-dən böyük olmur [50]. Beləliklə demək olar ki, THz diapazonda elektromaqnit şüalarının udulma prosesi əsasən dielektrik itki ilə bağlı olur.

Şək.7-də THz diapazonda təbəqənin qeyd olunmuş hissələrinin buraxma spektrləri göstərilmişdir. Şəkildən görüldüyü kimi, akustik modlarla bağlı olaraq ossilyasiya müşahidə olunur. Spektrlərdən də

göründüyü kimi, bu intervalda buraxma spektrlərinin terahers sahənin tezliyindən asılılığı çox zəifdir. Terahers tədqiqatlarının nəticələrini [51] işinin nəticələri ilə müqayisə edərək, demək olar ki,  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  və ümumiyyətlə, Ni-Zn ferritlərinin bütün tərkiblərində müşahidə olunan effektlər bir-birinə çox yaxındır və bu effektlər  $Fe^{2+} \rightarrow O^{2-} \rightarrow Fe^{3+}$  tipli ifratmübadilə qarşılıqlı təsiri nəticəsində yaranır.



Şək.9.  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  təbəqəsinin THz-buraxma spektrləri

## NƏTİCƏLƏR

Şüşə (optik şüşə K8 və Schott AG firmasının istehsalı olan analoji şüşə BK7) altlıq üzərinə çəkilmiş  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  ferrit tozlarının submikron ölçülü hissəciklərinə impuls lazerlərinin təsiri ilə fəza modulyasiya olunmuş elektrik və maqnit profilli qranulaşdırılmış ferrit mikrostrukturunu əldə edilmişdir. Xarici sabit maqnit sahəsində ~10ns uzunluqlu lazer impulslarının təsiri ilə submikron hissəcikli konqlomeratlar əriyir və onlar birləşərək damcışəkilli klasterlər yaradır. Bu işə şüşə altlığın ferrit ilə islatma prosesini göstərir. Bu prosesə domen və xarici maqnit sahəsinin qarşılıqlı orientasiyasının rolu müəyyənləşdirilmişdir. Makrostrukturun müəyyən həndəsi ölçülərində yadılan ferrit mikrostrukturuları xüsusi fəza modulyasiyalı maqnit və elektrik profillərinə malik olurlar.

Modifikasiya olunmuş Ni-Zn ferrit nazik təbəqələrinin ikifotonlu mexanizm üzrə həyəcanlandırmaqla 600nm maksimumlu lüminensensiya müşahidə edilmişdir. Terahers tədqiqatlarından əldə etdiyimiz nəticələrin [44] işinin nəticələri ilə müqayisəsi, Ni-Zn ferritlərinə  $Fe^{2+} \rightarrow O^{2-} \rightarrow Fe^{3+}$  tipli ifratmübadilə qarşılıqlı təsirinə mövcudluğunu və bu ferritlərin bütün tərkiblərində trimeron düzülüşün mümkünlüyünü göstərdi.

## MİNNƏTDARLIQ

Bu iş Qrant № EIF-BGM-3-BRFTF-2+/2017-15/04/1-M-02 Azərbaycan Respublikası Prezidenti yanında Elmin İnkişafı Fondunun maliyyə dəstəyi ilə həyata keçirilmişdir.

İşin ərsəyə gəlməsində dəyərli məsləhətlərinə və köməkliyinə görə f.-r.e.d. T.R.Mehdiyevə dərin təşəkkürümü bildirirəm.

- [1]. Chien C.L. Magnetism and Giant Magneto-Transport Properties in Granular Solids. Ann. Rev. Mater. Sci. 25:129-160, 1995
- [2]. De Albuquerque A.S., Ardisson J.D., Bittencourt E., de Almeida Macedo W.A. Structure and Magnetic Properties of Granular NiZn-Ferrite - SiO<sub>2</sub>. Mater. Res. 2: 235, 1992
- [3]. Agashkov A.V., Bushuk B.A., Varaneckiy A.M., Mehdiyev T.R. Method for obtaining ferrite microstructures with spatially modulated magnetic and electric profiles. Proc. XII ISTC, Minsk: 244-245, 2019
- [4]. A.B. Rinkevich, A.V. Korolev, M.İ. Samoylovich S.M. Klshcheva, D.V. Perov, Magnetic properties of 3D nanocomposites consisting of an opal matrix with embedded spinel ferrite particles. Technical Physics. 61:194-201, 2016
- [5]. Dobrovickiy V.V., Zvezdin A.K., Popov A.F. Giant magnetoresistance, spin-reorientation transitions and macroscopic quantum phenomena in magnetic nanostructures Phys. Usp. 39:4, 407-414, 1996
- [6]. Sherstnev I.A. Electronic transport and magnetic structure of nanosized ferromagnetic materials systems. PhD Dissertation, P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, 2014
- [7]. Neel L. Saturation De Certains Ferrites Rendus.230: 190-192, 1950
- [8]. E.W. Gorter Philips Research Reports 9, Eindhoven, Netherland, 1954
- [9]. Belov K P. Ferrimagnets with a 'weak' magnetic sublattice. Phys. Usp. 39: 623-634, 1996
- [10]. Komlev A.S. Radiation-thermal sintering in a beam of fast electrons of polycrystalline ferrosinels, PhD Dissertation, University of Moscow, 2018
- [11]. D. Stauffer, A. Aharony Introduction to Percolation Theory, Taylor & Francis, London, 2018
- [12]. Neimark A.V. Electrophysical properties of a percolation layer of finite thickness.. Sov. Phys. JETP 71:341-349, 1990

- [13]. *Xiao G., Liou S., Levy A., Taylor J., Chien C.L.*, Magnetic relaxation in Fe-(SiO<sub>2</sub>) granular films. *Phys. Rev. B* 34: 7573, 1986
- [14]. *Shull R.D., Ritter J.J., Swatzendruber L.J.* Change in magnetic state of Fe<sup>3+</sup>silica gel nanocomposites due to low temperature treatment in ammonia. *J. Appl. Phys.* 69: 5144, 1991
- [15]. *Estournes C., Lutz T., Happich J., Quaranta T., Wissler P., Guill J.* Nickel nanoparticles in silica gel: Preparation and magnetic properties. *J. Magn. Mater.* 173: 83-92, 1997
- [16]. *L. Zhang, G.C. Papaefthymiou, R.F. Ziolo, and J.Y. Ying* Novel  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> Magnetic Nanocomposites via Sol-Gel Matrix-Mediated Synthesis. *Nanostr. Mater.* 9: 185-188, 1997
- [17]. *Malyukov S.P.* Physico-technological foundations of creating magnetic heads for high-density information recording, Dissertation Doctor of Technical Sciences, Taganrog. 2003
- [18]. *A.E. Muslimov, A.V. Butashin, V.M. Kanevskiy* The Influence of Mechanical Stresses on the Magnetic Properties of NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Films. *Technical Physics Letters* 44: 730-734, 2018
- [19]. *Patange, S.M., Shirsath, S.E., Jadhav, S.P., Hogade, V.S., Kamble, S.R., Jadhav K.M.* Elastic properties of nanocrystalline aluminum substituted nickel ferrites prepared by coprecipitation method. *Journal of Molecular Structure* 1038: 40-44, 2013
- [20]. *Caltun O.F.* Pulsed laser deposition of Ni-Zn ferrite thin films, *J. Optoelectron. Adv. Mater.* 7: 739-744, 2005
- [21]. *Adriana Silva de Albuquerque, José Domingos Ardisson, Edison Bittencourt, Waldemar Augusto de Almeida Macedo.* Crystal and Magnetic Structures of Granular Powder Spinel Mn-Zn and Ni-Zn Ferrites. *Phys. Solid State* 60: 1727-1732, 2018
- [22]. *Aliyeva Sh., Babayev S., Mehdiyev T.* Raman spectra of Ni<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanopowders. *JRS* 49: 271-278, 2018
- [23]. *Klishin A.P., Rudnev S.V., Vereshagin V.I., Andrienko O.S.* Features of the formation of nano- and microstructures of powders and monolithic samples of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> when firing without imposing and with imposing an electromagnetic field. *Letters of Higher Educational Institutions. Physics* 58: 106-110, 2015
- [24]. *Agashkov A.V.* Laser microscope with submicron resolution. *Non-destructive testing and diagnostics* 1: 17-24, 2015
- [25]. *Sadigova A.A., Aliyeva Sh.N., Ahmadova Sh.A., Yusibova I.F., Naghiyev T.G., Mehdiyev T.R.* Optical UV-VIS luminescence spectra of Ni<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanopowders. *AJP Fizika* XXV: 25-30, 2019
- [26]. *Aliyeva Sh., Mehdiyev T.* Peculiarities of magnetic interaction in Ni<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. *European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences*: 76-82, 2017
- [27]. *Aliyeva Sh., Mehdiyev T.* Peculiarities of magnetic interaction in Ni<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanodimensional ferrites., *Smart Nanocomposites*. 8: 149-153, 2017
- [28]. *Sushinskiy M.M.* Resonant inelastic light scattering in crystals. *Phys. Usp.* 154: 353-379, 1988
- [29]. *Gagan Dixit, J.P. Singh, R.C. Srivastava, H.M. Agrawal, R.J. Chaudhary* Structural, Magnetic And Optical Studies Of nickel Ferrite Thin Films. *Adv. Mat. Lett.* 3: 21-28, 2012
- [30]. *Baryaxtar V.G., Ivanov B.A., Golubeva O.N.* Phenomenological theory of relaxation in two-sublattice ferrite. *Ukr. J. Phys.* 58: 1149-1155, 2013
- [31]. *V.V. Ustinov, A.B. Rinkevich, D.V. Perov, A.M. Burkhanov, M.I. Samoylovich, S.M. Klshcheva, E. A. Kuznetsova* Giant Antiresonance in Electromagnetic Wave Reflection from a 3D Structure with Ferrite Spinel Nanoparticles. *Technical Physics* 83: 104-112, 2013
- [32]. *Martin Moskovits* Surface-enhanced spectroscopy. *Rev. Mod. Phys.* 57: 783, 1985
- [33]. *F. Brouers, S. Blacher, A.N. Lagarkov, A.K. Sarychev, P. Gadenne, V.M. Shalaev* Theory of giant Raman scattering from semicontinuous metal films. *Phys. Rev. B*. 55: 13234, 1997
- [34]. *M.A. Noginov, G. Dewar, M.W. McCall, N.I. Zheludev* *Tutorials in Complex Photonic Media*: SPIE Publications, Washington, 2009
- [35]. *Sarychev A.K., Shalaev V.M.* *Electrodynamics of Metamaterials*: World Scientific Publisher, Singapore, 2007
- [36]. *Englert T., Abstreiter G., Pontchartral N.* Determination of existing stress in silicon films on sapphire substrate using Raman spectroscopy. *Sol. State Electron.* 23: 31-33, 1980
- [37]. *H. Y. Huang, Z. Y. Chen, R.-P. Wang, F. M. F. de Groot, W. B. Wu, J. Okamoto, A. Chainani, J.-S. Zhou, H.-T. Jeng, G. Y. Guo, Je-Geun Park, L. H. Tjeng, C. T. Chen, D. J. Huang* Jahn-Teller distortion driven magnetic polarons in magnetite. *Nat. Commun.* 8: 15929, 2017
- [38]. *Senn M. S., Wright J. P. & Atfield, J. P.* Charge order and three-site distortions in the Verwey structure of magnetite. *Nature* 481: 173-176, 2012
- [39]. *Mark S. Senn, Jon P. Wright, James Cumby, and J. Paul Atfield* Charge localization in the Verwey structure of magnetite. *Phys. Rev. B* 92: 024104, 2015
- [40]. *L.V. Gasparov, D.B. Tanner, D.B. Romero, H. Berger, G. Margaritondo, and L. Forró.* Infrared and Raman studies of the Verwey transition in magnetite. *Phys. Rev. B* 62: 7939-7944. 2000
- [41]. *Gasparov, L. V. and Arenas D.* Magnetite: Raman study of the high-pressure and low temperature effects. *J. Appl. Phys.* 97: 10A922, 2005
- [42]. *McQueeney R.J., Yethiraj M., Montfrooij W., Gardner J.S., Metcalf P., Honig J.M.*



- Investigation of the presence of charge order in magnetite by measurement of the spin wave spectrum. Phys. Rev. B 73: 174409, 2006
- [43]. *Subi'as, G., Garc'ia, J. & Blasco, J.* EXAFS spectroscopic analysis of the Verwey transition in  $Fe_3O_4$ . Phys. Rev. B 71: 155103, 2005 <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.155103>
- [44]. *Alieva Sh. N., Kerimova A. M., Abdullaev R. B., Mekhtiev T.R.* Infrared diffuse reflectance spectra of micropowders of  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ferrites. Physics of the Solid State. 59:543-549, 2017
- [45]. *Jadhav Santosh S., Shirsath Sagar E., Toksha B.G., Shukla S.J. and Jadhav K.M.* Effect of Cation Proportion on the Structural and Magnetic Properties of Ni-Zn Ferrites Nano-Size Particles Prepared By Co-Precipitation Technique. Chin. J. Chem. Phys. 21: 381-386, 2008
- [46]. *Z. Rezay Marand, M. Helmy Radhid Farimani, N. Shahtahmasebi* Study of magnetic and structural and optical properties of Zn doped  $Fe_3O_4$  nanoparticles synthesized by co-precipitation method for biomedical application. Nanomedicine J.1:238-247, 2014
- [47]. *Samuelsen E.J., Steinsvoll O.* Low-Energy Phonons in Magnetite. Phys. Status Solidi B61:615-620, 1974
- [48]. *Baker W.E.* Axisymmetric modes of vibration of thin spherical shell J. Acoust. Soc. Am. 33:1749-1758, 1961
- [49]. *Rupali Rakshit, Debasish Sarkar, Monalisa Pal, Kazunori Serite, Masayoshi Tonouchi and Kalyan Mandal,* Acoustic vibration induced high electromagnetic responses of  $Fe_3O_4$  nano-hollow spheres in the THz regime, J. Phys. D: Appl. Phys. 48: 245301-24538, 2015
- [50]. *Draine, B. T.; Lazarian, A.* Magnetic Dipole Microwave Emission from Dust Grains. Astrophys. J. 512:740-754, 1999
- [51]. *Edoardo Baldini, Carina A. Belvin, Martin Rodriguez-Vega, Ilkem Ozge Ozel, Dominik Legut, Andrzej Kozłowski, Andrzej M. Oleś, Krzysztof Parlinski, Przemysław Piekarczyk, José Lorenzana, Gregory A. Fiete & Nuh Gedik* Discovery of the soft electronic modes of the trimeron order in magnetite. Nature Physics 16: 541-545, 2020

Sh.N.Aliyeva

#### THE OPTICAL PROPERTIES OF GRANULATED $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ NANOFILMS

Granular  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  nanofilms on the glass substrate are obtained by melting submicron ferrimagnetic particles with a laser radiation. It is established that, the magnitude and mutual orientation of external magnetic and domain fields accelerate the melting of particles, their unification into drops, the flat "bottoms" of which indicate good wetting of the glass substrate. In the obtained films, the shapes of the granules are not spherical, the average distance between the granules is in the order of their sizes, and thus, it is possible to observe giant magneto-transport properties in films. In a system of single-domain particles, all magnetic moments are coaxial and rotate synchronously with the external field as one giant moment, which leads to the appearance of extreme ferromagnetic characteristics. Thus, it is obvious that the created ferrite converters, due to the chosen geometry of the macrostructure, will have specific spatially modulated magnetic and electrical profiles. The investigated luminescence spectra of  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  nanofilms with one and two-photon excitation confirmed that the nature of the appearance of a strong maximum at  $880\text{ cm}^{-1}$  is associated with the ordering of granules in the nanofilm structure in such a way that all their magnetic moments are coaxial and rotate synchronously with the external field. An analysis of the THz reflection and transmission spectra of nanofilms indicated the presence of a split sequence of acoustic phonon modes, similar to those found in magnetite films, a structural analogue of  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$ .

Ш.Н.Алиева

#### ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРАНУЛИРОВАННЫХ $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ НАНОПЛЕНОК

Гранулированные нанопленки  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  на поверхности стеклянной подложки получены расплавлением субмикронных частиц ферритмагнетика излучением лазера. Установлено, что величина и взаимориентация внешнего магнитного и доменного полей позволяет ускорить плавление и объединение конгломератов частиц в капли, плоские «подошвы» которых свидетельствуют о хорошем смачивании поверхности стеклянной подложки. В полученных пленках формы гранул не сферические, среднее расстояние между гранулами порядка их размеров и, таким образом, становится вероятным наблюдение в полученных нанопленках гигантских магнето-транспортных свойств и экстремальных ферромагнитных характеристик. Таким образом, создаваемые ферритовые преобразователи, в силу выбранной геометрии макроструктуры, будут обладать специфическими пространственно модулированными магнитными и электрическими профилями. Исследованные спектры люминесценции нанопленок  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$  с одно и двухфотонным возбуждением подтвердили, что природа возникновения сильного максимума на  $880\text{ см}^{-1}$  связана с упорядочением гранул в структуре нанопленки таким образом, что все их магнитные моменты соосны и вращаются синхронно с внешним полем. Анализ ТГц-спектров отражения и пропускания нанопленок подтвердил наличие расщепленной последовательности акустических фононных мод, подобно обнаруженным в пленках магнетита – структурном аналоге  $Ni_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$ .

*Qəbul olunma tarixi: 28.10.2020*