

CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ KRİSTALLARININ MAQNİTLƏNMƏSİ, MAQNİT HƏSSASLIĞI VƏ HİSTEREZİSİ

A.M. ABDULLAYEV, İ.N. İBRAHİMOV, R.Ə. ƏLİZADƏ,
M.C. NƏCƏFZADƏ, A.İ. ƏHMƏDOV

Azərbaycan Elm və Təhsil nazirliyi, Fizika İnstitutu

H. Cavid pr. 131, AZ-1143 Bakı

E-mail: aqaadil@gmail.com

5-400 K intervalında alınan maqnitlənmə $M(T)$ və molyar maqnit qavrayıcılığının $\chi(T)$ temperaturdan asılılığı CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ maddəsinin ~210K Kūri temperaturu olan ferrimaqnit olduğunu müəyyən etməyə imkan verir. 10 K temperaturda doyma maqnitlənmənin M_s kəmiyyəti ilə CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ 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 qiymətini alır: $\mu_{\text{eff.}} = n_B \mu_B \approx 2.95 \mu_B$.

Maqnitlənmənin sahədən $M(H)$ asılılığının ölçülməsi nəticəsində CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ nümunəsində güclü ferrimaqnetizmin mövcudluğunu göstərən maqnit histerezisi aşkar edilmişdir.

Açar sözlər: Maqnitlənmə, CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄, Qavrayıcılıq, Kūri temperaturu.

PACS: 75.50.Bb, 75.50.Dd, 75.60.Ej

GİRİŞ

Məlumdur ki, CoFe₂O₄ kobalt ferriti fəza qrupu $Fd\bar{3}m$ olan ters 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 alt qəfəs 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 sət 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

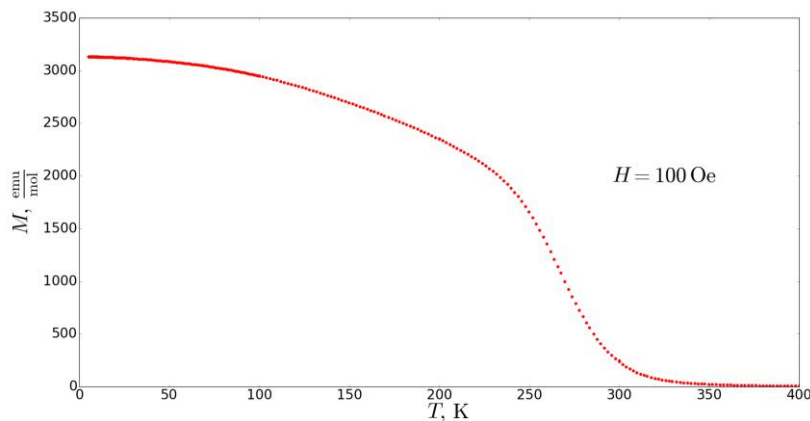
Bu yazıda ters çevrilmiş spinel strukturlu ($Fd\bar{3}m$) CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ polikristal birləşməsinin maqnit tədqiqatlarının (maqnitlənmənin, maqnit həssaslığının temperaturdan asılılığının və maqnitlənmənin sahədən asılılığının ölçülməsi) nəticələri təqdim olunur.

Bu işin məqsədi 4.2-400K geniş temperatur intervalında CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ maddəsinin maqnit xassələrini öyrənməkdir.

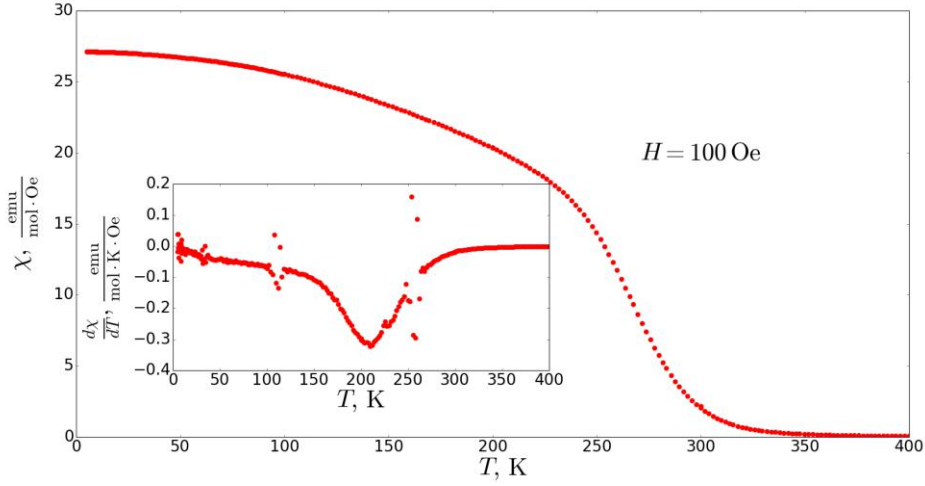
Yuxarıdakı birləşmənin χ maqnit həssaslığı və M maqnitlənməsi 4.2-400 K temperatur intervalında H maqnit sahəsinin qiyməti 50 kOe-ə qədər olan SQUID–maqnitometrində (SQUID MPMS5 magnetometer from Quantum Design) ölçülmüşdür.

Şəkil 1-də $H=100$ Oe maqnit sahəsində CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ üçün $M(T)$ molyar maqnitlənmənin temperaturdan asılılığı göstərilmişdir.

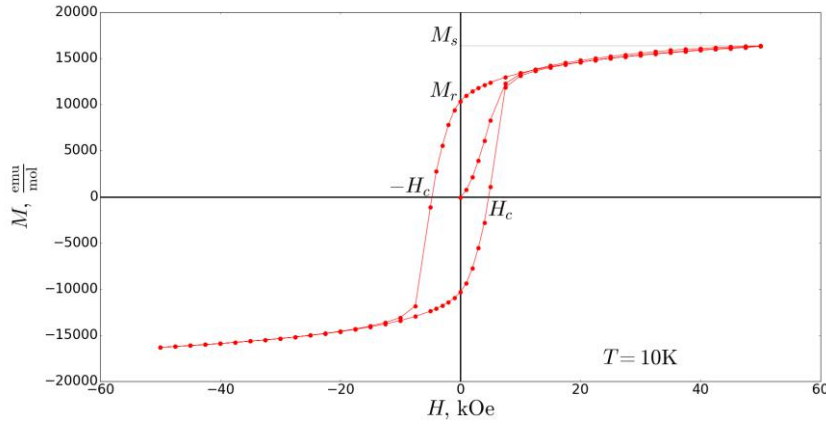
CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ üçün $\chi(T)$ maqnit qavrayıcılığının və onunun $\frac{d\chi}{dT}(T)$ törəməsinin temperaturdan asılılığı şəkil 2-də göstərilmişdir.



Şəkil 1. CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ maddəsinin $H = 100$ Oe maqnit sahəsində $M(T)$ molyar maqnitlənməsinin temperaturdan asılılığı ($m = 28.6 \cdot 10^{-6}$ kg, $M_{\text{mol}} = 249.890 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$).



Şəkil 2. CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ materialının $H = 100$ Oe maqnit sahəsində $\chi(T)$ maqnit qavrayıcılığının və onunun $\frac{d\chi}{dT}(T)$ törəməsinin temperaturdan asılılığı ($m = 28.6 \cdot 10^{-6}$ kg, $M_{\text{mol}} = 249.890 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$).



Şəkil 3. CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ maddəsinin $T = 10$ K temperaturda $M(H)$ molyar maqnitlənməsinin sahədən asılılığı ($m = 28.6 \cdot 10^{-6}$ kg, $M_{\text{mol}} = 249.890 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$).

CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ maddəsinin ferrimaqnit Küri temperaturu (T_C) qavrayıcılığın $\frac{d\chi}{dT}(T)$ törəməsinin temperatur asılılığından müəyyən edilmişdir ($T_C \approx 210$ K) (Şəkil 2) [6, 7].

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 paylanması, 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 3-də CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ birləşməsi üçün histerezis halqası göstərilmişdir. Maqnit histerezis halqasının parametrləri və forması ferritlər üçün xarakterikdir. Verilən nümunə aşağıdakı maqnit xüsusiyyətlərinə malikdir: $M_s = 1.65 \cdot 10^4$ emu/mol; $M_r = 1.05 \cdot 10^4$ emu/mol; $H_c = 27000$ e.

10 K temperaturda ölçülən maqnitlənmənin sahədən asılılıq əyrisindən $H = 40$ kOe qiymətindən yuxarıda maqnitlənmənin doymağa meyilli olduğunu gör-

mək olar (şəkil 3). 10 K temperaturda doyma maqnitlənmənin M_s kəmiyyəti ilə CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ 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 qiymət alırıq:

$$\mu_{\text{eff.}} = n_B \mu_B \approx 2.95 \mu_B$$

Çevrilmiş şpinel ferritlər üçün yaranan maqnit momenti ikivalentli metal ionunun maqnit momentinə bərabərdir. Məlumdur ki, qeyri-maqnit ionlarının oktaedral yerlərdə yerləşən ionlarla əvəz edilməsi, eləcə də tetraedral yerlərdə ionların əvəz edilməsi Küri temperaturunun azalmasına səbəb olur və effektiv maqnit momentini azaldır. Bizim halda bu qiymət ($\mu_{\text{eff.}} \approx 2.95 \mu_B$) CoFe₂O₄ 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

0.01μ_B tərtibində maqnit momenti olan zəif ferromaqnetizmin meydana gəlməsinə səbəb olur [1, 14–16].

Kobalt ferritin digər metalların ionları ilə aşqar edilməsi, bir qayda olaraq, materialın maqnit sərtliyini artırmaq üçün o qədər də təsirli deyil. [17, 18] işlərində göstərilmişdir ki, kobalt ferritin strukturuna qalliumun daxil edilməsi doyma maqnitlənməsinin artmasına və materialın koersitiv qüvvəsinin azalmasına səbəb olur.

NƏTİCƏ

Molyar maqnit həssashlığının temperaturdan asılılığının təhlili göstərdi ki, CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ Kürü temperaturu 210 K olan ferrimaqnitdir. 10 K temperaturda

doyma maqnitlənmənin M_s kəmiyyəti ilə CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ 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 qiymətini alırıq: $\mu_{\text{eff}} = n_B \mu_B \approx 2.95 \mu_B$.

CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ maddəsinin T=10K temperaturda $M(H)$ molyar maqnitlənməsinin sahədən asılılığında histerezis halqası aşkar edilmişdir. Maqnit histerezis halqasının parametrləri və forması ferritlər üçün xarakterikdir. Verilmiş nümunə aşağıdakı maqnit xassələrinə malikdir:

$M_s = 1.65 \cdot 10^4$ emu/mol; $M_r = 1.05 \cdot 10^4$ emu/mol; $H_c = 27000$ e.

- [1] J. Smit, H.P.J.Wijn. 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] H. Sharifi Dehsari, K. Asadi. J. Phys. Chem. C. 2018, vol. 122, № 51, p. 29106–29121.
- [4] E. Fantechi et al. 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. J. Phys. Chem. B. 2009, vol. 113, № 27, p. 9070–9076.
- [7] M Hamedoun, R Masrouf, 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. Смит. Эффективное поле в теории магнетизма, Издательство «Мир» Москва 1968, 271с.
- [15] С. Круничка . 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.

НАМАГНИЧЕННОСТЬ, МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ И ГИСТЕРЕЗИС КРИСТАЛЛОВ CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄

Полученные в интервале 5—400 К температурные зависимости намагниченности $J(T)$ и молярной магнитной восприимчивости $\chi(T)$ позволила установить, что CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ является ферримагнетиком, температура Кюри которого равна ~210К. Связь между величиной насыщения намагниченности M_s при 10 К и числом магнетонов Бора n_B на одну молекулу CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ дается выражением $n_B = \frac{M_s}{N_A \mu_B}$, где N_A – число Авогадро, μ_B – магнетон Бора. Тогда получим следующее выражение для эффективного магнитного момента $\mu_{\text{eff}} = n_B \mu_B \approx 2.95 \mu_B$.

Измерения полевых зависимостей намагниченности выявили магнитного гистерезиса, что указывает на наличие в образце CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ сильного ферримагнетизма.

**MAGNETIZATION, MAGNETIC SUSCEPTIBILITY AND HYSTERESIS
OF CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ CRYSTALS**

The temperature dependences of magnetization $M(T)$ and molar magnetic susceptibility $\chi(T)$ obtained in the range 5–400 K made it possible to establish that CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ is a ferrimagnet with a Curie temperature of ~210 K. The relationship between the saturation value of the magnetization M_s at 10 K and the number of Bohr magnetons n_B per CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ molecule is given by $n_B = \frac{M_s}{N_A \mu_B}$, where N_A is the Avogadro number and μ_B is the Bohr magneton. Then we get the following expression for the effective magnetic moment $\mu_{\text{eff}} = n_B \mu_B \approx 2.95 \mu_B$.

Measurements of the field dependences of the magnetization revealed a magnetic hysteresis, which indicates the presence of strong ferrimagnetism in the CoGa_{1.1}Fe_{0.9}O₄ sample.