

^{60}Co GAMMA KVANTLARINING BARIY GEKSAFERRIT ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) KERAMIKASINING MAGNIT XUSUSIYATLARIGA TA'SIRI

Shavqiyeva Dilbar Burxon qizi,

Samarqand davlat universiteti

Muhandislik fizikasi instituti magistranti

email: shavqiyevadilbar@mail.ru

ANNOTATSIYA

Mazkur maqolada qattiq fazali sintez usuli yordamida olingan bariy geksaferrit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) namunalarining ^{60}Co manbaidan olingan turli dozadagi gamma-kvantlar bilan nurlantirilgandan so'ng magnit hamda strukturaviy xossalari yuz bergan o'zgarishlar kompleks tadqiq qilingan. Eksperimental o'lchashlar nurlanishdan oldin va keyin Cryogenic S700 SQUID magnitometri va rentgen-faza tahlili (XRD) usullari yordamida olib borildi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, gamma-nurlanish dozasi bilan oshishi bilan to'yinish magnitlanishi (M_s) 52.5 emu/g dan 40.2 emu/g gacha (dastlabki dozalarda) va koersitiv kuch (H_c) 1060 Oe dan 420 Oe gacha keskin kamayishi, shuningdek material fazaviy tarkibining qayta taqsimlanishi (ikkilamchi fazalarning kamayib, asosiy fazaning ortishi) kuzatildi. Kuzatilgan ushbu magnit o'zgarishlar kristall panjarada gamma nurlar ta'sirida hosil bo'lgan kislorod vakansiyalari va Fe-O-Fe superalmashinuv ta'sirining zaiflashuvi bilan asoslab berildi.

Kalit so'zlar: Bariy geksaferrit, gamma-nurlanish, SQUID magnitometr, to'yinish magnitlanishi, koersitiv kuch, kislorod vakansiyasi, radiatsion nuqsonlar, superalmashinuv o'zaro ta'siri.

АННОТАЦИЯ

В данной статье комплексно исследованы изменения магнитных и структурных свойств керамических образцов бариевого гексаферрита ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$), полученных методом твердофазного синтеза, после облучения гамма-квантами источника ^{60}Co различными дозами. Экспериментальные измерения до и после облучения проводились с использованием СКВИД-магнитометра Cryogenic S700 и рентгенофазового анализа (РФА). Результаты показали, что с увеличением дозы гамма-излучения наблюдается резкое снижение намагниченности насыщения (M_s) с 52.5 эме/г до 40.2 эме/г и коэрцитивной силы (H_c) с 1060 Э до 420 Э, а также перераспределение фазового состава (уменьшение вторичных фаз и увеличение основной фазы). Наблюдаемые магнитные изменения объясняются образованием кислородных

вакансий в кристаллической решетке под действием гамма-лучей и ослаблением сверхобменного взаимодействия Fe-O-Fe

Ключевые слова: Бариевый гексаферрит, гамма-излучение, СКВИД-магнитометр, намагниченность насыщения, коэрцитивная сила, кислородная вакансия, радиационные дефекты, сверхобменное взаимодействие.

ABSTRACT

In this article, the changes in the magnetic and structural properties of barium hexaferrite ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) ceramic samples, synthesized by the solid-state reaction method, were comprehensively investigated after irradiation with various doses of ^{60}Co gamma quanta. Experimental measurements before and after irradiation were carried out using a Cryogenic S700 SQUID magnetometer and X-ray phase analysis (XRD). The results showed that with an increase in the gamma radiation dose, a sharp decrease in saturation magnetization (M_s) from 52.5 emu/g to 40.2 emu/g and coercive force (H_c) from 1060 Oe to 420 Oe is observed, along with a redistribution of the phase composition (a decrease in secondary phases and an increase in the main phase). The observed magnetic alterations are attributed to the generation of oxygen vacancies in the crystal lattice induced by gamma rays and the subsequent weakening of the Fe-O-Fe superexchange interaction.

Keywords: Barium hexaferrite, gamma radiation, SQUID magnetometer, saturation magnetization, coercive force, oxygen vacancy, radiation defects, superexchange interaction.

KIRISH

Hozirgi zamonaviy qattiq jismlar fizikasi va materialshunoslikning eng muhim va tez rivojlanayotgan yo'nalishlaridan biri — bu turli ekstremal sharoitlarda, xususan, radiatsion muhitda o'z xususiyatlarini saqlab qola oladigan funktsional magnit materiallarni o'rganish va yaratishdir. Bu borada ferritlar, ayniqsa M-tipdagi geksagonal ferritlar ($\text{MFe}_{12}\text{O}_{19}$, bu yerda $\text{M}=\text{Ba}$, Sr , Pb) yuqori magnit-kristall anizotropiyasi, sezilarli koersitiv kuchi, kimyoviy va termik barqarorligi hamda nisbatan arzon ishlab chiqarish texnologiyasiga egaligi sababli ilmiy izlanishlar markazida turibdi. Bariy geksaferrit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) o'zining ajoyib xossalari bilan doimiy magnitlar tayyorlashda, mikroto'lqinli yutgich qurilmalarda, yuqori chastotali radioelektronikada va ma'lumotlarni yozish/saqlash tizimlarida keng qo'llaniladi.

So'nggi yillarda sun'iy yo'ldoshlar, kosmik texnikalar, yadro energetikasi reaktorlari va yuqori energiyali zarralar tezlatkichlarida qo'llaniladigan elektron komponentlarning radiatsiyaga chidamliligini oshirish dolzarb masalaga aylandi. Gamma-kvantlar kabi yuqori energiyali ionlashtiruvchi nurlanishlar to'g'ridan-to'g'ri

materialning kristall panjarasiga ta'sir qilib, kationlar va anionlarning o'z o'rnidan siljishiga, Frenkel juftliklari (vakansiya va tugunlararo atomlar) hosil bo'lishiga olib keladi. Ferritlarda magnit tartibot asosan temir ionlari (Fe^{3+}) orasidagi kislorod ionlari (O^{2-}) orqali amalga oshuvchi superalmashinuv o'zaro ta'siriga (super-exchange interaction) asoslangan. Shuning uchun, kristall panjarada hosil bo'ladigan kichik o'zgarishlar ham materialning makroskopik magnit parametrlariga (to'yinish magnitlanishi, koersitiv kuch, qoldiq magnitlanish) kuchli ta'sir ko'rsatadi. Ushbu tadqiqot ishining maqsadi qattiq fazali sintez usulida olingan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ keramikasining ^{60}Co manbaidan tarqaluvchi gamma kvantlar ta'siridagi xulq-atvorini, kristall tuzilishi hamda magnit xossalarida yuzaga keladigan o'zgarishlar mexanizmini ochib berishdan iborat.

NAZARIY ASOSLAR VA ADABIYOTLAR SHARHI

2.1. Bariy geksaferritining kristall tuzilishi

Geksaferritlar bir qancha strukturaviy bloklarning c-o'qi bo'ylab ketma-ket joylashuvidan tashkil topgan murakkab kristall tuzilishga ega. $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ magnetoplumbit tipidagi geksagonal strukturaga ega bo'lib, u $P6_3/mmc$ fazoviy simmetriya guruhiga mansubdir. Uning elementar yacheykasi ikkita formulaviy birlikdan iborat bo'lib, 64 ta ionni o'z ichiga oladi. Tuzilish S-blok (Fe_6O_8)²⁺ (spinel bloki) hamda R-blok ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$)²⁻ (geksagonal blok) larning RSR^*S^* ketma-ketligida joylashishidan iborat (* belgisi blokning c-o'qi atrofida 180°ga burilganligini bildiradi).

Materialdagi 24 ta Fe^{3+} ionlari besh xil kristallografik pozitsiyada taqsimlanadi:

- **Uchta oktaedrik pozitsiya:** 12k (yuqoriga spinli), 2a (yuqoriga spinli), 4f₂ (pastga spinli).
- **Bitta tetraedrik pozitsiya:** 4f₁ (pastga spinli).
- **Bitta bipiramidal pozitsiya:** 2b (yuqoriga spinli).

Keltirilgan spin yo'nalishlarining Gorter modeli bo'yicha kollinear joylashuvi natijasida $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ materialida kuchli ferrimagnetizm yuzaga keladi. Sof kristall strukturadagi barqarorlik uning panjara parametrlari bilan belgilanadi ($a = 5.89 \text{ \AA}$, $c = 23.18 \text{ \AA}$).

2.2. Magnit anizotropiyasi va radiatsion ta'sir

Bariy geksaferrit o'zining yuqori uniaksial (bir o'qli) magnit anizotropiyasi bilan ajralib turadi. Anizotropiya energiyasi quyidagi ifoda orqali tavsiflanadi:

$$E = K_0 + K_1 \sin^2\phi + K_2 \sin^4\phi + \dots$$

Bunda K_1 va K_2 — anizotropiya konstantalari, ϕ — magnitlanish vektori va c-o'qi orasidagi burchak. M-tip ferritlarda xona haroratida $K_1 > 0$ va ancha katta qiymatga ega bo'lib, oson magnitlanish yo'nalishi c-o'qi bo'ylab yo'nalganligini

ta'minlaydi. Gamma nurlanish kristallga kirib borganda asosan Kompton effekti va fotoelektr yutilish hisobiga ikkilamchi elektronlarni hosil qiladi. Bu elektronlar o'z navbatida panjara tugunlaridagi atomlarni urib chiqarishi, ayniqsa massa jihatdan yengil bo'lgan kislorod atomlarini o'z o'rnidan siljitib, kislorod vakansiyalarini shakllantirishi mumkin.

3. TADQIQOT OBYEKTI VA METODOLOGIYASI

Namunalarni tayyorlash: Tadqiqot obyekti hisoblangan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ namunalari M.V. Lomonosov nomidagi Moskva davlat universitetida (MDU) qattiq fazali sintez (keramika usuli) usuli yordamida tayyorlandi. Bunda boshlang'ich komponentlar sifatida yuqori tozalikdagi BaCO_3 va Fe_2O_3 kukunlari stexiometrik nisbatda aralashtirildi, presslandi va uzoq vaqt davomida $1000^\circ\text{C} - 1200^\circ\text{C}$ harorat oralig'ida sinterlandi.

Gamma nurlanish qurilmasi: Olingan namunalar O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi Yadro fizikasi institutida joylashgan, yopiq turdagi radiatsion manba — basseyn tipidagi ^{60}Co gamma-qurilmasida nurlantirildi. Ushbu qurilma biologik himoya va sovitish vositasi sifatida suv qatlamidan foydalanadi. Nurlantirish ishlari maksimal doza quvvati 212.6 R/s bo'lgan markaziy kanalda olib borildi. Namunalar $0.8 \cdot 10^6 \text{ R}$ dan $17.0 \cdot 10^6 \text{ R}$ gacha bo'lgan turli dozalarda ishlovdan o'tkazildi.

Magnit va strukturaviy o'lchovlar: Strukturaviy o'zgarishlarni aniqlash uchun namunalarning rentgen-faza tahlili (XRD) nurlanishdan oldin va keyin amalga oshirildi. Magnit parametrlarni o'lchash Buyuk Britaniyada ishlab chiqarilgan o'ta yuqori sezgirlikdagi Cryogenic S700 SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) magnitometridan (VSM moduli bilan jihozlangan) foydalanilgan holda bajarildi. O'lchovlar tashqi magnit maydoni 0 dan 7 T gacha o'zgartirilgan holda amalga oshirildi. SQUID o'ta o'tkazuvchanlik va Jozefson effekti prinsiplariga asoslanib, 10^{-15} T aniqlikkacha bo'lgan magnit oqimi o'zgarishlarini qayd eta oladi.

4. NATIJALAR VA ULARNING MUHOKAMASI

4.1. Gamma kvantlarning fazaviy tarkibga ta'siri

Namunalarning kristall tuzilishi va fazaviy holatida gamma-kvantlar ta'sirida yuz bergan transformatsiyalar rentgenogrammlar asosida hisoblab chiqildi. 1-jadvalda nurlanmagan va $2 \cdot 10^7 \text{ R}$ dozasida gamma nurlangan $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ namunalarning fazaviy tarkibi berilgan.

1-jadval. Bariy geksaferritlarining nurlanish ta'siridagi fazaviy tarkibi dinamikasi

Faza nomi	Kimyoviy formulasi	Nurlanmag an namuna (hajm %)	Nurlangan namuna (2×10 ⁷ R, hajm %)	Fazaviy o'zgarish
Bariy geksaferrit	BaFe ₁₂ O ₁₉	57	61	Ortishi (+4%)
Gematit	Fe ₂ O ₃	6	27	Keskin ortish (+21%)
Murakkab faza	Ba ₂ Fe ₃₀ O ₄₆	31	7	Keskin kamayish (-24%)
Magnemit/Magnetit	Fe _{2.957} O ₄	6	6	O'zgarmagan (0%)

Jadval tahlilidan ko'rinib turibdiki, sintez qilingan dastlabki namunada ma'lum miqdorda ikkilamchi fazalar (Ba₂Fe₃₀O₄₆ va Fe₂O₃) mavjud bo'lgan. Gamma nurlanish ta'sirida esa juda qiziqarli radiatsion-kimyoviy jarayon sodir bo'lgan. 2*10⁷ R dozasiida ikkilamchi Ba₂Fe₃₀O₄₆ faza ulushi 31% dan 7% gacha keskin pasaygan. Buning hisobiga maqsadli asosiy faza BaFe₁₂O₁₉ miqdori 57% dan 61% gacha va alohida temir oksidi Fe₂O₃ fazasi 6% dan 27% gacha ortgan. Bu hodisa shuni anglatadiki, yuqori energiyali gamma nurlar beqarorroq bo'lgan murakkab bariy temir oksidi tuzilmalarini barqaror bo'lgan magnetoplumbit fazaga va gematitga qisman parchalanishini (radiatsion stimulyatsiyalangan fazaviy o'tish) ta'minlagan.

4.2. Magnit parametrlarning dozaga bog'liqligi

Turli dozalarda nurlantirilgan namunalarning magnitlanish egri chiziqlari tahlil qilindi. To'yinish magnitlanishi (M_s), qoldiq magnitlanish (M_r) va koersitiv kuch (H_c) qiymatlarining radiatsiya dozasiiga bog'liqligi quyidagi 2-jadvalda umumlashtirilgan.

2-jadval. Gamma-kvantlar bilan nurlantirilgan BaFe₁₂O₁₉ geksaferritining asosiy magnit parametrlari

Nurlanish dozasi (×10 ⁶ R)	Massa m (mg)	To'yinish magnitlanishi M _s (emu/g)	Qoldiq magnitlanish M _r (emu/g)	Koersitiv kuch H _c (Oe)
(Nurlanmagan)	70.65	52.5	23.8	1060

Nurlanish dozasi ($\times 10^6$ R)	Massa m (mg)	To'yinish magnitlanishi M_s (emu/g)	Qoldiq magnitlanish M_r (emu/g)	Koersitiv kuch H_c (Oe)
0.8	62.20	40.2	24.5	794
2.1	71.20	44.5	19.0	420
5.0	79.00	47.4	23.4	663
10.0	104.70	49.6	18.8	451
17.0	74.70	48.9	19.8	523

Eksperimental natijalardan ko'rinib turibdiki, kichik nurlanish dozalaridayoq magnit xossalari keskin o'zgarishga uchraydi. Dastlabki 0.8×10^6 R nurlanishida to'yinish magnitlanishi 52.5 emu/g dan birdaniga 40.2 emu/g gacha (deyarli 23% ga) pasayadi. Nurlanish dozasi ortib borishi bilan M_s asta-sekin tiklanib, 10.0×10^6 R dozasi maksimal 49.6 emu/g ga yetadi va undan keyingi nurlanishlarda (17.0×10^6 R) shu qiymat atrofida barqarorlashadi (48.9 emu/g).

Xuddi shunday dinamika, ammo undan ham radikalroq tarzda koersitiv kuch (H_c) qiymatida kuzatiladi. Nurlanmagan namunada 1060 Oe bo'lgan yuqori koersitiv kuch, 2.1×10^6 R dozada 420 Oe ga tushib ketgan (2.5 baravarga pasayish). So'ngra u qisman tebranib, yuqori dozalarda 500 Oe atrofida saqlanib qolgan.

Mexanizmni fizik asoslash:

Ushbu o'zgarishlarning fizik tabiati birinchi navbatda gamma nurlanishning ionlashtiruvchi ta'siri ostida panjarada kislorod vakansiyalarining hosil bo'lishi bilan bog'liq. Geksaferritlarda temir ionlari kislorod anioni ishtirokida $Fe^{3+} - O^{2-} - Fe^{3+}$ ko'rinishidagi bog'lanishlarni hosil qiladi va shu orqali superalmashinuv o'zaro ta'sir amalga oshadi.

• **Pasayish bosqichi:** Kichik dozalarda nurlanish panjaradan kislorod ionlarini faol ravishda siqib chiqaradi. Vakansiyalar hosil bo'lishi superalmashinuv bog'lanish zanjirini uzadi, natijada spinlarning kollinear (parallel) joylashuvi buzilib, burchakli yoki tartibsiz magnit struktura (kantet spin holati) vujudga keladi. Bu esa yig'indi magnit momentning, ya'ni to'yinish magnitlanishining kamayishiga, shuningdek domen devorlari harakatini yengillashtirib, koersitiv kuchning tushishiga olib keladi. Bunga qo'shimcha ravishda elektr neytrallikni saqlash maqsadida ba'zi Fe^{3+} ionlari magnit momenti kichikroq bo'lgan Fe^{2+} holatiga o'tishi mumkin.

• **Barqarorlashish bosqichi:** Yuqori dozalarda ($> 5.0 \times 10^6$ R) kristall ichida harorat mikro-lokal hududlarda ortishi va hosil bo'lgan Frenkel nuqsonlarining

(vakansiya va tugunlararo atomlar) qayta taqsimlanishi hamda o'zaro rekombinatsiya qilishi jarayoni kuchayadi. Shu bilan birga, 1-jadvalda ko'rilganidek, ikkilamchi parazit faza parchalanib, sof $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ulushining ortishi magnit parametrlarning (ayniqsa M_s) yana qisman tiklanishiga xizmat qilgan.

5. XULOSA

Olingan eksperimental natijalarni va nazariy tahlillarni umumlashtirib, quyidagi yakuniy xulosalarga kelindi:

1. M.V. Lomonosov nomidagi Moskva davlat universitetida sintez qilingan bariy geksaferrit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) keramikasining ^{60}Co manbaidan olingan gamma kvantlar ta'siriga yuqori sezgirligi aniqlandi. Materialning magnit parametrlari radiatsiya dozasiga noxiziqli bog'liqlikni namoyon qildi.

2. Rentgen-faza tahlillari gamma nurlanish nafaqat nuqtaviy nuqsonlar yaratishini, balki makroskopik darajada fazaviy transformatsiyalarni ham stimulyatsiya qilishini ko'rsatdi: nurlanish ta'sirida murakkab $\text{Ba}_2\text{Fe}_{30}\text{O}_{46}$ fazasining hajm ulushi keskin kamayib (31% dan 7% gacha), asosiy barqaror geksaferrit fazasi ulushi oshdi (57% dan 61% gacha).

3. Gamma kvantlarning ta'siri natijasida magnit xarakteristikalarining eng katta degradatsiyasi $0.8 - 2.1 \cdot 10^6$ R doza oralig'ida kuzatildi (koersitiv kuch 1060 Oe dan 420 Oe gacha tushdi). Bunga asosiy sabab sifatida nurlanish energiyasi hisobiga yuzaga kelgan kislorod vakansiyalari va ularning Fe-O-Fe superal mashinuv bog'lanishlarini kuchsizlantirishi ko'rsatildi.

4. Nurlanishning katta dozalarida ($10-17 \cdot 10^6$ R) radiatsion nuqsonlarning qisman anilyatsiyasi (rekombinatsiyasi) va fazaviy tozalanish hisobiga magnitlanish ko'rsatkichlari barqarorlasha boshlashi ilmiy jihatdan asoslandi. Olingan natijalar kosmik apparatlar, yuqori chastotali elektron qurilmalar va yadro reaktorlari yaqinida ishlovchi sensorlar uchun radiatsiyaga chidamli magnit materiallar ishlab chiqishda muhim amaliy qiymatga ega.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Went J.J., Rathenau G.W., Gorter E.W., van Oosterhout G.W. Hexagonal Iron Oxide Compounds as Permanent Magnet Materials // *Philips Tech. Rev.* – 1952. – Vol. 13. – P. 194-208.
2. Pullar R.C. Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics // *Progress in Materials Science.* – 2012. – Vol. 57. – P. 1191-1334.
3. Kojima H. Magneto-plumbite type ferrites // *Ferromagnetic Materials* / Ed. by E.P. Wohlfarth. – North-Holland, 1982. – Vol. 3. – P. 305-391.

4. Obradors X., Collomb A., Berry F.J., et al. Structural and magnetic properties of BaFe₁₂O₁₉ M-type hexaferrite // *J. Phys. C: Solid State Phys.* – 1985. – Vol. 18. – P. 681-703.
5. Shirk B.T., Buessem W.R. Temperature Dependence of M_s and K_1 of BaFe₁₂O₁₉ // *J. Appl. Phys.* – 1969. – Vol. 40. – P. 1294-1296.
6. Granovsky A.B., Shavqiyeva D., et al. Effect of gamma irradiation on structural and magnetic parameters of M-type hexaferrites // *J. Supercond. Nov. Magn.* – 2024. – Vol. 37. – P. 1125-1132.
7. Costantini J.M., et al. Radiation damage in hexaferrites by high-energy heavy ions // *J. Appl. Phys.* – 2008. – Vol. 104. – P. 073504.
8. Clinard F.W., Hobbs L.W. Radiation Effects in Non-Metals // *Physics of Radiation Effects in Crystals.* – Elsevier, 1986. – P. 387-471.
9. Clarke J., Braginski A.I. *The SQUID Handbook.* – Wiley-VCH, 2004. – 417 p.
10. Gorter E.W. Saturation Magnetization and Crystal Chemistry of Ferrimagnetic Oxides // *Philips Res. Rep.* – 1954. – Vol. 9. – P. 295-320.