

CoGa_xFe_{2-x}O₄ ($x = 1.1; 1.3$) KRİSTALLARININ MAQNİTLƏNMƏSİ, MAQNİT HƏSSASLIĞI VƏ HİSTEREZİSİ

A.M. ABDULLAYEV, A.İ. ƏHMƏDOV, M.C. NƏCƏFZADƏ,
İ.N. İBRAHİMOV, M. K. XUDAYAROVA

Azərbaycan Elm və Təhsil nazirliyi, Fizika İnstitutu

H. Cavid pr. 131, AZ-1073 Bakı

E-mail: aqaadil@gmail.com

Bu yazıda ters çevrilmiş spinel strukturlu ($Fd\bar{3}m$) CoGa_xFe_{2-x}O₄ ($x = 1.1; 1.3$) polikristal birləşmələrinin maqnit tədqiqatlarının (maqnit qavrayıcılığının temperaturdan asılılığının və maqnitlənmənin sahədən asılılığının ölçülməsi) nəticələri təqdim olunur.

Molyar maqnit həssaslığının temperaturdan asılılığının təhlili göstərdi ki, CoGa_xFe_{2-x}O₄ ($x = 1.1; 1.3$) maddələri üçün Kuri temperaturu (T_C) uyğun olaraq ($x = 1.1$ üçün $T_C \approx 210K$, $x = 1.3$ üçün isə $T_C \approx 143K$) olan ferrimaqnitlərdir. 10 K temperaturda doyma maqnitlənmənin M_s kəmiyyəti ilə CoGa_xFe_{2-x}O₄ ($x = 1.1; 1.3$) molekulu üçün n_B Bor maqnitonlarının sayı arasındakı əlaqə aşağıdakı kimi verilir: $n_B = \frac{M_s}{N_A \mu_B}$, burada N_A – Avoqadro sabiti, μ_B – Bor maqnitonudur. Sonra effektiv maqnit momenti üçün aşağıdakı qiymətlərini alırıq:

CoGa_{1.3}Fe_{0.7}O₄ üçün $\mu_{eff} = n_B \mu_B \approx 3.4 \mu_B$, CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ üçün isə $\mu_{eff} = n_B \mu_B \approx 2.95 \mu_B$ olur.

CoGa_xFe_{2-x}O₄ ($x = 1.1; 1.3$) maddələrinin $T=10K$ temperaturda $M(H)$ molyar maqnitlənməsinin sahədən asılılığında histerezis halqası aşkar edilmişdir. Maqnit histerezis halqasının parametrləri və forması ferritlər üçün xarakterikdir. Verilən nümunələr aşağıdakı maqnit xüsusiyyətlərinə malikdir: CoGa_{1.3}Fe_{0.7}O₄ üçün $M_s=1.9 \cdot 10^4$ emu/mol; $M_r=1.28 \cdot 10^4$ emu/mol; $H_c = 25000$ Oe, CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ üçün isə $M_s=1.65 \cdot 10^4$ emu/mol; $M_r = 1.05 \cdot 10^4$ emu/mol; $H_c = 27000$ Oe olur.

Açar sözlər: Maqnitlənmə; CoGa_xFe_{2-x}O₄; Qavrayıcılıq; Kuri temperaturu.

DOI: 10.70784/azip.2.2025203

GİRİŞ

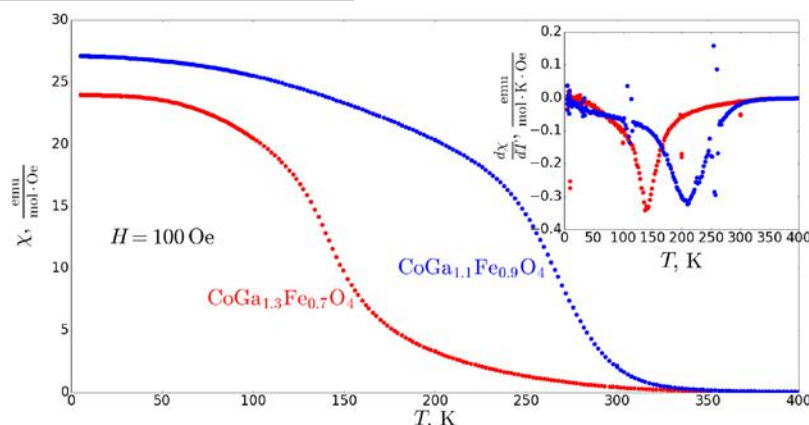
Məlumdur ki, CoFe₂O₄ kobalt ferriti fəza qrupu $Fd\bar{3}m$ olan tərs çevrilmiş spinel quruluşuna malikdir [1]. Birinci yaxınlaşmada, CoFe₂O₄ strukturunda Fe³⁺ ionları bütün tetraedral və oktaedral mövqelərin yarısını, Co²⁺ isə oktaedral mövqelərin qalan yarısını tutur [1, 2], lakin kobalt atomları çox vaxt hər iki altqəfəs üzərində paylanır [3, 4, 5]. CoFe₂O₄ birləşməsi keçid temperaturu təxminən 800 K ($T_C \approx 800$ K) olan ferrimaqnitdir [1]. 0 K temperaturda dəmirin maqnit momenti (Fe³⁺) ($5\mu_B$), kobaltınki isə $3\mu_B$ (Co²⁺) təşkil edir. Müvafiq olaraq, CoFe₂O₄ düstur vahidi üçün təxminən $3\mu_B$ olur [1]. Təcrübi məlumatlara görə, aşağı temperaturlarda CoFe₂O₄ birləşməsinin doyma maqnitlənməsinin qiyməti $3.7\mu_B$ təşkil edir [1]. Kobalt ferriti

otaq temperaturunda sərt maqnit ferritləri arasında kifayət qədər yüksək doyma maqnitlənməsinə malikdir [1]. Otaq temperaturunda bu materialın təkdomenli hissəciklərinin koersitiv qüvvəsi 9 kOe [6-11], nazik təbəqələriniki isə 11 kOe qiymətindən çox ola bilər.

NƏTİCƏLƏR VƏ ONLARIN MÜZAKİRƏSİ

Bu işdə tərs çevrilmiş spinel strukturlu ($Fd\bar{3}m$) CoGa_xFe_{2-x}O₄ ($x = 1.1; 1.3$) polikristal birləşmələrinin maqnit tədqiqatlarının (maqnit qavrayıcılığının temperaturdan asılılığının və maqnitlənmənin sahədən asılılığının ölçülməsi) nəticələri təqdim olunur.

Bu işin məqsədi 5–350K geniş temperatur intervalında CoGa_xFe_{2-x}O₄ ($x = 1.1; 1.3$) maddələrinin maqnit xassələrini öyrənməkdir.

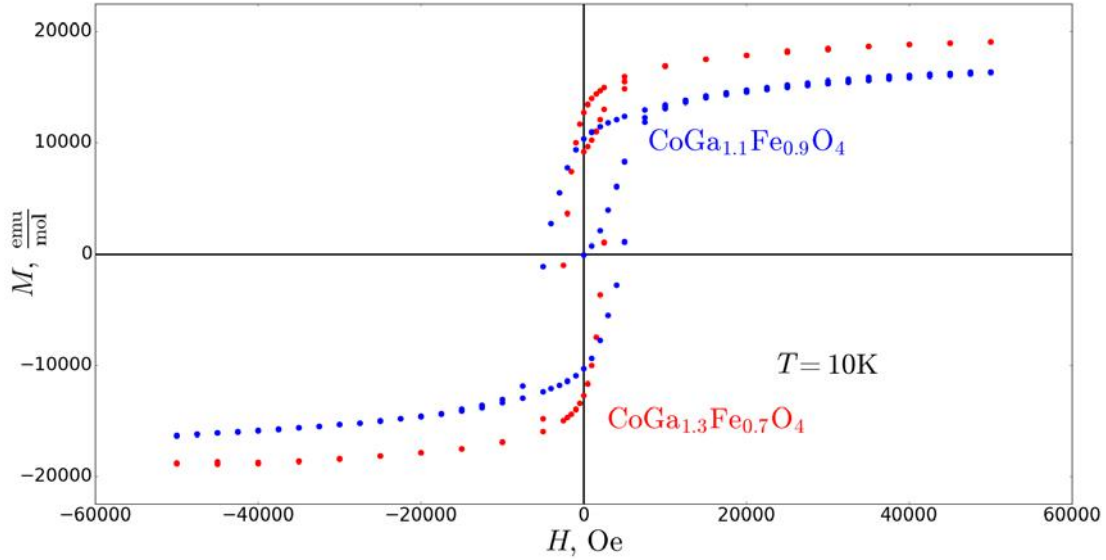


Şəkil 1. CoGa_xFe_{2-x}O₄ ($x = 1.1; 1.3$) maddələrinin $H = 100$ Oe maqnit sahəsində $\chi(T)$ maqnit qavrayıcılığının və onunun $\frac{d\chi}{dT}(T)$ törəməsinin temperaturdan asılılığı.

Yuxarıdakı birləşmələrin χ maqnit həssaslığı və M maqnitlənməsi 5-350 K temperatur intervalında H maqnit sahəsinin qiyməti 50 kOe-ə qədər olan SQUID-maqnitometrində (SQUID MPMS5 magnetometer from Quantum Design) ölçülmüşdür.

$\text{CoGa}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ ($x = 1.1; 1.3$) üçün $\chi(T)$ maqnit qavrayıcılığının və onun $\frac{d\chi}{dT}(T)$ törəməsinin temperaturdan asılılıqları şəkil 1-də göstərilmişdir.

$\text{CoGa}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ ($x = 1.1; 1.3$) maddələrinin ferimaqnit qavrayıcılığın $\frac{d\chi}{dT}(T)$ törəməsinin temperatur asılılığından müəyyən edilmişdir ($x=1.1$ üçün $T_C \approx 210\text{K}$, $x=1.3$ üçün isə $T_C \approx 143\text{K}$ olur) (Şəkil 1) [6, 7].



Şəkil 2. $\text{CoGa}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ ($x = 1.1; 1.3$) maddələrinin $T = 10\text{ K}$ temperaturda $M(H)$ molyar maqnitlənməsinin sahədən asılılığı.

Ferritlər geniş histerezis halqası və yüksək koersitiv qüvvəsi olan maqnit cəhətdən sərt maqnit birləşmələri sinfinə aiddir. Histerezis halqasının forması və onun parametrləri ferromaqnitin tərkibindən, onun strukturundan və temperaturundan, nümunədə defektlərin paylanmasıdan, yəni onun istehsal texnologiyasından və sonrakı fiziki emalından (termal, mexaniki, maqnit və s.) asılıdır. Maqnitlənmə histeresisi halqasına uyğun olaraq maqnit materialının maksimum maqnitlənmə (M_s), qalıq maqnitlənmə (M_r), koersitiv qüvvəsi (H_c) kimi parametrləri müəyyən edilir. Şəkil 2-də $\text{CoGa}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ ($x = 1.1; 1.3$) birləşmələri üçün histerezis halqaları göstərilmişdir. Maqnit histerezis halqasının parametrləri və forması ferritlər üçün xarakterikdir. Verilən nümunələr aşağıdakı maqnit xüsusiyyətlərinə malikdir: $\text{CoGa}_{1.3}\text{Fe}_{0.7}\text{O}_4$ üçün $M_s = 1.9 \cdot 10^4 \text{ emu/mol}$; $M_r = 1.28 \cdot 10^4 \text{ emu/mol}$; $H_c = 25000\text{Oe}$, $\text{CoGa}_{1.1}\text{Fe}_{0.9}\text{O}_4$ üçün isə $M_s = 1.65 \cdot 10^4 \text{ emu/mol}$; $M_r = 1.05 \cdot 10^4 \text{ emu/mol}$; $H_c = 27000\text{Oe}$ olur.

10 K temperaturda ölçülən maqnitlənmənin sahədən asılılıq əyrisindən $H=40\text{ kOe}$ qiymətindən yuxarıda maqnitlənmənin doymağa meyli olduğunu görmək olar (şəkil 2). 10K temperaturda doyma maqnitlənmənin M_s kəmiyyəti ilə $\text{CoGa}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ ($x = 1.1; 1.3$) molekulu üçün n_B Bor maqnitonlarının sayı arasındakı əlaqə aşağıdakı kimi verilir:

$$n_B = \frac{M_s}{N_A \mu_B}$$

burada N_A – Avoqadro sabiti, μ_B – Bor maqnitonudur. Sonra da effektiv maqnit momenti üçün aşağıdakı qiymətləri alırıq: $\text{CoGa}_{1.3}\text{Fe}_{0.7}\text{O}_4$ üçün $\mu_{\text{eff}} = n_B \mu_B \approx 3.4 \mu_B$, $\text{CoGa}_{1.1}\text{Fe}_{0.9}\text{O}_4$ üçün isə $\mu_{\text{eff}} = n_B \mu_B \approx 2.95 \mu_B$ olur.

Çevrilmiş spinel ferritlər üçün yaranan maqnit momenti ikivalentli metal ionunun maqnit momentinə bərabərdir. Məlumdur ki, qeyri-maqnit ionlarının oktaedral yerlərdə yerləşən ionlarla əvəz edilməsi, eləcə də tetrahedral yerlərdə ionların əvəz edilməsi Kuri temperaturunun azalmasına səbəb olur və effektiv maqnit momentini azaldır. Bizim halda bu qiymət ($\text{CoGa}_{1.3}\text{Fe}_{0.7}\text{O}_4$ üçün $\mu_{\text{eff}} \approx 3.4 \mu_B$, $\text{CoGa}_{1.1}\text{Fe}_{0.9}\text{O}_4$ üçün isə $\mu_{\text{eff}} \approx 2.95 \mu_B$) CoFe_2O_4 maddəsi üçün effektiv momentdən azdır.

Qeyd edək ki, bəzi hallarda qəfəsin kristalloqrafik simmetriyası spinlərin dəqiq antiparalel yönəlməsinin qadağan edilməsinə gətirib çıxarır. Nəticədə, onlar bir-birinə kiçik bucaq altında yönəlir. Bu, hər bir atom üçün $0.01 \mu_B$ tərtibində maqnit momenti olan zəif ferromaqnetizmin meydana gəlməsinə səbəb olur [1, 14–16]. Kobalt ferritinin digər metalların ionları ilə aşqar edilməsi, bir qayda olaraq, materialın maqnit sərtliliyini artırmaq üçün o qədər də təsirli deyil. [17, 18, 19] işlərində göstərilmişdir ki, kobalt ferritinin strukturuna qalliumun daxil edilməsi doyma maqnitlənməsinin artmasına və materialın koersitiv qüvvəsinin azalmasına səbəb olur.

NƏTİCƏ

Molyar maqnit həssaslığının temperaturdan asılılığının təhlili göstərdi ki, CoGa_xFe_{2-x}O₄ (x=1.1; 1.3) maddələri üçün Kuri temperaturu (T_C) uyğun olaraq x=1.1 üçün ($T_C \approx 210\text{K}$, x = 1.3 üçün isə $T_C \approx 143\text{K}$) olan ferrimaqnitlərdir. 10 K temperaturda doyma maqnitlənmənin M_s kəmiyyəti ilə CoGa_xFe_{2-x}O₄ (x=1.1; 1.3) molekulu üçün n_B Bor maqnitonlarının sayı arasındakı əlaqə aşağıdakı kimi verilir: $n_B = \frac{M_s}{N_A \mu_B}$, burada N_A – Avoqadro sabiti, μ_B – Bor maqnitonudur. Sonra effektiv maqnit momenti üçün aşağıdakı qiymətilərini

alırıq: CoGa_{1.3}Fe_{0.7}O₄ üçün $\mu_{\text{eff}} = n_B \mu_B \approx 3.4 \mu_B$, CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ üçün isə $\mu_{\text{eff}} = n_B \mu_B \approx 2.95 \mu_B$ olur.

CoGa_xFe_{2-x}O₄ (x = 1.1; 1.3) maddələrinin $T=10\text{K}$ temperaturda $M(H)$ molyar maqnitlənməsinin sahədən asılılığında histerezis halqası aşkar edilmişdir. Maqnit histerezis halqasının parametrləri və forması ferritlər üçün xarakterikdir. Verilən nümunələr aşağıdakı maqnit xüsusiyyətlərinə malikdir: CoGa_{1.3}Fe_{0.7}O₄ üçün $M_s=1.9104$ $M_s = 1.9 \cdot 10^4$ emu/mol; $M_r = 1.28 \cdot 10^4$ emu/mol; $H_c = 25000\text{Oe}$, CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ üçün isə $M_s = 1.65 \cdot 10^4$ emu/mol; $M_r = 1.05 \cdot 10^4$ emu/mol; $H_c = 27000\text{Oe}$ olur.

- [1] J.Smit, Wijn H.P.J. Ferrites. Eindhoven: Philips Technical Library, 1959. 136–175 p.
- [2] C. Schmitz-Antoniak et al. Electric in-plane polarization in multiferroic CoFe₂O₄/BaTiO₃ nanocomposite tuned by magnetic fields. Nat. Commun. Nature Publishing Group, 2013. Vol. 4, № May. P. 1–8.
- [3] Sharifi Dehsari H., Asadi K. Impact of Stoichiometry and Size on the Magnetic Properties of Cobalt Ferrite Nanoparticles. J. Phys. Chem. C. 2018. Vol. 122, № 51. P. 29106–29121.
- [4] E. Fantechi et al. Exploring the effect of co doping in fine maghemite nanoparticles. J. Phys. Chem. C. 2012. Vol. 116, № 14. P. 8261–8270.
- [5] G. Muscas et al. Evolution of the magnetic structure with chemical composition in spinel iron 138 oxide nanoparticles. Nanoscale. Royal Society of Chemistry, 2015. Vol. 7, № 32. P. 13576– 13585.
- [6] M.V. Limaye et al. High coercivity of oleic acid capped CoFe₂O₄ nanoparticles at room temperature. J. Phys. Chem. B. 2009. Vol. 113, № 27. P. 9070–9076.
- [7] M Hamedoun, R Masrour, O Mounkachi, H El Moussaoui, A Benyoussef and E K Hlil. Physica Scripta, Volume 88, Number 1, 2013, 015704 (10pp).
- [8] J.Chand, S. Verma, P. Kumar, M. Singh. Structural. Electric and Dielectric Properties of MgFe₂O₄ Ferrite Processed by Solid State Reaction Technique. Inter. J. of theor. Appl. Sci. 2011; 3(2): 8-9.
- [9] K.C. Patil, M.S. Hegde, T. Rattan, S.T. Aruna Chemistry of Nanocrystalline Oxide Materials: Combustion Synthesis, Properties and Applications. World Scientific Publishing. 2008; 1-364.
- [10] S.K. Kulkarni. Nanotechnology: principles and practices. Capital publishing company. 2009.
- [11] Xiaohui Wang, Xiansong Liu, Xucai Kan, Shuangjiu Feng, Qingrong Lv & Yujie Yang. Characterization of microstructure and magnetic properties for Fe ion-doped CoGa₂O₄. Journal of Materials Science: Materials in Electronics volume 32, pages 24726–24735, 2021.
- [12] К.П. Белов. Магнитные превращения, Москва, ФМЛ, 1959, – 260 с.
- [13] К.П. Белов. Магнитотепловые явления в редкоземельных магнетиках, Москва, Наука, 1990. – 96 с.
- [14] Дж. Смут. Эффективное поле в теории магнетизма, Издательство «Мир» Москва 1968, 271с.
- [15] С. Крутичка. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов, том1, Издательство «Мир» Москва 1978, 353с.
- [16] Z.S. Teweldemedhin, R.L. Fuller, and M.Greenblatt. Magnetic Susceptibility Measurements of Solid Manganese Compounds with Evan's Balance, Journal of Chemical Education, v.73, p.906, 1996.
- [17] M.B. Mohamed, M. Yehia. Cation distribution and magnetic properties of nanocrystalline gallium substituted cobalt ferrite. J. Alloys Compd. 2014. Vol. 615. P. 181–187. 195.
- [18] M. Sumalatha et al. Raman and in-field 57Fe Mössbauer study of cation distribution in Ga substituted cobalt ferrite (CoFe_{2-x}Ga_xO₄). J. Alloys Compd. 2020. Vol. 837. P. 155478.
- [19] A.M. Abdullayev, İ.N. Ibrahimov, R. Ə. Əlizadə, M.C. Nəcəfzadə, A.İ. Əhmədov. CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ kristallarının maqnitlənməsi, maqnit həssaslığı və histerezi. AJP FİZİKA 2023 section C: Conference Türkiyə, s. 63-66.

A.M. Abdullayev, A.I. Ahmadov, M.C. Nəcəfzadə, İ.N. Ibrahimov, M.K. Xudayarova

MAGNETIZATION, MAGNETIC SUSCEPTIBILITY AND HYSTERESIS OF CoGa_xFe_{2-x}O₄ (x = 1.1; 1.3) CRYSTALS

Analysis of the temperature dependence of molar magnetic susceptibility showed that CoGa_xFe_{2-x}O₄ (x = 1.1; 1.3) are ferrimagnets with Curie temperatures (T_C) corresponding to ($T_C \approx 210\text{K}$ for x = 1.11, and $T_C \approx 143\text{K}$ for x = 1.3).

The relationship between the saturation magnetization M_s and the number of Bohr magnetons n_B for the $\text{CoGa}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ ($x = 1.1; 1.3$) molecule at a temperature of 10 K is given by: $n_B = \frac{M_s}{N_A \mu_B}$, where N_A – Avogadro's constant, μ_B – Bohr magneton. Then we obtain the following values for the effective magnetic moment: for $\text{CoGa}_{1.3}\text{Fe}_{0.7}\text{O}_4$ $\mu_{\text{eff}} = n_B \mu_B \approx 3.4 \mu_B$, and for $\text{CoGa}_{1.1}\text{Fe}_{0.9}\text{O}_4$ $\mu_{\text{eff}} = n_B \mu_B \approx 2.95 \mu_B$.

A hysteresis loop has been discovered in the field dependence of the molar magnetization $M(H)$ of $\text{CoGa}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ ($x = 1.1; 1.3$) materials at a temperature of $T = 10\text{K}$. The parameters and shape of the magnetic hysteresis loop are characteristic of ferrites. The given samples have the following magnetic properties: for $\text{CoGa}_{1.3}\text{Fe}_{0.7}\text{O}_4$, $M_s = 1.9 \cdot 10^4 \text{ emu/mol}$; $M_r = 1.28 \cdot 10^4 \text{ emu/mol}$; $H_c = 2500\text{Oe}$, and for $\text{CoGa}_{1.1}\text{Fe}_{0.9}\text{O}_4$, $M_s = 1.65 \cdot 10^4 \text{ emu/mol}$; $M_r = 1.05 \cdot 10^4 \text{ emu/mol}$; $H_c = 2700\text{Oe}$.

Qəbul olunma tarixi: 07.04.2025