

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

Əlyazması hüququnda

ƏLİZADƏ RASİM ƏHMƏD OĞLU

NANOMAQNƏTİTLƏRDƏN TƏŞKİL OLUNMUŞ
DİSPERS SİSTEMİN FİZİKİ XASSƏLƏRİ

2220.01 - Yarımkəçiricilər fizikası

Fizika üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi
almaq üçün təqdim olunmuş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

BAKI - 2015

İş Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının akademik H.B.Abdullayev adına Fizika İnstitutunda yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbər:

AMEA-nın müxbir üzvü, f.-r.e.d.

R.R.Hüseynov

Rəsmi opponentlər:

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, prof.

H.S.Orucov

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, prof.

S.R.Fıqarova

Aparıcı təşkilat:

AMEA-nın Radiasiya Problemləri İnstitutu
(“Polimerlərin və Elektroaktiv Kompozit
Materialların Radiasiya Fizikası”
laboratoriyası)

Dissertasiyanın müdafiəsi «_30_»_12_2015-cı il saat 11⁰⁰-da Azərbaycan MEA akademik H.M.Abdullayev adına Fizika İnstitutunun nəzdindəki D.01.011 Dissertasiya Şurasında keçiriləcək.

Ünvan: Bakı, Az-1143, pr. H.Cavid 131; faks: (99412)5372292;
E-mail: director@physics.ab.az

Dissertasiya ilə Azərbaycan MEA akademik H.B.Abdullayev adına Fizika İnstitutunun kitabxanasında tanış olmaq olar.

Avtoreferat «_____»_2015-cı ildə göndərilmişdir.

Dissertasiya Şurasının elmi
katibi, f.-r.e.d., prof.

D.H.Arashlı

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı. Nanoölçülü materialların elmi tədqiqinə və praktiki tətbiqinə böyük maraq onlarda yeni ölçü effektlərini tapmaq, massiv metalların xassələrini kəskin dəyişdirmək və yeni nanomateriallar yaratmaq ilə əlaqədardır. Ölçülərin kiçilməsi metalın səth və həcm atomlarının (molekullarının) sayının təqribən eyni olmasına (10 nm ölçülü metalda onun bütün atomlarının 30%-i səthdə yerləşir) və bu da səthin rolunun kəskin artmasına gətirir. Nanoölçülü materiallarda əmələ gələn spesifik effektlər onun ölçülərinin hər hansı fiziki prosesin xarakterik şkalası (elektronun sərbəst yolu, ifrat keçiricilərdə kohorentliyin uzunluğu, elastiki rəqslərin dalğa uzunluğu, maqnit domenin ölçüsü və s.) tərtibində və ya ondan kiçik olması ilə əlaqədardır.

Nanoölçülü metallar arasında nanomaqnetidlərə daha çox elmi və praktiki maraq onlarda yüksək elektrik və maqnit xassələrinin bir yerdə cəmlənməsidir. Bu mühitlər bir çox unikal fiziki xassələrə: superparamaqnit, yüksək maqnit qavrayıcılığı, maqnitləşmənin böyük doyma qiyməti, qıqant maqnit müqaviməti və onun böyük intervalda dəyişməsi, yaxşı maqnit-optik və s. malikdirlər. Nanomaqnetidlərdən təşkil olunmuş mühitlər superparamaqnit xassəli olduğundan onları maqnitləşdirdikdən sonra maqnitsizləşdirmək üçün bir daha maqnit sahəsinə daxil etmək vacib deyil, bu texnoloji prosesləri (maddələrin daşınmasını, katalitik reaksiyaların aparılmasını, mühitin maqnit nüfuzluğunun dəyişdirilməsini və s.) asanlaşdırır. Bu mühitlərin unikal xassələrini istifadə edərək maqnit sensorları, maqnit daşıyıcıları, optik cihazları, mikrodalğalı örtüklər, ferromayələr, maqnit soyutma elementləri, informasiyanı yüksək sıxlıqla yadda saxlaya bilən kvantlanmış maqnit diskləri yaradılmışdır.

Polimer matrisa və nanomaqnetidlərdən təşkil olunmuş mühitlərin nanomaqnetidlər daxil edilmiş maye (üzvi, qeyri-üzvi) mühitlərə nəzərən bir çox üstünlükləri vardır. Polimer matrisaya daxil edilmiş nanomaqnetidlər individual haldadır, onlar stabilləşmiş, onların sonrakı koaqulyasiyası və oksidləşməsi mümkün deyildir. Bu zaman nanomaqnetidlər uzun müddət öz fiziki, kimyəvi xassələrini dəyişməz saxlayırlar. Polimer matrisa nanomaqnetidlər ansamblının strukturunu: nanomaqnetidlərin ölçülərə görə paylanmasını, hissəciklər arasında məsafəni (qarşılıqlı təsiri: elektrik və maqnit dipol-dipol və s.), hissəciklərin formasını, matrisada yerləşməsi

ardıcılığını təyin edir, polyar, qeyri-polyar polimer matrisa olmaqla nanokompozitin xassəsinə təsir edir.

Nanomaqnetitlərin ölçülərə görə paylanmasının simmeterik, böyük və ya kiçik ölçülərə tərəf mailli olmasından asılı olaraq nanomühitin bir çox xassələrinin (başlanğıc maqnit qavrayıcılığı, maqnitləşmənin doyma qiyməti, dielektrik nufuzluğu, relaksasiya müddəti, səpilmənin intensivliyi və s.) qiyməti dəyişir. Bu baxımdan nanokompozitin fiziki xassələrinin tədqiqi zamanı nanomaqnetitlərin ölçülərə görə paylanmasını, onların konsentrasiyasını (qarşılıqlı təsirdə olub-olmamasını), nanohissəciklərin elektrik, maqnit xassələrini nəzərə almaq vacibdir.

İşin əsas məqsədi nanomaqnetitlərdən təşkil olunmuş dispers sistemin fiziki xassələrini tədqiq etməkdir.

Bu məqsədə çatmaq üçün aşağıdakı məsələlər həll olunmuşdur:

1. Kimyəvi çökdürmə metodu ilə alınmış nanomaqnetitlərin həndəsi ölçülərə görə paylanma funksiyası təyin edilmişdir;
2. Nanomaqnetitlərin alınma mexanizmi onların ölçülərə görə paylanma funksiyası əsasında təyin edilmişdir;
3. Nanomaqnetitlərin alınması zamanı onların səthində yaranan qeyri-maqnetit maddənin qalınlığı və nanomaqnetitlərin maqnit ölçülərə görə paylanması tədqiq edilmişdir;
4. Zəif maqnit dipol-dipol qarşılıqlı təsirdə olan nanomaqnetit mühitin magnitləşməsi tədqiq edilmişdir;
5. Nanomaqnetit mühitin dielektrik nufuzluğu sabit, dəyişən elektrik sahəsində və maqnit sahəsinin dielektrik nufuzluğuna təsiri tədqiq edilmişdir.

Elmi yenilik. İlk dəfə olaraq aşağıdakı işlər görülmüşdür:

1. Nanomaqnetitlərin ölçülərə görə paylanmasını dəqiq xarakterizə edən diskret paylanma funksiyası təyin edilmiş, analitik paylanma funksiyası isə 2 funksiyanın (normal və logarifmik-normal) kombinasiyası şəklində göstərilmişdir;
2. Nanomaqnetitlərin ölçülərə görə paylanma funksiyasının analizi əsasında onların alınmasında iki mərhələnin (I - maqnetit molekullarının kristallaşma mərkəzinə birləşməsi; II - alınmış kiçik hissəciklərin kritik ölçüyə çatdığı zaman onların parçalanması və birləşməsi) olması tapılmışdır. Nanomaqnetitlərin alınmasının I-ci mərhələsi kinetik tənliklə təsvir olunmuş, alınmış paylanma funksiyasının nanomaqnetitlər üçün daha əvvəl tapılmış ölçülərə görə normal paylanma funksiyasına uyğun gəldiyi göstərilmişdir;

3. Nanomaqnetitin səthində qeyri-maqnetit maddənin olduğu və onun əmələ gəlmə mexanizmi təyin olunmuşdur. Qeyri-maqnetit maddənin alınma kinetikası və onun qalınlığının nanomaqnetitin ölçüsündən, mühitin xassələrindən asılılığı tədqiq edilmişdir. Nanomaqnetitlərin qeyri-maqnetit maddənin qalınlığına görə paylanma funksiyası təyin olunmuşdur;
4. Zəif maqnit dipol-dipol qarşılıqlı təsirin maqnit sahəsinin kiçik qiymətlərində nanomaqnetit mühitin maqnitləşməsinə böyük əlavə verdiyi göstərilmiş və bu Lanjeven tənliyində nəzərə alınmışdır;
5. Polimer matrisa və nanomaqnetitlərdən təşkil olunmuş mühitin dielektrik nüfuzluğu sabit elektrik, elektromaqnit sahəsində və maqnit sahəsinin dielektrik nüfuzluğuna təsiri tədqiq edilmişdir. Dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsinin elektromaqnit dalğasının tezliyindən asılılığı sistemin fraktal quruluşa malik olduğunu göstərmişdir. Nanomaqnetitlərin dielektik relaksasiya müddətinə görə paylanması müəyyənləşdirilmişdir.

Elmi və praktiki əhəmiyyəti. Dissertasiya işinin nəticələrindən olan nanomaqnetitlərin ölçülərə görə paylanmasını nanomaqnetitlərin alınma mexanizminin təyininə və əvvəlcədən verilmiş parametrlə paylanmaya malik nanomaqnetitlərin alınması texnologiyasında istifadə etmək olar. Nanomaqnetitlərin ölçülərə görə paylanma funksiyasını nanomaqnetitlərdən təşkil olunmuş mühitin fiziki parametrlərinin (maqnitləşmə, dinamik lazer səpilmənin intensivliyi, akustik udulma, dielektrik nüfuzluğu və s.) statistik ortalama ilə hesablaşmaqda istifadə etmək mümkündür. Nanomaqnetitlərin morfoloqiyasının təyini əsasında böyük maqnit momentinə malik nanomaqnetitlərin alınmasını təmin etmək olar. Nanokompozitin dielektrik nüfuzluğunun təyini əsasında böyük dielektrik nüfuzluğuna malik maqnit xassəli nanokompozit materialların yaradılması texnologiyasını təyin etmək olar.

Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:

1. Kimyəvi çökdürmə metodu ilə alınmış nanomaqnetitlərin ölçülərə görə paylanması asimmetrik və böyük ölçülərə tərəf maillidir. Paylanmanı normal və logarifmik-normal funksiyaların kombinasiyası şəklində göstərmək olar və onun vasitəsi ilə hesablanmış nanomaqnetit mühitin parametrlərinin (momentlər, maqnitləşmə, dielektrik nüfuzluğu) qiymətləri təcrübədən alınmış qiymətlərə yaxındırlar;
2. Nanomaqnetitlərin kimyəvi çökdürmə metodu ilə alınması prosesi iki mərhələlidir. 1-ci mərhələdə maqnetit molekullarının kristallaşma mərkəzlərinə birləşməsi, 2-ci mərhələdə alınmış hissəciklərin

parçalanması və bir-biri ilə birləşməsi baş verir. 1-ci mərhələdən 2-ciyə keçid üçün nanomaqnetitlər müəyyən ölçüyə malik olmalıdır. 1-ci mərhələdə nanomaqnetitin ölçülərə görə paylanmasını normal funksiya ilə təsvir etmək mümkündür;

3. Nanomaqnetitin alınması zamanı ətraf mühitin (reagentin) molekullarının ona diffuziyası nəticəsində onun səthində qeyri-maqnetit maddə əmələ gəlir. Qeyri-maqnetit maddənin qalınlığı nanomaqnetitin ölçüsündən asılıdır və $x = k \cdot r_0$ ifadəsi ilə təyin oluna bilər;
4. Nanomaqnetit mühitin maqnitləşməsi "paralel" mexanizm ilə baş verir. Maqnit sahəsinin kiçik qiymətlərində maqnit dipol-dipol qarşılıqlı təsirin nanomaqnetit mühitin maqnitləşməsinə əlavəsi böyükdür və $mH/kT = 1,57$ qiymətində onun qiyməti maksimumdur;
5. Polimer matrisa və nanomaqnetitlərdən təşkil olunmuş mühitin dielektrik nüfuzluğu nanomaqnetitin elektrik dipol momentinin qiymətindən, mühiddəki konsentrasiyasından və maqnit sahəsindən asılıdır.

İşin aprobeşiyası. İşin əsas nəticələri və müddəaları Workshop on Nanostructured Magnetic Materials and their applications, NMMA (Gebze, Turkey 2001, 2003), International conference on Nanostructured Advanced Magnetic Materials (Irsee, Germany, 2002), Light in Nanosize Solids, I International Scientific Seminar (Bakı 2004), International Conference on Superconductivity and Magnetism (Antalya, Turkey, 2008, 2012) və AMEA -nın Fizika İnstitutunun ümumi, İnnovasiya sektorunun və laboratoriyalar arası elmi seminarlarında məruzə edilmişdir.

Nəşrlər: Dissertasiya işinin mövzusu ilə əlaqədar 16 iş çap olunmuşdur (bunlardan 7 iş tezislərdir). 9 məqalə AAK-ın siyahısında olub rəçenziya olunan jurnallarda dərc olunmuşdur.

Dissertasiyanın həcmi və strukturu. Dissertasiya işi giriş, 5 fəsil, nəticələr və ədəbiyyat siyahısından ibarətdir. Dissertasiyanın məzmunu 83 ədəd şəkil, 14 ədəd cədvəl və 200 bibliografiya daxil olmaqla 173 səhifədən ibarətdir.

DİSSERTASIYANIN QISA MƏZMUNU

Girişdə mövzunun aktuallığı əsaslandırılmış, dissertasiya işinin məqsədi və həll ediləcək məsələlər müəyyən edilmişdir. Elmi yeniliklər və dissertasiyanın praktiki əhəmiyyəti həmçinin müdafiəyə çıxarılan əsas nəticələr verilmişdir. Dissertasiyanın məzmunu qısa şərh edilmişdir.

Birinci fəsilə metal nanohissəciklərin ölçülərə görə paylanma funksiyası və təyini metodları, metal nanohissəciklərin və onların əsasında təşkil olunmuş dispers sistemlərin termodinamik parametrləri (ərimə temperaturu, istilik keçirmə, entalpiya və s.), Lindman kriteriyası, fonon spektri, Lemb dalğaları haqqında olan ədəbiyyatın icmalı verilmişdir. Nanomaqnetit əsaslı nanokompozitlərin elektrik keçiriciliyi, qiçant maqnit müqaviməti, maqnitləşməsi və onların baş vermə mexanizmləri: sıçrayışlı keçiricilik, elektronların nanomaqnetitlərin maqnit momentlərindən səpilməsi və bir domenli nanomaqnetitlərin maqnitləşməsi haqqında məlumat verilmişdir. Ədəbiyyatın icmalının sonunda dissertasiyanın mövzusunun aktuallığı və qarşıya qoyulan məsələlər qeyd olunmuşdur.

İkinci fəsilə nanomaqnetitlərin ölçülərə görə diskret (histoqram) və analitik paylanma funksiyası təyin olunmuşdur. Histoqram paylanmasının bölgülərinin sayı nanomaqnetitlərin bu bölgülərdə paylanma ehtimallarının tezliklər cədvəlinə ən yaxını $(\delta = \left(\sum_i (F_i - P_i)^2 \right)^{1/2})$ ilə hesablanmış

seçilməklə təyin edilmişdir.

Histoqram vasitəsi ilə hesablanmış momentlər əsasında paylanma funksiyası qurulmuşdur. Paylanmanı dəqiq təsvir edəcək analitik funksiya normal (f_N), loqarifmik-normal (f_{LN}), modifikə olunmuş loqarifmik-normal (f_{LN_MOD}), χ^2 (f_{χ^2}), qamma (f_γ), beta (f_δ), III tip Pirson (f_{P-III}), normal və loqarifmik-normal funksiyaların kombinasiyasından alınmış (f_{N_LN}), momentlər əsasında qurulmuş funksiya (f_{MMNT}) arasında seçilmişdir. Cədvəl 1-də orta ölçüsü 10,24 (I); 9,48 (II); 7,76 (III); 7,33 (IV); 5,48 (V) və 4,82 (VI) nm olan nanomaqnetitlərin paylanmasını təsvir edə biləcək yuxarıda qeyd olunan funksiyaların tezliklər cədvəlinə yaxınlığı (δ) verilmişdir. Cədvəl 1-dən görüldüyü kimi əsasən normal və loqarifmik-normal funksiyaları tezliklər cədvəlinə daha yaxındırlar.

Cədvəl 1.

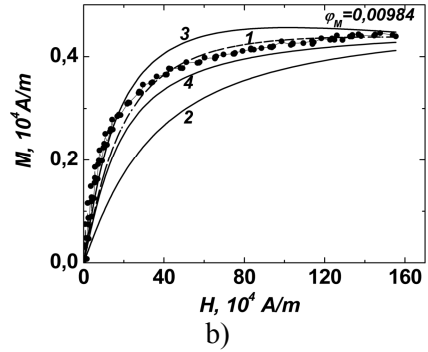
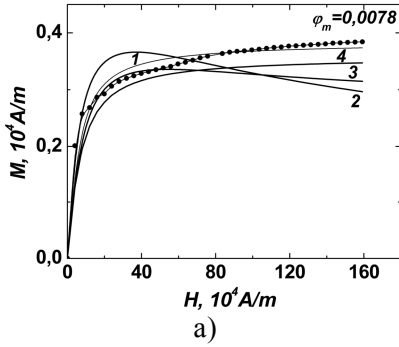
Funksiya	δ	Nümunə					
		I	II	III	IV	V	VI
f_N		0,107	0,637	0,192	0,324	0,842	0,889
f_{LN}		0,164	0,716	0,23	0,36	0,93	1,047
f_{LN_MOD}		1,048	1,315	1,001	1,277	0,667	0,676
$f_{\gamma 2}$		0,968	1,209	0,717	0,961	0,934	0,617
f_{γ}		1,477	1,311	1,293	0,988	1,636	1,55
f_{δ}		0,151	0,216	0,317	0,585	0,978	1,113
f_{P-III}		0,168	0,543	0,078	0,075	0,939	-
f_{MMNT}		0,986	0,961	0,92	0,8	1,65	1,82
f_{N_LN}		0,109	0,639	0,178	0,131	0,867	0,997

Buna əsasən normal və loqarifmik-normal funksiyalardan ibarət kombinə edilmiş funksiya (f_{N_LN}) qurulmuşdur:

$$f_{N_LN}(x) = \begin{cases} f_N(x) & \text{burada } x \leq x_{\text{keçid}} \\ f_{LN}(x) & \text{burada } x > x_{\text{keçid}} \end{cases}$$

Keçid diametrinin ($x_{\text{keçid}}$) qiyməti normal və loqarifmik-normal funksiyaların $F_N(x) = F_{LN}(x)$ şərtindən tapılmışdır. Orta ölçüsü 10,2; 9,48; 7,76; 7,33; 5,48; və 4,23 nm olan nanomaqnetitlərdən təşkil olunmuş nümunələr üçün keçid diametrinin qiymətləri uyğun olaraq 10,6; 9,3; 7,5; 7,2; 5,4; və 3,4 nm tapılmışdır. Cədvəl 1-dən görüldüyü kimi nanomaqnetitlərin ölçülərə görə paylanması normal və loqarifmik-normal funksiyalardan ibarət kombinə edilmiş funksiya ilə daha dəqiq təsvir olunur.

Şəkil 1(a,b)-də orta ölçüsü 7,33 (a) və 5,48 (b) nm olan nanomaqnetitlərdən təşkil olunmuş mühitlərin təcrübi (•) alınmış və tezliklər cədvəli (1), normal (2), loqarifmik-normal (3) və kombinə edilmiş (4) funksiyalar vasitəsi ilə hesablanmış maqnitləşmə əyriləri verilmişdir. Görüldüyü kimi analitik funksiyalar arasında kombinə edilmiş funksiya vasitəsi ilə hesablanmış maqnitləşmə əyrisi təcrübi alınmış maqnitləşmə əyrisinə daha yaxındır.



Şək.1(a,b)

Beləliklə aparılmış tədqiqatlar göstərdi ki, paylanmanın başlanğıc hissəsi normal funksiya, sonu loqarifmik-normal funksiya ilə dəqiq təsvir oluna bilər. Nanomaqnetitin alınmasının I mərhələsində t zamanında onun ölçüsünün x olma ehtimalı $(\rho(x,t))$ bu tənliklə təyin oluna bilər:

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \rho(x,t)}{r_0^2 \partial x^2} - K \frac{\partial \rho(x,t)}{r_0 \partial x}$$

burada $x = d / d_0$, d_0 nanomaqnetitin I mərhələdə malik olduğu maksimal diametr - müxtəlif alınma mexanizmləri (normal və loqarifmik-normal funksiyaları) arasında keçid diametridir.

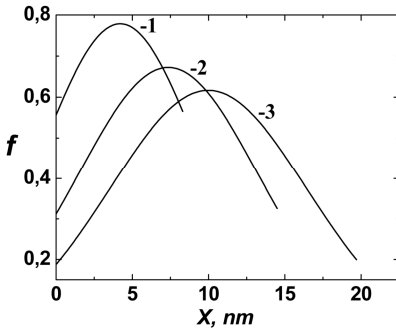
Məlumdur ki, bu tənliyin həlli aşağıdakı sərhəd şərtlərini ödəməlidir:

$$\begin{aligned} \rho(x,t) \Big|_{t=0, x=0} &= 1; & \rho(x,t) \Big|_{t=0, x=1} &= 0; \\ \rho(x,t) \Big|_{t \rightarrow \infty, x=0} &= 0; & \rho(x,t) \Big|_{t \rightarrow \infty, x=1} &= 1 \end{aligned}$$

Tənliyin həlli normal funksiya: $\rho(x,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$ və $\bar{x} = \frac{Kt}{4r_0}$,

$$\sigma = \sqrt{\frac{Dt}{2}} \frac{1}{r_0} \text{-dir.}$$

Şəkil 2-də orta ölçüsü 9,48 nm olan nanomaqnetitlərin alınmasının müxtəlif zamanlarında (1- 2 san, 2- 3,5 san, 3- 4,75 san) onların ölçülərə görə paylanması verilmişdir.



Şəkil.2

Nanohissəciklərin alınmasının I mərhələsində nəinki onların böyüməsi ($\partial\rho(x,t)/\partial t > 0$) həmçinin də çox kiçik ehtimalla da olsa onların məhlulda daha kiçik hissəciklərə parçalanması ($\partial\rho(x,t)/\partial t < 0$) mümkündür. Nanomaqnetitin alınmasının stasionar halı bu şərtlə təyin olunur $\partial\rho(x,t)/\partial t = 0$.

Stasionar halın zamanı üçün bu ifadə alınmışdır $t = \frac{4r_0}{K}(x + 0,52)$. Zamanın

hər bir nanonümunə üçün qiymətləndirilməsi göstərdiki bu təqribən ölçüsü maksimal (keçid) diametrlili nanomaqnetitin əmələ gəlməsi üçün lazım olan zamandır.

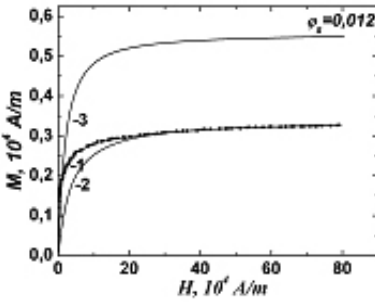
Nanomaqnetitin ölçüsünün və onun sürətinin zamandan asılılığı üçün bu ifadələr alınmışdır:

$$r(t) = r_0 \left(3x^{-2} + \sqrt{\frac{2}{\pi}} x\sigma + \sigma^2 \right)^{1/3}, \quad v(t) = \frac{1}{3} K \frac{1}{\left(3x^{-2} + \sqrt{\frac{2}{\pi}} x\sigma + \sigma^2 \right)^{2/3}} \left(\frac{3-x}{2} + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\sigma}{4} + \frac{0,05\phi}{3\sigma} \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\bar{x}}{\sigma} + 2 \right) \right)$$

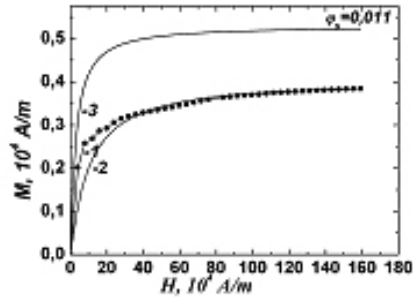
Göründüyü kimi nanohissəciklərin ölçüləri zaman artıqca artır və keçid diametrinə çatır. Başlanğıc anda nanohissəciklərin alınma sürəti çox böyükdür və zaman keçdikcə o azalır. Bu onunla izah olunur ki, zaman

keçdikcə nanohissəciyin ölçüsünün artması ilə onu əhatə edən mühitin atomlarının (molekulların) konsentrasiyası azalır və nanomaqnitin böyümə sürəti azalır. Böyük ölçülü nanohissəciklərin başlanğıc alınma sürəti kiçik ölçülü nanohissəciklərdən böyükdür. Nanohissəciyin alınma sürətinin nanohissəciyin ölçüsündən asılılığını belə izah etmək olar ki, nanohissəciyin orta ölçüsü alındığı mühitin fiziki xassələrindən (özüllük, temperatur və s.) asılıdır.

Üçüncü fəsilə nanomaqnetit mühitin təcrübi alınmış və nəzəri hesablanmış maqnitləşmə əyrilərinin müqayisəsindən nanomaqnetitin səthində qeyri-maqnetit maddənin olması müəyyənləşdirilmişdir. Orta ölçüsü 9,48 və 7,33 nm olan nanomaqnetitlərdən təşkil olunmuş mühitlərin maqnitləşməsinin təcrübi doyma qiymətləri uyğun olaraq $M_s' = 0,327 \cdot 10^4$, $0,384 \cdot 10^4$ A/m, hesablanmış qiymətləri isə $M_s' = 0,549 \cdot 10^4$ və $0,529 \cdot 10^4$ A/m –dir (şək.3(a,b)).



a)



b)

Şək.3(a,b)

Böyük maqnit sahələrində Lanjeven tənliyini $M_s' = M_s \phi_s$ (M_s – massiv maqnetitin maqnitləşməsinin doyma qiyməti) şəklində yazmaq və buradan nanomaqnetitlərin mühitdəki konsentrasiyasını təyin etmək olar. M_s'/M_s nisbəti tədqiq edilən nümunələr üçün 0,007 və 0,008 -dir və bunlar təcrübi qiymətlərə $\phi_s=0,012$; 0,011 uyğun gəlirlər. Bunu izah etmək üçün nanomaqnetitlərin həndəsi ölçülərinin (d_s) maqnit ölçülərinə ($d_{magn.} = d_s - x$) uyğun gəlmədiyini, daha doğrusu nanomaqnetitlərin qeyri-maqnetit hissəyə (x) malik olduğunu qəbul edək. Konsentrasiyasını təyin edən ifadədən istifadə edərək bərk və maqnit fazaların nisbəti üçün ifadə alırıq

$$\varphi_s / \varphi_{magn.} = \overline{d_s^3} / (\overline{d_s} - x)^3 = \alpha .$$

Son ifadəni dəyişərək kub tənlik almaq olar:

$$\overline{x^3} - 3 \cdot \overline{d_s} \cdot \overline{x^2} + 3 \cdot \overline{d_s^2} \cdot x - (1 - \alpha) \overline{d_s^3} = 0 .$$

Bu tənliyə aşağıdakı hallarda həll olunmuşdur:

- $x = const$, qeyri-maqnetit səthin qalınlığı bütün nanomaqnetitlər üçün eynidir;
- $d_s = const$, sistem monodispersdir və bu halda $x = const$;
- $x = d_s \cdot k$, qeyri-maqnetit səthin qalınlığı nanomaqnetitin diametrinin xətti funksiyasıdır.

Cədvəl 2-də orta ölçüsü 9,48 (1); 7,77 (2); 7,33 (3) və 5,48 (4) nm olan nanomaqnetitlər üçün $\overline{d_s}$, $\overline{d_s^2}$, $\overline{d_s^3}$ -nin və (a,b,c) hallarında tapılmış qeyri-maqnetit səthin qalınlığının (x) və k -nin qiymətləri verilmişdir.

Cədvəl 2

№	α	$\overline{d_s}$, nm	$\overline{d_s^2}$, nm ²	$\overline{d_s^3}$, nm ³	x , nm	k		
						(a)	(b)	(c)
1	0,606	9,48	95,46	1020,04	0,83	0,728	0,729	0,15
2	0,556	7,76	65,49	600,484	0,83	0,689	0,689	0,18
3	0,509	7,33	56,65	460,949	0,83	0,738	0,739	0,20
4	0,381	5,44	30,94	183,867	0,83	0,809	0,747	0,28

Alınmış nəticələrin analizi göstərdi ki, qeyri-maqnetit səthin qalınlığı nanomaqnetitin ölçüsündən (nanomaqnetitin səthinə adsorbsiya edən molekulların sayı nanomaqnetitin ölçülərinin artması ilə artır) və nanomaqnetitin alınmasında istifadə olunan reagentin xassələrindən (molyar kütlə, polyarlıq, özüllük və s.) asılı olaraq dəyişir. Bundan əlavə cədvəl 2-dən görüldüyü kimi qeyri-maqnetit maddənin qalınlığı maqnetitin kristallik qəfəsinin parametrinə ($a = 8,39 \text{ \AA}$) yaxındır. Bu isə qeyri-maqnetit maddənin mühitin molekullarının nanomaqnetitə diffuziya etməsi ilə alınmasını göstərir. Qeyri-maqnetit maddənin əmələ gəlməsini təsvir edən tənliyi belə yazmaq olar:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = \frac{D}{r_0^2} \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} + \frac{2D}{r_0^2 x} \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} - KC(x,t)$$

burada $x = r/r_0$, r_0 – nanomaqnetitin başlanğıc radiusudur. Bu sərhəd şərtləri daxilində $C(x,t)|_{t \rightarrow 0} = 0$, $C(x,t)|_{t \rightarrow \infty} = C_0$, $C(x,t)|_{x \rightarrow 0} = 0$ və $C(x,t)|_{x \rightarrow \infty} = C_0$ son tənliyi həll edərək qeyri-maqnetit maddənin qalınlığının təyini üçün bu ifadəni alırıq:

$$r(t) = r_0 \ln \left(\frac{1 + \operatorname{tg} \left(\frac{KC_0}{6\rho\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \right) r_0}{1 - \operatorname{tg} \left(\frac{KC_0}{6\rho\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \right) r_0} \right)$$

Göründüyü kimi qeyri-maqnetit səthin qalınlığı reagentin molekulyar kütləsinin artması ilə azalır. Bunu reagentin molekulyar kütləsinin artması ilə onun molekullarının nanomaqnetitə diffuziyasının azalması ilə izah etmək olar.

Qeyri-maqnetit maddənin əmələ gəlmə sürəti və onun kütləsinin ($M(t)$) zamandan asılılığı üçün bu ifadələr alınmışdır:

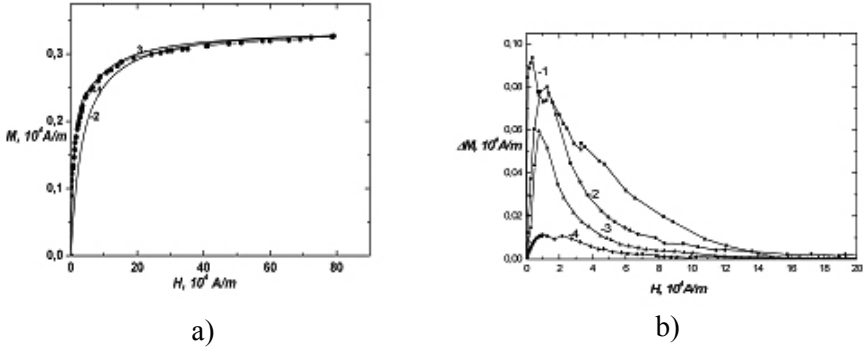
$$\frac{dr(t)}{dt} = \frac{1}{3} r_0 \frac{KC_0}{\rho} \gamma e^{-\lambda t} \frac{1}{\cos \left(\frac{1}{3} \frac{KC_0}{\rho\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) r_0 \right)}$$

$$M(t) = \frac{4}{3} \pi r_0^3 \left(1 - \left(1 - \ln \frac{1 + \operatorname{tg} \left(\frac{KC_0}{6\rho\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) r_0 \right)}{1 - \operatorname{tg} \left(\frac{KC_0}{6\rho\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) r_0 \right)} \right)^3 \right) \cdot \rho$$

Prosesin əvvəlində qeyri-maqnetit səth böyük sürətlə əmələ gəlir daha sonra onun əmələ gəlməsi praktiki olaraq dayanır. Başlanğıc halda mühitin (reagentin) molekulları mayedən bərk hala (nanomaqnetitə) diffuziya edirlər bu zaman diffuziyanın sürəti böyükdür, sonra isə diffuziyanın hadisəsi bərk (nanomaqnetit) mühitdə baş verdiyinə görə onun sürəti azalır.

Qeyri-mağnetit səthin başlanğıc əmələ gəlmə sürəti reagentin molekulyar kütləsinin azalması ilə artır. Bu kiçik molekulyar kütləyə malik reagentin molekullarının nanomağnetitə daha yaxşı diffuziya etməsi ilə əlaqədardır.

Dördüncü fəsildə polimer matrisə və nanomağnetitlər əsasında yaradılmış nanokompozitin maqnitləşməsi nanomağnetitlərin zəif maqnit dipol-dipol qarşılıqı təsiri nəzərə alınmaqla təyin edilmişdir. Şəkil 4(a,b)-də nanomağnetitlərin müxtəlif konsentrasiyasında alınmış nanokompozit mühitin təcrübi (əyri 1) və Lanjeven funksiyası ilə hesablanmış (əyri 2) maqnitləşmə əyriyələri və onların fərqi maqnit sahəsindən asılılığı verilmişdir. Göründüyü kimi maqnit sahəsinin kiçik qiymətlərində təcrübi və hesablanmış maqnitləşmə əyriyələri uyğunlaşmırlar, maqnit sahəsinin müəyyən qiymətində təcrübi və hesablanmış maqnitləşmə əyriyələrinin qiymətləri arasındakı fərq maksimal qiymətə malikdir və sonra maqnit sahəsinin qiymətinin artması ilə o azalır.



Şək.4(a,b)

Nanomağnetitlər polimer matrisəyə daxil edilməzdən əvvəl və sonra nanomağnetit mühitin maqnitləşmə əyriyələrindən istifadə edərək təyin olunmuş ölçülərin: d_{min} , d_{max} və loqarifmik–normal paylanmanın parametrlərinin: orta qiymət, orta kənarçıxmanın qiymətləri onların dəyişməmiş olduğunu görsətdi. Bunun təsdiqi olaraq nanomağnetitin təyin olunmuş bu ölçülərinin onların nanokompozitin elektron kəsiyindən təyin olunmuş qiymətlərə yaxın olduğunu göstərmək olar.

Hesablamalar göstərdi ki, maqnit sahəsinin qiyməti $H=0-300 \text{ kA/m}$ intervalında dəyişdikdə maqnit dipol-dipol qarşılıqlı təsirin

$(E_{m-m} = m^2_H / r^3)$ enerjisi maqnit dipolunun xarici sahədəki ($E_{m-H} = m_H H$) enerjisindən böyükdür. Konsentrasiyanın kiçik qiymətə malik olmasına baxmayaraq, nanomaqnetitlər kifayət qədər böyük ölçülərə malik olduğundan onlar böyük maqnit momentinə malikdirlər və bu zaman maqnit dipol-dipol qarşılıqlı təsir maqnitləşmədə mühim rol oynayır. Xarici maqnit sahəsinə daxil edilmiş nanomaqnetitlər sahə istiqamətində zəncir əmələ gətirir və onların maqnitləşməsi “paralell” və ya “yelkənvarı” mexanizmlə baş verir. Maqnit dipol-dipol qarşılıqlı təsirin enerjisi bu şəkildə götürülmüşdür:

$$E_{m-m} = \frac{m^2}{4\pi\mu_0 r^3} \left(\operatorname{cth} \frac{mH}{kT} - \frac{1}{\frac{mH}{kT}} \right)^2$$

Nanomaqnetitlərin maqnitləşməsinə cavabdeh olan statistik cəmi iki statistik cəmin hasili şəklində $Z = Z_1 \cdot Z_2$ göstərmək olar. Burada Z_1 statistik cəmi qarşılıqlı təsirdə olmayan nanomaqnetitlər sistemini, Z_2 – isə qarşılıqlı təsiri xarakterizə edir. Qibbs potensialının $\Phi = -kT \ln Z$, maqnitləşmənin $M(H) = -d\Phi/dH$, başlanğıc maqnit qavrayıcılığının

$\chi_0 = \left. \frac{dM(H)}{dH} \right|_{H \rightarrow 0}$ ifadələrindən istifadə edərək alırıq:

$$M(H) = M_s \varphi_m \left(\operatorname{cth} \frac{mH}{kT} - \frac{1}{\frac{mH}{kT}} \right) + \frac{1}{3} M_s^2 \varphi_m^2 \frac{1}{\mu_0 H} \ln \left(\frac{VM_s}{m} \right) \left(\operatorname{cth} \frac{mH}{kT} - \frac{1}{\frac{mH}{kT}} \right) \left(-\frac{mH}{kT} \operatorname{csc}^2 h^2 \frac{mH}{kT} + \frac{1}{\frac{mH}{kT}} \right)$$

$$\chi_0 = \frac{1}{3} M_s \varphi_m \frac{m}{kT} + \frac{1}{27} M_s^2 \varphi_m^2 \frac{1}{\mu_0} \ln \left(\frac{VM_s}{m} \right) \left(\frac{m}{kT} \right)^2.$$

Maqnitləşmə və başlanğıc maqnit qavrayıcılığının ifadələrində birinci hədd qarşılıqlı təsirdə olmayan mühiti, ikinci hədd isə qarşılıqlı təsirdə olan nanomaqnetit mühitə əlavəni xarakterizə edir.

Şəkil.4a-dan göründüyü kimi təcrübi (əyri 1) və maqnit dipol-dipol qarşılıqlı təsiri nəzərə almaqla hesablanmış (əyri 3) maqnitləşmə əyriləri bir-birinə daha çox yaxındırlar.

Cədvəl 3-də orta ölçüsü 9,48 nm olan nanomaqnetitlərdən təşkil olunmuş mühitin təcrübi və maqnit dipol-dipol qarşılıqlı təsiri nəzərə almadan və almaqla hesablanmış başlanğıc maqnit qavrayıcılığının qiymətləri verilmişdir. Göründüyü kimi təcrübi və maqnit dipol-dipol qarşılıqlı təsiri nəzərə alınmaqla hesablanmış başlanğıc maqnit qavrayıcılığının qiymətləri yaxındırlar.

Cədvəl 3

φ_m	Başlanğıc maqnit qavrayıcılığı		
	Təcrübi	Maqnit dipol-dipol qarşılıqlı təsir nəzərə alınmamaqla	Maqnit dipol-dipol qarşılıqlı təsir nəzərə alınmaqla
0,0018	0,016	0,0154	0,0163
0,003	0,028	0,0257	0,0279
0,0048	0,048	0,0412	0,0469
0,0068	0,112	0,102	0,111
0,0084	0,245	0,123	0,252

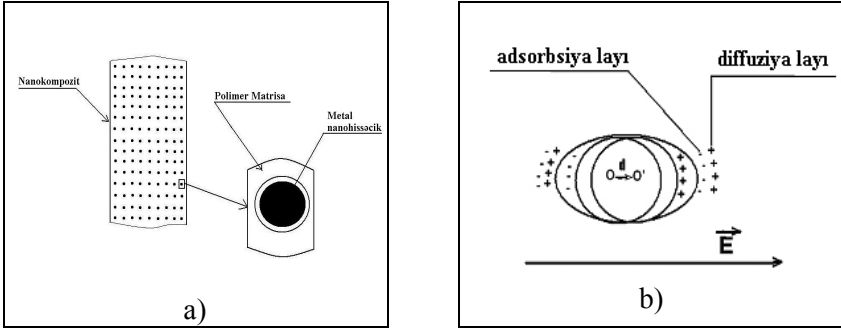
Maqnitləşmənin ikinci həddi maqnit sahəsinin kiçik qiymətlərində nəzərə çarpacaq dərəcədə böyükdür və böyük maqnit sahələrində sıfıra yaxınlaşır. $M(H)_2$ -nin maksimum qiymətinə uyğun gələn maqnit sahəsinin

qiyməti $\frac{dM(H)_2}{dH} = 0$ şərtindən $x = \frac{mH}{kT} = 1,57$ tapılmışdır.

Orta ölçüsü 9,48 nm nanomaqnetit nümunə üçün təcrübi və bu qiymət əsasında hesablanmış maqnit sahəsinin qiymətləri uyğun olaraq $1,19 \cdot 10^4$ A/m və $1,25 \cdot 10^4$ A/m-dir. İkinci həddin maksimal qiyməti nanomaqnetitin maqnit momentinin xətti, konsentrasiyasının isə parabolik funksiyasıdır.

Beşinci fəsildə polimer matrisa və nanomaqnetitlərdən təşkil olunmuş nanokompozitin dielektrik nüfuzluğu tədqiq olunmuşdur. Nanokompozitin dielektrik nüfuzluğu a) sabit elektrik sahəsində, b) maqnit sahəsinin dielektrik nüfuzluğuna təsiri və c) elektromaqnit sahəsində tədqiq edilmişdir.

Nanokompozitin dielektrik nüfuzluğunu hesablayarkən nanomaqnetitlərin polimer matrisada bərabər paylanmış, nanomaqnetiddə elektrik sahəsinin təsiri ilə elektrik yüklərinin polyarlaşması və ikili elektrik layın əmələ gəlməsi qəbul edilmişdir (şək.5(a,b)).



Şək.5(a,b)

A) Nanokompozitin polyarlaşması

Nanokompozitin xarici elektrik sahəsində (a), qarşılıqlı perpendikulyar xarici elektrik (E_0) və maqnit (H_0) sahələrində (b) və elektromaqnit sahəsində (c) polyarlaşması zamanı enerjinin saxlanması qanununu bu şəkildə yazmaq olar:

$$a) \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 = \frac{J \cdot E \cdot t}{\frac{4\pi}{3} r^3 \varepsilon} + \frac{1}{c} E \cdot H$$

$$b) \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \mu_0 H_0^2 = \frac{J \cdot E \cdot t}{\frac{4\pi}{3} r^3} + \frac{1}{c} E \cdot (H + H_0)$$

$$c) \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \mu \mu_0 H_0^2 = \frac{J E_0 e^{-i\omega t} t}{\frac{4}{3} \pi r^3 \varepsilon} + \frac{1}{2c} E (H_0 e^{-i\omega t} + H)$$

burada ifadənin sol tərəfindəki birinci və ikinci həddlər xarici elektrik (\vec{E}) və maqnit (\vec{H}) sahələrinin enerjisi və $E = E_0 e^{-i\omega t}$, $H = H_0 e^{-i\omega t}$ - dir, ifadənin sağ tərəfindəki birinci hədd yüklərin yerdəyişməsi zamanı ayrılan istilik miqdarını (polyarlaşmış cərəyan, $J = J_0 e^{-i\omega_0 t}$, ω_0 - cərəyanın dəyişmə tezliyi) – Coul-Lens qanunu, ikinci hədd isə Umov-Poyntinq vektorudur. Polyarlaşma cərəyanının yaratdığı maqnit sahəsi $H = \frac{1}{2r} J$ ilə

təyin olunmuşdur. $J = \frac{dQ}{dt}$ -olduğunu istifadə edərək və əvvəlki ifadələrə uyğun differensial tənliklər alarıq. Alınmış tənliklər bu sərhəd şərtləri $Q|_{t \rightarrow 0} = 0$, $Q|_{t \rightarrow t_{\max}}, E \rightarrow E_{\max} = Q_{\max}$ daxilində həll olunmuşdur.

Digər tərəfdən $\vec{d} = Q \cdot \vec{l}$ təyini nəzərə alsaq və elektrik yükü üçün təyin edilmiş sərhəd şərtlərinə uyğun olaraq elektrik dipol momenti üçün də sərhəd şərtləri təyin etmək olar. Uyğun hallar üçün elektrik dipol momenti üçün bu ifadələri alarıq:

$$a) d = \frac{1}{3} \varepsilon_0 E r^3 \ln \left(1 + t \frac{6\pi c l}{r^2} \right)$$

$$b) d(E, H_0, t) = \frac{r^3}{3E} \cdot \left(\varepsilon_0 E^2 + \mu_0 H_0^2 - \frac{1}{c} E \cdot H_0 \right) \cdot \ln \left(1 + t \frac{6\pi c l}{r^2} \right)$$

$$c) d' = \frac{4}{3} \varepsilon \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\mu \mu_0}} r E_0 \cdot \frac{l}{\omega - \omega_0} \cdot \text{Sin} \frac{(\omega - \omega_0) t}{2}$$

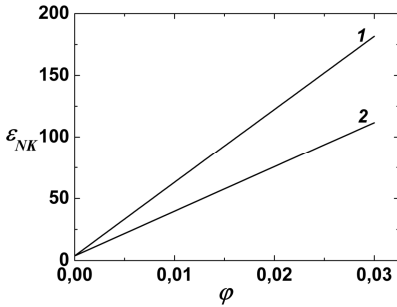
$$d'' = \frac{4}{3} \pi r^3 \varepsilon^2 \varepsilon_0 E_0 \cdot \left(\text{Si}^2 \frac{(\omega - \omega_0) t}{2} + \text{Ci}^2 \frac{(\omega - \omega_0) t}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Mühitin maqnit və elektrik parametrləri arasındakı analogiyadan istifadə edərək elektrik dipol momentinin maksimal qiyməti məlum olduqda metal nanohissəciklərin elektrik sahəsində polyarlaşması üçün

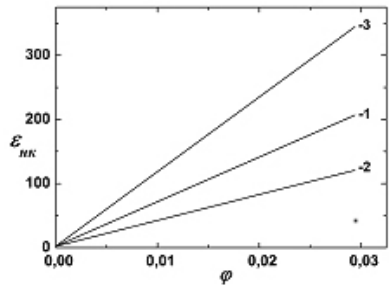
dispers sistemin maqnitləşməsinə (Lanjeven tənliyinə) uyğun tənlik almaq olar. Qibss potensialının $\Phi = -kT \ln Z$, polyarlaşmanın $P(E) = -d\Phi/dE$ və dielektrik nufuzluğunun $\varepsilon_{NK} = \partial P/\partial E_0$ təyini ifadələrindən istifadə edərək nanokompozitin dielektrik nufuzluğu üçün bu ifadəni alırıq:

$$\varepsilon_{NK}(r) = \varepsilon_{POL} \cdot \left(1 + \varphi \cdot \frac{\varepsilon_{POL} + 2}{3} \cdot \frac{d^2(r)}{3\varepsilon_0 V_0 kT} \right)$$

Şəkil 6-da nanokompozitin dielektrik nufuzluğunun nanomaqnetitin konsentrasiyasından (φ) asılılığı verilmişdir (1-5,48; 2-9,48 nm).



Şəkil 6



Şəkil 7

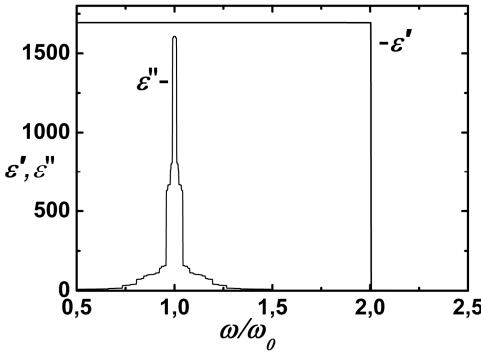
Şəkildən görüldüyü kimi $\varphi=0$ qiymətində nanokompozitin dielektrik nufuzluğu polimer matrisanın dielektrik nufuzluğuna bərabərdir ($\varepsilon_{polistirol}=2,52$) və nanomaqnetitin konsentrasiyasından xətti asılıdır.

Kiçik ölçülü nanomaqnetidlərdən təşkil olunmuş nanokompozitin dielektrik nufuzluğu böyük ölçülü nanomaqnetidlərdən təşkil olunmuş nanokompozitin dielektrik nufuzluğundan yüksəkdir. Bu verilmiş konsentrasiyada nanokompozitdə kiçik ölçülü nanomaqnetidlərin sayının böyük ölçülü nanomaqnetidlərin sayından çox olması və uyğun olaraq polyarlaşmada iştirak edən elektronların sayının çox olması ilə izah olunur.

Şəkil 7-də maqnit sahəsinin $H=0$ (əyri 1), $H= 1,3 \cdot 10^5$ A/m (əyri 2), $H= 2,7 \cdot 10^5$ A/m (əyri 2) qiymətlərində nanokompozitin dielektrik nufuzluğunun nanomaqnetitin konsentrasiyasından asılılığı verilmişdir. Şəkildən görüldüyü kimi müxtəlif maqnit sahələri üçün hesablanmış nanokompozitin dielektrik nufuzluğunun nanomaqnetitin konsentrisi-

yasından asılılığı müxtəlifdir. Bu nanomaqnetitin elektrik dipol momentinin qiymətinin müxtəlif maqnit sahələrində müxtəlif olması ilə izah olunur. Nanomaqnetitin maqnit sahəsinin $H=1,3 \cdot 10^5$ A/m qiymətində hesablanmış elektrik dipol momenti $H=0$ və $H=2,7 \cdot 10^5$ A/m qiymətlərində hesablanmış elektrik dipol momentindən aşağıdır.

Şəkil 8-də $\varepsilon'(\omega)$ və $\varepsilon''(\omega)$ asılılıqları ölçüsüz (ω/ω_0) vahidlərində verilmişdir. Kiçik tezliklərdə $(\omega \ll \omega_0)$ elektromaqnit sahəsinin dəyişməsi elektronların sürətli yerdəyişməsindən (bu zaman polyarlaşma çox böyük sürətlə baş verir) çox geri qalır və buna görə də dielektrik nüfuzluğu demək olar ki, sabitdir və böyükdür. $\varepsilon''(\omega)$ asılılığı $(\omega/\omega_0=1)$ olduqda maksimal qiymətə (rezonansa) malikdir.

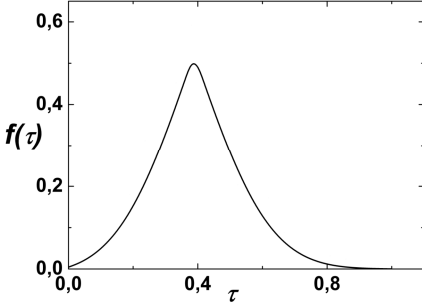


Şək.8

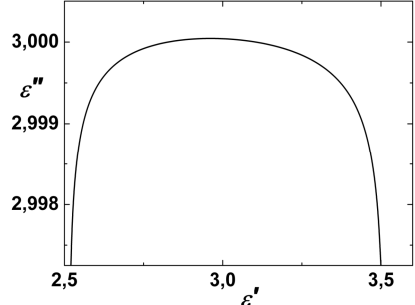
Beləki $(\omega/\omega_0=1)$ olduqda maksimal cərəyan əmələ gəlir və uyğun olaraq maksimal istilik (elektromaqnit dalğasının enerjisinin udulması baş verir) ayrılır. Böyük tezliklərdə $(\omega \gg \omega_0)$ isə elektron xarici elektromaqnit sahəsinin dəyişməsindən geri qalır və uyğun olaraq dielektrik nüfuzluğunun qiyməti

$(\varepsilon'$ və ε'' qiymətləri) azalır və polimer matrisanın dielektrik nüfuzluğunun qiymətinə yaxınlaşır. Digər tərəfdən şəkildən görüldüyü kimi nanokompozitin dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsinin xarici elektromaqnit sahənin tezliyindən asılılığı siqmaoid (loqistik) şəklindədir. Bu asılılıq fraktal quruluşa malik sistemlər üçün xarakterikdir. Elektromaqnit sahəsinin tezliyindən asılı olaraq nanokompozitin dielektrik nüfuzluğunun yaranmasında müəyyən ölçülü (müəyyən dipol momentinə malik) nanomaqnetitlər iştirak (relaksasiya) edir. Beləliklə nanomaqnetitlərin dielektrik nüfuzluğunun relaksasiya zamanına görə paylanması yaranır (şək.9). Nanomaqnetitin elektrik dipol momentinin qiyməti onun həndəsi ölçüsündən $(\vec{d} = Q \cdot \vec{l}$ və $l=0,1$ r) və relaksasiya müddəti isə dipol momentinin qiymətindən xətti asılı olduqlarına görə

($t_{\max} = l_{\max} \sqrt{A_{\text{work}} / m}$) relaksasiya müddətlərinin paylanması nanomaqnetitlərin ölçülərə görə paylanması ilə eyni olmalıdır.



Şək.9



Şək.10

Dielektrik nüfuzluğunun xəyali hissəsinin həqiqi hissəsindən asılılığı Koul-Koul tiplidir (şək.10).

Cədvəl 4-də orta ölçüsü 4,82; 5,48; 7,33; 7,76; 9,48; 10,24 *nm* və həcmi konsentrasiyası 0,03 olan nanomaqnetitlər və polimer əsaslı nanokompozitin optik parametrlərinin: sındırma əmsalının (*n*), sındırma əmsalının xəyali hissəsinin (χ), dielektrik itki bucağının (*tgδ*), nüfuz etmə dərinliyinin (*h*) maksimal qiymətləri göstərilmişdir. Göründüyü kimi nanokompozitin optik parametrlərinin qiyməti nanomaqnetitin orta ölçüsünün (dipol momentinin) artması ilə artır.

Cədvəl 4

<i>r, nm</i>	<i>n_{max}</i>	χ_{max}	<i>tgδ_{max}</i>	<i>h_{max, mμm}</i>
4,82	10,71	8,91	0,185	0,018
5,48	13,15	10,29	0,247	0,028
7,33	23,44	14,2	0,523	0,089
7,76	26,2	14,9	0,595	0,109
9,48	44,88	17,9	0,854	0,268
10,24	49,32	18,37	0,958	0,311

Cədvəl 5-də orta ölçüsü 9,48 *nm* olan müxtəlif konsentrasiyalı nanomaqnetitlər və polimer əsasında hazırlanmış nanokompozitin

dielektrik nufuzluğunun xəyali hissəsinin (ε'') və optik parametrlərinin (n , χ , h) qiymətləri göstərilmişdir.

Cədvəl 5

φ	ε''_{max}	n	χ	h , $m\mu m$
0,01	566,09	25,95	10,35	0,155
0,02	1129,98	36,66	14,62	0,219
0,03	1693,87	44,88	17,9	0,268
0,04	2257,75	51,82	20,67	0,31
0,05	2821,64	57,93	23,12	0,346

Nanomaqnetitin konsentrasiyasının artması onların nanokompozitdə sayının artmasına (elektronların), bu da sonda optik parametrlərin qiymətlərinin artmasına gətirir. Göründüyü kimi nufuz etmə dərinliyinin qiyməti nanomaqnetitin ölçüsünün (cədvəl 4), konsentrasiyasının (cədvəl 5) artması ilə artır. Bu o deməkdir ki, nanomaqnetitin ölçüsünün, konsentrasiyasının artması ilə elektromaqnit dalğasının udulmasında iştirak edən elektronların sayı artır.

B) Nanokompozitin depolyarlaşması

Elektrik sahəsi götürüldükdən sonra polyarlaşmış nanomaqnetitlər depolyarlaşmağa başlayırlar. Nanomaqnetidə polyarlaşma zamanı yaranmış elektrik yükünün nanomaqnetit depolyarlaşarkən zamana görə azalmasını uyğun hallar üçün bu ifadələrlə vermək olar:

$$a) \frac{dQ}{dt} = -J \quad H=0$$

$$b) \frac{1}{2} \mu_0 H_0^2 + \frac{1}{4\pi^3} \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{Q^2}{2l} = \frac{J \cdot Q t}{\frac{4\pi^3}{3} r^3 \varepsilon_0 l} + \frac{1}{c} \frac{Q}{\varepsilon_0 l^2} (H - H_0) \quad H \neq 0:$$

Tənliklərin həllini bu sərhəd şərtləri $Q|_{t \rightarrow 0} = Q_{max}$, $Q|_{t \rightarrow t_{max}} = 0$

daxilində axtarıyıq.

Tapılmış həllər bu şəkildədir:

$$a) Q = Q_{\max} e^{-\pi \left(\frac{r}{l}\right)^2 \frac{1}{\rho \varepsilon_0} t} -$$

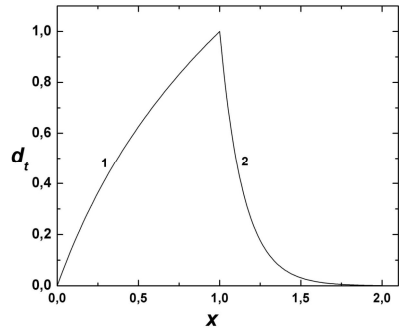
$$b) Q_{1,2} = -\frac{b}{a} \pm \sqrt{\left(\frac{b}{a}\right)^2 + Q_{\max}^2 + 2Q_{\max} \frac{b}{a} + 2\frac{pt}{n}}$$

$$\text{burada } a = \frac{1}{4\pi r^3} \frac{1}{2\varepsilon_0 l}, \quad b = -H_0 \frac{1}{\varepsilon_0 l^2 c}, \quad c_0 = \frac{1}{2} \mu_0 H_0^2, \quad m = \frac{3}{\varepsilon_0 l r^3},$$

$$n = -\frac{1}{2\pi r \varepsilon_0 l^2 c} \quad p = -\frac{b^2}{4a} + c_0.$$

Uyğun sərhəd şərtlərini nanomaqnetitin elektrik dipol momenti üçün də yazmaq olar: $d|_{t \rightarrow 0} = d_{\max}$, $d|_{t \rightarrow t_{\max}} = 0$. Böyük ölçülü nanomaqnetitlərin polyarlaşma müddəti kiçik ölçülü nanomaqnetitlərin polyarlaşma müddətindən böyükdür, depolyarlaşma müddəti isə ölçülərin kiçilməsi ilə əlaqədar azalır.

Şəkil 11-də nanomaqnetitin polyarlaşmasının (əyri 1) və depolyarlaşmasının (əyri 2) zamanın asılılığı ölçüsüz vahidlərdə ($x = t/t_{\max}$, $d_t = d/d_{\max}$) verilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi hər bir müəyyən ölçülü nanomaqnetit üçün məxsusi rezonans tezliyi vardır. Buna əsasən də nanomaqnetitlərin ölçüsünü təyin etmək olar.



Şək.11

ƏSAS NƏTİCƏLƏR

1. Kimyəvi çökdürmə metodu ilə alınmış monodispers nanomaqnetit sistem üçün hissəciklərin ölçülərə görə paylanmasını dəqiq təsvir edən histoqram və normal, loqarifmik-normal funksiyaları əsasında paylanma funksiyası (kombinə edilmiş) qurmaq olar. Nanomaqnetitlərin ölçülərə görə paylanması assimetrikdir və böyük ölçülər tərəfə maillidir. Histoqram və kombinə edilmiş paylanma funksiyaları vasitəsi ilə nanohissəciklər mühitin parametrlərini (paylanmanın momentlərini, parametrlərini, maqnitləşmə, optik, akustik səpilmənin intensivliyini və s.) dəqiq hesablamaq olar.
2. Kimyəvi çökdürmə metodu ilə alınmış nanomaqnetitlərin formalaşmasında 2 mərhələnin (1- maqnetit molekullarının ardıcıl kristallaşma mərkəzlərinə birləşməsi və 2- alınmış nanohissəciklərin parçalanması və bir-biri ilə birləşməsi) olduğu tapılmışdır. Müxtəlif nanomühitlər üçün nanohissəciyin bu mərhələlər arasında keçidə uyğun diametri təyin olunmuşdur.
3. Kimyəvi çökdürmə metodu ilə alınmış nanomaqnetitlərdə qeyri-maqnetit səthin olması aşkar olumuşdur. Qeyri-maqnetit səth nanomaqnetitin alınması zamanı mühitin (reagentin) molekullarının nanohissəciyə diffusiya etməsi ilə baş verir və o nanomaqnetiti daha sonrakı oksidləşmədən qoruyur. Qeyri-maqnetit səthin qalınlığının və alınma sürətinin nanomaqnetin ölçüsündən və mühitin xassələrindən asılılığı müəyyənləşdirilmişdir.
4. Göstərilmişdir ki, maqnit dipol-dipol qarşılıqlı təsirin nanomaqnetit mühitin maqnitləşməsinə əlavəsi kiçik maqnit sahələrində daha çoxdur, $mH/kT=1,57$ qiymətində maksimal qiymət alır və nanomaqnetitin konsentrasiyasından kvadratik asılıdır.
5. Nanokompozitin dielektrik nüfuzluğu nanomaqnetitin ölçüsündən, konsentrasiyasından, maqnit sahəsinin qiymətindən asılıdır. Nanokompozitin dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissələrinin xarici elektromaqnit sahəsinin tezliyindən asılılığı nanokompozitin polyarlaşmasının Maksvell-Vaqner mexanizmi ilə baş verdiyini təsdiqləyir. Dielektrik nüfuzluğunun xəyali hissəsinin həqiqi hissədən asılılığı Koul-Koul tiplidir.

ELMI İŞLƏRİN SİYAHISI

1. Али-заде Р.А. Морфология наночастиц магнетита, полученных методом химического осаждения // Известия АН Азербайджана. Сер. Физ.-мат. и техн. наук (Физика и Астрономия) 2000, т. XX, № 2, с.88–94
2. Ali-zade R.A. Description of distribution of magnetite nanoparticles on size by empirical analytic function / Abstract book of the International conference on Nanostructured Advanced Magnetic Materials. Irsee, Germany, 2002, p.47
3. Ali-zade R.A. Investigation of mechanism of formation nonmagnetite layer on surface of magnetite nanoparticles / Abstract book of the International Workshop on Recent Trends on Nanomagnetism. Gebze, Turkey, 2003, p.13
4. Али-заде Р.А. Структура и магнитные свойства полимерных микросфер, наполненных наночастицами магнетита // Неорганические Материалы, 2004, т.40, №5, с.593-599
5. Ali-zade R.A. Magnetization of magnetite nanoparticles medium with dipole-dipole interaction / Abstract book of the International Conference on Nanoscale Magnetism. Gebze, Turkey, 2005, p.68
6. Ali-zade R.A. Construction of distribution function of magnetite nanoparticles on size on the base of moments / Abstract book International conference on Nanoscale Magnetism. Istanbul, Turkey, 2007, p.144
7. Али-заде Р.А. Распределение наночастиц магнетита по размерам в дисперсных средах // Неорганические Материалы, 2008, т.44, №2, с.210-215
8. Ali-zade R.A. Функция распределение наночастиц магнетита по размерам в дисперсных средах // Неорганические Материалы, 2008, т.44, №10, с.1233–1238
9. Ali-zade R.A. Kinetics of initial stage of magnetite nanoparticles formation by chemical precipitation method / Abstract book of International conference on superconductivity and magnetism. Antalya, Turkey, 2008, p.106
10. Ali-zade R.A. Механизм первой стадии образования наночастиц магнетита, полученных методом химического осаждения // ЖФХ, 2009, т.83, №7, с.1333-1337

11. Али-заде Р.А. Диэлектрическая проницаемость нанокompозитов на основе наночастиц магнетита и полимерной матрицы коллаген, полистирол // ЖФХ, 2010, т.84, №9, с.1722-1727
12. Ali-zade R.A. Magnetization of magnetite nanoparticles mediums with weak magnetic dipole–dipole interaction // JNN, 2011, v.12, No 3, p.2496-2500
13. Ali-zade R.A. Influence of magnetic field on dielectric properties of nanocomposites on the base of magnetite nanoparticles and polymeric matrix: collagen, polystyrole / Abstract book of Advances in Applied Physics & Material Sciences Congress. Antalya, Turkey, 2011, p.315
14. Ali-zade R.A. Magnetic characteristics of polymer microspheres filled with magnetite nanoparticles / Abstract book of International conference on superconductivity and magnetism. Istanbul, Turkey, 2012, p.1053
15. Ali-zade R.A. Distribution function of magnetite nanoparticles in size on the basis of moments // IEEE trans.mag., 2013, v.49, No. 6, p.2893-2898
16. Ali-zade R.A. Influence of magnetic field on dielectric permittivity of nanocomposites on the base of polymeric matrix: collagen, polystyrole and magnetite nanoparticles // IEEE trans.mag., 2015, v.51, No 7, p. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2395998

ALIZADE RASIM AHMED oqlu

**PHYSICAL PROPERTIES OF DISPERSE SYSTEMS
ON THE BASE OF NANOMAGNETITE**

SUMMARY

The dissertation is devoted to investigation of physical properties of disperse systems on the base of polymeric matrix and nanomagnetite. Distribution of magnetite nanoparticles on size, kinetic of formation magnetite nanoparticles, formation of non-magnetite layer on the surface of magnetite nanoparticles, physical properties (magnetic and dielectric) magnetite nanoparticles mediums was been investigated.

It was been showed particle size distribution of monodisperse nanoparticle system can be accurately represented by histogram. Physical parameters of disperse systems (moments and parameters of distribution, magnetization, electric polarization, and others) can be evaluated by this histogram. Analytical distribution function on the basis of the moments, evaluated by the histogram, was constructed. Moreover, analytic function describing of distribution magnetite nanoparticles on size was chosen among well known distribution functions. In future we constructed function consisting normal and lognormal distribution functions. Two mechanisms of formation of magnetite nanoparticles were been determined on the base of analysis of constructed distribution function. First stage of nanoparticle growth was been described by kinetic equation. Solution of equation is normal function. In the first stage of formation of nanoparticles, size is increased on time and reaches the transition diameter between these two mechanisms. At initial time, the rate of nanoparticle formation is high and at final it decreases on time. It is explained with decreasing of concentration of the medium with time as nanoparticles grow.

Existence non-magnetite layer on nanomagnetite surface is proved. The mechanism formation of the non-magnetite layer is diffusion of molecules from the reaction medium to the surface layer of the nanoparticles. The formation rate of the non-magnetite layer depends on the molecular weight of the reagent, and the size of the magnetite nanoparticles. Magnetite nanopartocles reacts with reagent and antiferrimagnetics: $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$, $FeO \cdot nH_2O$, Fe_3O_4 and FeO are formed. At room temperature, these antiferrimagnetics have no effect on the

magnetization of the magnetite nanoparticles mediums, as, magnetization they require substantially larger magnetic fields than those used in our experiments.

Magnetization expression for weak interacting nanomagnetite disperse systems was been determined. Magnetic dipole-dipole interaction assisted to formation of chains of magnetite nanoparticles and they are placed along external magnetic field. Second term of magnetization expression is sufficient at weak magnetic fields, have maximum at $mH/kT = 1,57$, and at large magnetic fields it leads to zero. The maximum value of second term is linear function of magnetic moments and parabolic function of concentration of nanomagnetite.

Dielectric permittivity of nanocomposites on the base of polymer and magnetite nanoparticles was been investigated at electric and electromagnetic field and influence of magnetic field to dielectric permittivity was been determined. At low concentrations, the permittivity of nanocomposites linearly depended on the concentration of nanoparticles. It is shown that at magnetic field values $0 \leq H_0 < 0,75\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0/\mu\mu_0}E$ nanocomposite dielectric permittivity is less than in the absence of magnetic field, at $H_0 = 0,75\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0/\mu\mu_0}E$ has minimum value. At $H_0 \geq 0,75\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0/\mu\mu_0}E$ the dielectric permittivity value of nanocomposites is more than in the absence of magnetic field.

The kinetics of polarization of magnetite nanoparticles was described by logarithmic, and the kinetics its depolarization, by exponential law. These dependencies may be used for the determination of its size.

The dependence of real part of dielectric permittivity of nanocomposite on frequency of electromagnetic field is logistic. It indicates to fractal structure of nanocomposite. The dependence real part of dielectric permittivity of nanocomposite on its imaginary part is Coul-Coul type.

АЛИЗАДЕ РАСИМ АХМЕД оглы

**ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ
НА ОСНОВЕ НАНОМАГНЕТИТА**

РЕЗЮМЕ

Диссертационная работа посвящена исследованию физических свойств дисперсных систем на основе наночастиц магнетита. С этой целью было определено распределение наночастиц магнетита по размерам, исследовано кинетика образования наночастиц магнетита, полученных методом химического осаждения, изучено образование немагнетитного слоя на поверхности наночастиц магнетита, исследовано намагничивание слабо магнитно диполь-диполь взаимодействующих сред наночастиц магнетита, определена диэлектрическая проницаемость сред наночастиц магнетита в постоянном электрическом, электромагнитном поле и влияние магнитного поля на диэлектрическую проницаемость.

Построена гистограмма для монодисперсных систем, точно описывающая распределение наночастиц по размерам. Моменты, параметры распределения, намагничивание, диэлектрическая проницаемость и др. характеристики характеризующие дисперсные системы наномангнетита, вычисленные с помощью гистограммы хорошая согласуемость с экспериментальными.

На основе моментов, вычисленных с помощью гистограммы распределения была построена функция распределения наночастиц магнетита по размерам. Однако построенная функция, не достаточно хорошо описывала распределение. Поэтому аналитическая функция распределения наночастиц магнетита по размерам была выбрана среди часто используемых известных функции распределений, которое более близко к полигону частот. Показано, что функция распределения, сконструированная на основе нормальной и логарифмически-нормальной функции более близко к полигону частот. На основе полученного определены две стадии в образовании наночастиц магнетита: I -я стадии образование зародыши наночастиц магнетита, II –я их объединение и распад. Первая стадия образования описана кинетическим уравнением, решением которого является

функция Гаусса, со средним значением $\bar{x} = Kt/4r_0$ и средним квадратичным отклонением $\sigma = (\sqrt{Dt/2})/r_0$.

Существование на поверхности наночастиц магнетита немагнетитного слоя доказано из сравнения расчетного и экспериментального кривых намагничивания среды наномангнетита. Механизмом образования немагнетитного слоя является диффузия молекул среды в наночастицу во время их приготовления. Толщина немагнетитного слоя зависит от размера наночастиц магнетита, от значения молекулярной массы реагента среды.

Получено уравнение намагничивания сред наночастиц магнетита со слабым магнитным диполь-дипольным взаимодействием. Показано, что вклад диполь-дипольного взаимодействия на намагничивание сред существенно при малых магнитных полях и имеет максимальное значение при значении $mH/kT = 1,57$. Кривые намагничивания, полученный расчетным с учетом магнитного диполь-дипольного взаимодействия и экспериментальным путем согласуются.

Исследована диэлектрическая проницаемость сред наночастиц магнетита в постоянном электрическом и электромагнитном полях. Показано, что диэлектрической проницаемости сред наночастиц магнетита зависит от размера и концентрации наночастиц магнетита. Зависимость реальной части диэлектрической проницаемости от частоты электромагнитного поля показали на фрактальную структуру нанокompозита. Определены распределения наномангнетитов по времени диэлектрической релаксации. Исследования влияния магнитного поля на диэлектрическую проницаемость нанокompозитов показали, что при значениях магнитного поля $0 \leq H_0 < 0,75\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0/\mu\mu_0}E$ значение диэлектрической восприимчивости нанокompозита меньше чем при отсутствии магнитного поля, при $H_0 = 0,75\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0/\mu\mu_0}E$ имеет минимальное значение и при значениях $H_0 \geq 0,75\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0/\mu\mu_0}E$ диэлектрическая проницаемость нанокompозита больше чем при отсутствии магнитного поля.

Sifariş № Format 60x84 1/16
Tiraj 100 nüsxə

“Politex” MMC-nin mətbəəsi

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК АЗЕРБАЙДЖАНА
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
им. академика Г.М.Абдуллаева**

На правах рукописи

АЛИЗАДЕ РАСИМ АХМЕД оглы

**ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ
НА ОСНОВЕ НАНОМАГНЕТИТА**

2220.01- физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора философии по физике

БАКУ - 2015