

Висмутээр хольцолсон нано хэмжээст $\text{Bi}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ магнетит нэгдлийн бүтэц, физик шинж чанарын судалгаа

Б. Буянхишиг^{1,2}, Б. Хонгорзул², А. Уянга², Н. Жаргалан², П. Түвшинтөр³,
Г.Г. Горох⁴, Г. Эрдэнэ-Очир^{1,*}

¹Физикийн тэнхим, Байгалийн ухааны салбар, Шинжлэх ухааны сургууль, Монгол улсын их сургууль

²Функционал материалын лаборатори, Материал судлалын салбар, Физик, технологийн хүрээлэн, ШУА

³Байгаль-Эх лицей ахлах сургууль, Монгол улсын их сургууль

⁴Беларусийн Мэдээлэл, радиоэлектроникийн улсын их сургууль, Беларусь

Хураангуй: Энэхүү ажлаар урвуу шпинель бүтэцтэй, нанохэмжээст $\text{Bi}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($x=0.0-0.3$) нэгдлийн физик шинж чанарын судалгааг хийж гүйцэтгэлээ. $x=0$ үед урвуу шпинель бүтэцтэй магнетит (Fe_3O_4) нэгдлийг хам тунадасжуулах арга ашиглан нэмэлт хольцгүй, цэврээр гарган авав. Fe_3O_4 нанопартиклыг Bi -ээр хольцлоход торын эзэлхүүн $581.56 \text{ \AA}^3$ -ээс $586.80 \text{ \AA}^3$ болон тэлсэн. Мөн $\text{Bi}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ нэгдлийн FTIR спектрт 904 ба 1325 см^{-1} долгион тоонуудад Bi-O-Bi холбооны валентын хэлбэлзэлд харгалзах пикүүд илэрсэн. Bi хольцын нөлөөгөөр Fe_3O_4 -н хориотой бүсийн өргөн 1.78 эВ -ээс 1.50 эВ хүртэл буурч, электрон дамжууллыг нэмэгдүүлж байгааг тогтоов. Эдгээр үр дүнгүүд магнетитийн кристаллын орон тор дахь төмрийн атомыг висмутийн атом халж суусныг илтгэж байна.

Түлхүүр үгс: магнетит (Fe_3O_4), висмут (Bi), хольц, хориотой бүсийн энергийн өргөн, хагас дамжуулагч наноматериал

■ ОРШИЛ

Соронзон материалуудын гол төлөөлөгчдийн нэг болох төмрийн оксид нь гематит ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), магемит ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), магнетит (Fe_3O_4) гэх гурван үндсэн хэлбэрээр байгальд оршдог. Эдгээрээс “Соронзон гур” гэж нэрлэгдэх Fe_3O_4 нь хүчтэй соронзон чанар, өндөр ханалтын соронзжилт [1] зэрэг онцлог чанартай юм. Энэ нэгдэл нь урвуу шпинел кристалл бүтэцтэй бөгөөд тетраэдр байршил (А байрлал) -д гурван валенттай төмрийн (Fe^{3+}) катион, октаэдр байршил (В байрлал) -д хоёр болон гурван валенттай төмөр (Fe^{3+} & Fe^{2+}) -ийн катионууд хослон суудаг [2]. Мөн Fe_3O_4 нь $120-840 \text{ К}$ мужид феррисоронзон шинж чанартай ба хориотой бүсийн өргөн $\sim 2.2 \text{ эВ}$ бүхий хагас дамжуулагч материал юм [3]. Fe_3O_4 -ийг золь-гел, хатуу төлөвийн урвал, урвуу мицелл, хэт авианы арга, гидротермаль болон хам тунадасжуулах зэрэг олон синтезийн аргаар гарган авах боломжтой [4-9]. Эдгээр аргууд дундаас хам тунадасжуулах арга нь синтезлэхэд хялбар, өндөр даралт болон температур шаардахгүй, дээжийн гарц өндөртэй зэрэг давуу талтай тул соронзон материал гарган авахад өргөн хэрэглэгддэг [1,10]. Магнетит нэгдлийг хольц элементийн тусламжтайгаар шинж чанарыг нь сайжруулан олон салбарт хэрэглэж байна. Висмутээр хольцолсон магнетитийн судалгаа нь катализатор, хагас дамжуулагчийн салбарт хий мэдрэгчийн элемент мөн бохир ус цэвэрлэх болон будагч бодисыг

задлах, супер конденсаторт цаашлаад спинтроникийн салбарт эрчимтэй судлагдсаар байна [11-17].

Энэхүү судалгааны хүрээнд Fe_3O_4 нэгдлийг гарган авах химийн синтезийн оновчтой аргыг тодорхойлж улмаар Bi -ээр хольцлон дамжууллын шинж чанарыг сайжруулах судалгааг гүйцэтгэв. Магнетит нэгдлийн шинж чанарыг хольц элемент висмутын концентрациас хамааруулан судалсан анхны судалгаа болж байгаа нь энэхүү ажлын онцлог юм.

■ ТУРШИЛТЫН ХЭСЭГ

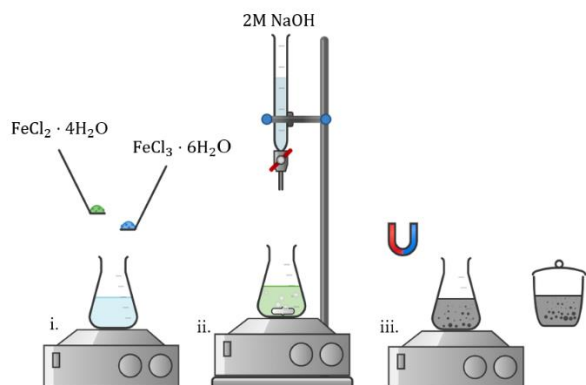
Ашигласан материал: Төмрийн (II) болон (III) хлорид ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 99%), ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 99.9%), натрийн гидроксид (NaOH , 99%), висмутийн (III) нитрат ($\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 99%), натрийн цитрат ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$, 99.9%).

Нано хэмжээт Fe_3O_4 гарган авах: Магнетит нэгдлийг химийн хам тунадасжуулах арга ашиглан гарган авсан. Ингэхдээ төмрийн хоёр болон гурван ионы давснуудыг усанд уусган, соронзон хутгуураар нэгэн төрлийн уусмал болтол хугтана. Уусмал дээр натрийн гидроксидын усан уусмал (2M NaOH)-г титрлэн нэмж уусмалын орчныг шүлтлэг болгосон ба 80°C температурт халаахад хар өнгийн тунадас үүссэн. Тунадсыг соронз ашиглан тунгаан авч 3-аас 5 удаа нэрмэл усаар угаан, нам температурт 8-аас 10 цаг хатааж бэлтгэсэн.

*E-mail address: erdeneochir_g@num.edu.mn

Received: July 7, 2026. Revised: September 9, 2026. Accepted: September 15, 2026.

©2026. National University of Mongolia. All rights reserved.



Зураг 1. Соронзон шинж чанар бүхий магнетит нанопартикл гарган авах туршилтын схем.

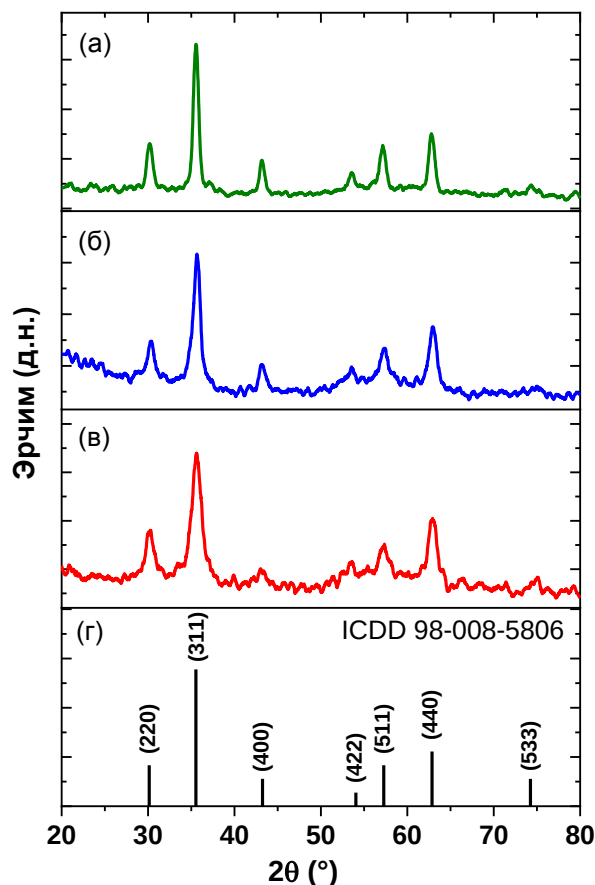
Висмутээр хольцолсон магнетит ($Bi_xFe_{3-x}O_4$) гарган авах: Висмутийг хольцлохдоо Fe^{3+} ионыг халж суухаар тооцоолон хольцын концентрацийг 1:0.1-0.3 харьцаатай байхаар эх бодисуудын хэмжээг тус тус тооцов. Гарган авахдаа бөөгнөрөл болон агригац үүсгэхээс сэргийлэн натрийн цитратаар бүрсэн.

Судалгааны арга зүй: Гарган авсан соронзон нунтаг дээжүүдийн кристалл бүтцийг рентген дифракцын арга (XRD, Shimadzu XRD-7000)-аар Cu-K α ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$) цацраг ашиглан тодорхойлон, Fe_3O_4 - ийн партиклийн хэмжээг Nanophox Particle Size Analyzer ашиглан хэмжсэн. Shimadzu IR Prestige-21 төхөөрөмж ашиглан нэгдэлд агуулагдах функционал бүлгийг шинжлэв. Мөн хэт ягаан туяа-үзэгдэх гэрлийн мужид шингээлтийн спектрийг Shimadzu UV-2401PC спектрофотометрээр хэмжсэн.

■ ҮР ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Стехиометрийн харьцааг тогтоох нь.

Судалгааны хүрээнд цэвэр, нано хэмжээт магнетит гарган авахын тулд $Fe^{2+}:Fe^{3+}$ -н оновчтой харьцааг тогтоох судалгааг эхлэн хийсэн. Ингэхдээ эх бодисын концентрацийг 1:1.3, 1:1.6, 1:2.0 харьцаатай байхаар сонгон авсан ба дээжүүдийн рентген туяаны дифракцын спектрийг Зураг 2 дээр нэгтгэн харуулав. Туршилтын үр дүнгээс гарган авсан дээжүүдийн торын параметр нь $8.354\text{-}8.373 \text{ \AA}$ утгатай ба $Fd\bar{3}m$ огторгуйн бүлэг бүхий куб кристалл бүтэцтэй болохыг тогтоосон. Мөн спектрүүд дэх сарнилын 30.1° , 35.5° , 43.1° , 53.5° , 57.1° , 62.8° ба 74.4° өнцгүүдэд илэрсэн гол пикүүд нь Fe_3O_4 нэгдлийн ICDD no. 98-008-5806 дугаартай стандарт картын (220), (311), (400), (422), (511), (440) болон (533) пикүүдтэй тохирч байгаа нь магнетит нэгдлийг амжилттай гарган авсныг харуулж байна [18]. Спектрүүдэд хийсэн шинжилгээгээр дээжүүдэд нэмэлт фаз илрээгүй нь цэвэршилт өндөртэй болохыг илтгэж байна.



Зураг 2. Төмрийн (II) ба (III) хлоридын (а) 1:1.3, (б) 1:1.6, (в) 1:2.0 молийн харьцаагаар гарган авсан дээжүүдийн рентген спектр. (г) ICDD no. 98-008-5806 стандарт картын пикүүд.

Рентген спектрийн 30.1° , 35.5° , 43.1° , 53.5° болон 57.1° дэхь (200), (311), (400), (511), (440) сарнилын хавтгайн пикүүдийг ашиглан Дебай-Шеррерийн тэгшитгэлээр дээжүүдийн кристаллитын дундаж хэмжээг тодорхойлсон [19].

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cdot \cos\theta} \quad (1)$$

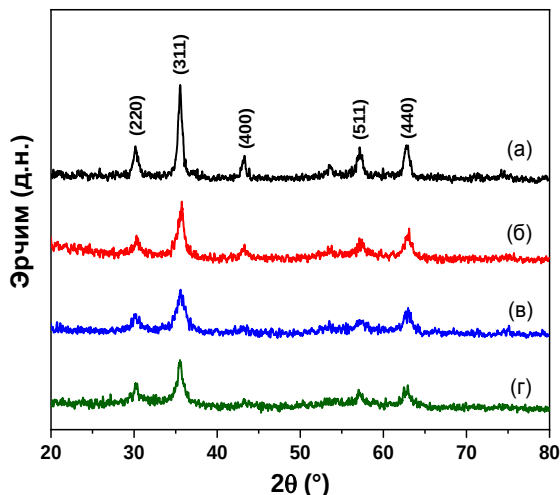
Энд, D - кристаллитын дундаж хэмжээ, K - Шеррерийн тогтмол бөгөөд манай тохиолдолд 0.9 байхаар авсан, λ - рентген туяаны долгионы урт ($1.5406 \text{ \AA}$), β - пикийн хагас өндрийн өргөн, θ - сарнилын өнцөг болно.

Кристаллитын дундаж хэмжээг (1) тэгшитгэлээр тооцоолоход 1:1.3, 1:1.6, 1:2.0 дээжүүдэд харгалзах хэмжээ $17.5 \pm 1.9 \text{ nm}$, $12.5 \pm 1.4 \text{ nm}$, $6.9 \pm 0.9 \text{ nm}$ байв. Эдгээрээс кристаллитын хэмжээ хамгийн бага болох 1:2.0 харьцаагаар гарган авсан дээжийг цаашдын судалгаандаа ашиглалаа.

Висмут (Bi) хольцын нөлөө.

Гарган авсан соронзон дээжүүдийн рентген дифракцын хэмжилтийн үр дүнг Зураг 3-д харуулав. Спектрүүдэд илэрсэн гол пикүүд нь дээрх үр дүнтэй

адил цэвэр Fe_3O_4 нэгдлийн ICDD no. 98-008-5806 дугаартай стандарт картын утгуудтай тохирч байсан. Энэ нь хольцын нөлөөгөөр дээжид нэмэлт фаз үүсээгүйг илтгэх бөгөөд висмутийн концентраци ихсэхэд пикийн эрчим буурч, кристаллын үелсэн бүтэц алдагдаж байгаа нь харагдаж байна.



Зураг 3. (а) Fe_3O_4 , (б) $\text{Bi}_{0.1}\text{Fe}_{2.9}\text{O}_4$, (в) $\text{Bi}_{0.2}\text{Fe}_{2.8}\text{O}_4$, (г) $\text{Bi}_{0.3}\text{Fe}_{2.7}\text{O}_4$ нэгдлүүдийн рентген дифракцын спектр.

Хүснэгт 1-т рентген дифракцын спектрт илэрсэн (200), (311), (511) ба (440) сарнилын хавтгайд харгалзах гол пикүүдийн сарнилын өнцөг, пикийн хагас өндрийн өргөний утгуудыг нэгтгэн харууллаа. Үр дүнгээс харвал висмутийн агуулга нэмэгдэхэд гол пикүүд сарнилын бага өнцгийн тал руу шилжилт хийсэн байна. Энэ нь ионы радиус харьцангуй ихтэй висмут ($1.03 \text{ \AA}$) төмрийн ионы ($0.645 \text{ \AA}$) оронд сууснаар кристалл торыг тэлж сарнилын өнцгийн эрчим нь буурч байгааг харуулж байна. Энэхүү үр дүн бусад судалгааны ажлын үр дүнтэй тохирч байна [20].

Хүснэгт 1. $\text{Bi}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($x=0.0-0.3$) нэгдлүүдийн рентген дифракцын спектр дэх гол пикүүдийн байрлал ба пикийн хагас өндрийн өргөн.

	x	Байрлал (h k l)			
		220	311	511	440
Сарнилын өнцөг, 2θ [°]	0.0	30.26	35.67	57.21	62.99
	0.1	30.27	35.57	57.12	62.82
	0.2	30.23	35.52	57.08	62.80
	0.3	30.22	35.49	57.02	62.81
β [рад]	0.0	0.492	0.616	0.625	0.716
	0.1	0.794	0.933	1.016	1.034
	0.2	0.841	0.996	1.606	1.251
	0.3	1.032	0.731	0.964	1.113

Fe_3O_4 нэгдлийн кристалл бүтэц дэх висмут хольцын нөлөөг шинжлэх зорилгоор рентген дифракцын спектрт пикийн анализ хийн торын тогтмол, кристаллитын дундаж хэмжээг тодорхойлж, үр дүнг

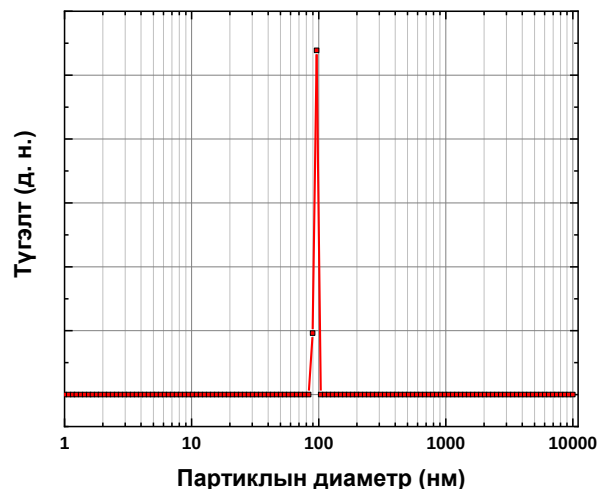
Хүснэгт 2-т нэгтгэлээ. Хүснэгтээс харвал висмутийн концентраци ихсэхэд торын параметр өсч, торын эзлэхүүн $582 \text{ \AA}^3$ -аас $587 \text{ \AA}^3$ болж тэлж байна. Энэ нь рентген дифракцын спектр дэх гол пикүүдийн бага өнцгийн шилжилттэй тохирч байна.

Хүснэгт 2. $\text{Bi}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($x=0.0-0.3$) нэгдлүүдийн торын параметр ба талст мөхлөгийн дундаж хэмжээ.

	x	a (Å)	V (Å ³)	D (nm)
Fe_3O_4	0.0	8.347	582	6.9
$\text{Bi}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$	0.1	8.360	584	12.8
	0.2	8.368	586	10.6
	0.3	8.372	587	13.0

Fe_3O_4 ба $\text{Bi}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ нэгдлийн кристаллитын дундаж хэмжээг (220), (311), (511) пикүүдийг ашиглан Дебай-Шеррерийн тэгшитгэлээр тодорхойлж, дундаж утгыг авсан ба бүх дээжүүдийн хувьд хэмжээ $\leq 13 \text{ nm}$ байна.

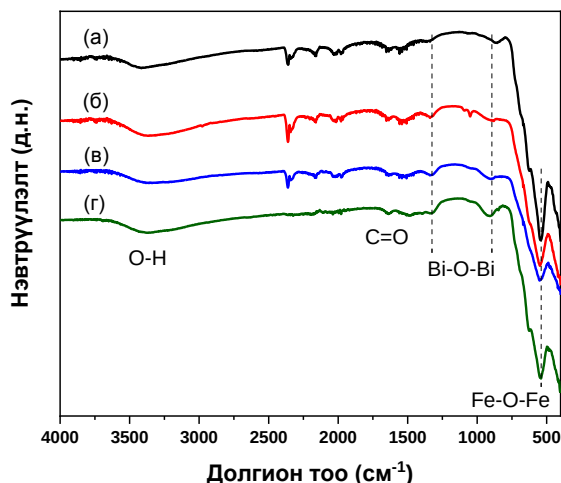
Fe_3O_4 дээжийн партиклын хэмжээг Nanophox Particle Size Analyzer ашиглан тодорхойлсон хэмжилтийн үр дүнг Зураг 4-т харуулав. Туршилтын үр дүнгээс гарган авсан дээжийн гидродинамик диаметр ойролцоогоор 95 nm байлаа.



Зураг 4. Fe_3O_4 нэгдлийн партиклын хэмжээ болон түгэлтийн нягтын хамаарал.

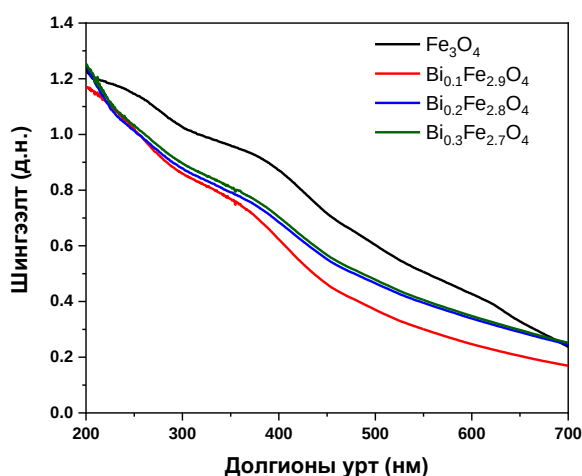
Соронзон нунтаг дээжүүдийн функционал бүлгийг тодорхойлохоор нил улаан туяаны спектрометрээр молекул хэлбэлзлийн спектрийг бүртгэсэн (Зураг 5). Спектрүүд дэх 540 cm^{-1} орчим илэрч буй өндөр эрчимтэй пик нь магнетит нэгдлийн Fe-O-Fe валентын хэлбэлзэлд харгалзана [21, 22]. Харин 904 ба 1325 cm^{-1} долгион тоонууд дахь пикүүд нь $\text{Bi}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ нэгдэл дэх Bi-O-Bi бүлгийн валентын хэлбэлзлийнх болно. Туршилтын үр дүнгээс $\text{Bi}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ нэгдэлд висмутийн агуулга нэмэгдэхэд Fe-O-Fe хэлбэлзэлд харгалзах пикийн эрчим буурч байгаа бол

Bi-O-Bi хэлбэлзлийн хоёр пик бага зэрэг өсч байгаа нь харагдаж байна. Эдгээр үр дүн бид висмутээр хольцолсон төмрийн оксидын магнетит нэгдлийг амжилттай гарган авч чадсан болохыг харуулж байна. Үүнээс гадна химийн урвалд NaOH болон $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ ашигласан тул спектрт 1638 см^{-1} дээр C=O хэлбэлзлийн, 3400 см^{-1} орчимд O-H бүлгийн өргөн пикүүд тус тус илэрсэн [23].



Зураг 5. (а) Fe_3O_4 , (б) $\text{Bi}_{0.1}\text{Fe}_{2.9}\text{O}_4$, (в) $\text{Bi}_{0.2}\text{Fe}_{2.8}\text{O}_4$, (г) $\text{Bi}_{0.3}\text{Fe}_{2.7}\text{O}_4$ нэгдлүүдийн молекул хэлбэлзлийн спектр.

Висмутээр хольцолсон магнетит $\text{Bi}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ нэгдлүүдийн хэт ягаан туяа-үзэгдэх гэрлийн муж дахь шингээлтийн спектрийг Зураг 6-т харуулав. Хэмжилтийн үр дүнгээс харахад бүх дээжид 300-450 нм мужид шингээлтийн өргөн пик ажиглагдсан. Цэвэр төмрийн оксидын нэгдлийн спектрт уг пикийн төв 380 нм орчимд байсан бол висмутээр хольцолсны дараа спектрийн хөх тал руу (ойролцоогоор 365 нм хүртэл) шилжиж байгаа нь хориотой бүсийн өргөн буурч байгааг илтгэж байна.

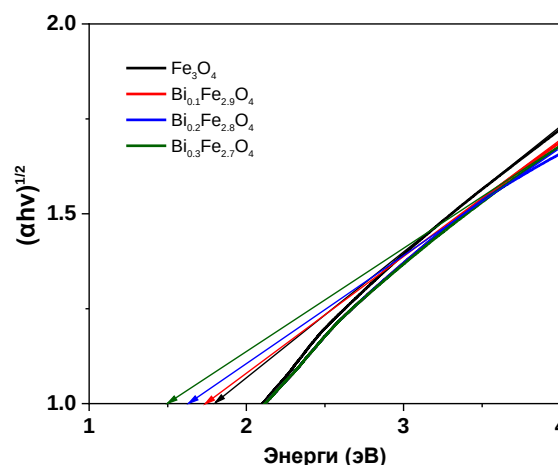


Зураг 6. Fe_3O_4 ба $\text{Bi}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($x=0.0-0.3$) нэгдлийн шингээлтийн спектрүүд.

Иймээс бид шингээлтийн спектрүүдээр Таукын муруй байгуулах аргаар (2) томьёог ашиглан хориотой бүсийн өргөнийг тодорхойлов [24].

$$(\alpha h\nu)^n = A(h\nu - E_g) \quad (2)$$

Энд, α - шингээлтийн коэффициент, $h\nu$ - фотоны энерги (эВ), E_g - хориотой бүсийн өргөн (эВ), A - тогтмол, n - дамжууллын илтгэгч ($n = 1/2$, $n = 2$) болно. Таукын муруйгаас шууд бус ($n = 1/2$) дамжуулалт бүхий хориотой бүсийн өргөнийг тодорхойлсныг Зураг 7-т харуулан, харгалзах утгуудыг Хүснэгт 3-т нэгтгэлээ.



Зураг 7. Таукын муруй: Хориотой бүсийн энергийн өргөн.

Хүснэгт 3. Fe_3O_4 ба $\text{Bi}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ дээжүүдийн хориотой бүсийн өргөнийг Таукын муруйгаар тодорхойлсон утгууд.

Хольцын хэмжээ	0.0	0.1	0.2	0.3
E_g (эВ)	1.78	1.71	1.62	1.50

Үр дүнгээс харвал Fe_3O_4 нэгдлийг висмутээр хольцолон хориотой бүсийн өргөнийг бууруулах боломжтой бөгөөд энэ нь бусад судлаачдын судалгааны үр дүнтэй нийцтэй байна [17]. Эндээс үзвэл хольц ашиглан E_g -ыг удирдах замаар Fe_3O_4 нанопартиклын дамжууллын шинж чанарыг тохируулах боломжтой нь харагдаж байна.

■ ДҮГНЭЛТ

Уг судалгааны ажлын хүрээнд бид nano хэмжээст висмутээр хольцолсон магнетит (Fe_3O_4) нэгдлийг гарган авлаа. Висмутээр хольцоолоход Fe_3O_4 нэгдлийн торын параметр 8.347-с 8.372 Å болж өсч, торын эзлэхүүн тэлж байгааг тогтоолоо. Энэхүү утга нь Mustafa Aghazadeh нарын судалгааны ажлын үр дүнтэй тохирч байна [25]. Рентген дифракцын спектрт хийсэн шинжилгээгээр $\text{Bi}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ нэгдэлд

ямар нэгэн нэмэлт фаз илрээгүй. Мөн Mustafa Aghazadeh нар Дебай-Шеррерийн тэгшитгэлээр цэвэр магнетит ба висмутээр хольцолсны дараах дээжийн кристаллитын хэмжээг тооцсон нь (харгалзан 7.1 нм ба 12.7 нм) бидний үр дүнтэй таарч байна.

FTIR спектрт Bi-O-Bi бүлгийн валентын хэлбэлзлийн тодорхойлогч хоёр пик 904 ба 1325 cm^{-1} долгион тоонуудад илэрсэн. Энэхүү үр дүн ~ 250 нм диаметртэй метал висмут нанопартиклын гадаргуу дээр Fe_3O_4 нанопартиклыг суулган композит нэгдэл гарган авсан Wei Wei нарын туршилтын үр дүнтэй тохирч байна [26]. Хольцын нөлөөгөөр шингээлтийн спектр дэх 380 нм дээр төвтэй өргөн пик ойролцоогоор 15 нм -ээр хөх шилжилт хийсэн нь хориотой бүсийн өргөн буурч байгааг илтгэж байна. Таурын аргаар хориотой бүсийн өргөнийг тодорхойлоход 1.78 эВ-оос 1.50 эВ хүртэл буурч байгааг тогтоосон. Энэхүү судалгаагаар гарган авсан эдгээр үр дүн нь висмутээр хольцолсон магнетит нэгдлийг амжилттай гарган авч хольц элементийн агууламжийг өөрчлөн хориотой бүсийн өргөнийг удирдаж болохыг илтгэж байна.

Энэхүү судалгаа нь магнетит нэгдлийн шинж чанарыг хольц элемент висмутын концентрациас хамааруулан судалсан анхны судалгаа болж байгаагаараа онцлог юм.

■ ТАЛАРХАЛ

Энэхүү судалгааны ажил нь Беларусь Монголын хамтарсан суурь судалгааны төсөл BLR-2025/03 болон ЮНЕСКО -ийн Дэлхийн гуравдагч орнуудын Шинжлэх ухааны академийн (TWAS) санхүүжилттэй, RG/PHYS/AS_GFR3240343925 грантын хүрээнд гүйцэтгэгдсэн болно.

■ АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] M. R. Ghazanfar, et al., Perspective of Fe_3O_4 Nanoparticles Role in Biomedical Applications, *Biochem. Res. Int.*, 7840161, 32 (2016). <https://doi.org/10.1155/2016/7840161>
- [2] Д. Сангаа, Э. Уянга, Соронзон, УБ: Соёмбо принтинг., (2020).
- [3] K. S. Suraj, et al., Ab initio investigation of magnetism and stability in Nb doped magnetite, *J. Magn. Mag. Mater.*, 601, 172162 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.172162>
- [4] J. Xu, et al., Preparation and magnetic properties of magnetite nanoparticles by solgel method, *J. Magn. Mag. Mater.*, 309, 307–311 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.07.037>
- [5] D.L. Paiva et al., Novel protocol for the solidstate synthesis of magnetite for medical practices, *Hyperfine Interact.*, 232, 19–27 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10751-015-1124-1>
- [6] Y. Lee et al., Large scale synthesis of Uniform and crystalline magnetite nanoparticles using reverse micelles as nanoreactors under reflux conditions, *Adv. Funct. Mater.*, 15, 503–509 (2005). <https://doi.org/10.1002/adfm.200400187>
- [7] R. Rahmawati et al., Synthesis of Magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles from Iron sands by Co-precipitation-ultrasonic irradiation methods, *J. Mater. Environ. Sci.*, 9, 155 (2018). <https://doi.org/10.26872/jmes.2018.9.1.19>
- [8] C.Y. Hawa et al., Hydrothermal synthesis of magnetite nanoparticles as MRI contrast agents, *Ceram. Int.*, 36, 1417–1422 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.02.005>
- [9] H. Zhoua, et al., Ultrasensitive DNA monitoring by Au- Fe_3O_4 nanocomplex, *Sens. Actuator B: Chem.*, 163, 224–232, (2012). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.01.040>
- [10] D. N. Tukan, et al., A Review: Optimum Conditions for Magnetite Synthesis (Fe_3O_4), *Jurnal Ilmiah Berkala: Sains dan Terapan Kimia*, 17, 2, 15–21 (2023). <https://doi.org/10.20527/jstk.v17i2.15134>
- [11] M. Amiri, et al., Magnetically retrievable ferrite nanoparticles in the catalysis application, *Adv. Colloid Interface Sci.*, 271, 101982 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.07.003>
- [12] N.K. Yetim, et al., Structural and catalytic properties of Fe_3O_4 doped Bi_2S_3 novel magnetic nanocomposites: p-Nitrophenol case, *J. Chem. Eng.*, 8, 104258 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104258>
- [13] I. Sharifi, et al., Ferrite-based magnetic nanofluids used in hyperthermia applications, *J. Magn. Mag. Mater.*, 324, 903–915 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2011.10.017>
- [14] S.N. Chandranna, et al., Hydrothermal synthesis of BiFe_2O_4 heterostructure for photodegradation of dye and biological implications, *Environ. Surf. Interfaces.*, 3, 24–32 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.esi.2024.11.002>
- [15] K.K. Kefeni, et al., Application of spinel ferrite nanoparticles in water and wastewater treatment: A review, *Sep. Purif. Technol.*, 188, 399–422, (2017). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.07.015>
- [16] Ch. Muzenda, et al., A magnetite catalysed heterogeneous solar photo electro-Fenton system enhanced with lanthanum doped bismuth ferrite photoanode for the degradation of aspirin in water, *J. Water process. Eng.*, 56, 104370 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104370>
- [17] C. Lakshmia, et al., Investigation of co-doped magnetite (Fe_3O_4) nanomaterials with reduced graphene oxide and bismuth for photocatalytic, supercapacitor, and antimicrobial applications, *Electrochim. Acta*, 511, 145376 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.145376>
- [18] N. Korkmaz, et al., Hemp-Derived Iron Oxide Nanoparticles for Biomedical Applications: Synthesis, Characterization, and Therapeutic Potential, *Chemistry Open*, 14, e202500189, (2025). <https://doi.org/10.1002/open.202500189>
- [19] Scherrer, P. Göttinger Nachrichten Math. Phys. 2, 98–100 (1918).
- [20] R.I. Nuta, et al., Room-temperature magnetic behavior of Bi-doped $\text{Co}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite nanoparticles, *Physica B*, 723, 418079 (2026). <https://doi.org/10.1016/j.physb.2025.418079>

- [21] Xiao, W; Jones, et al., Use of Fourier transform infrared spectroscopy to examine the Fe (II)-Catalyzed transformation of ferrihydrite, Print-Electronic. 175, 30-37 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.07.018>
- [22] S. Tazikeh, et al., Experimental study of asphaltene precipitation and metastable zone in the presence of polythiophene-coated Fe₃O₄ nanoparticles, Journal of Molecular Liquids, 301, 112254 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112254>
- [23] Д. Монхообор, Г. Батчимэг, Молекул бүтэц ба спектроскопи, Битпресс., 2009.
- [24] J.Tauc, et al., Optical Properties and Electronic Structure of Amorphous Germanium. Phys. Status Solidi, 15, 627-637 (1966). <https://doi.org/10.1002/pssb.19660150224>
- [25] Mustafa Aghazadeh, Isa Karimzadeh, and Mohammad Reza Ganjali, Preparation of Nano-sized Bismuth-Doped Fe₃O₄ as an Excellent Magnetic Material for Supercapacitor Electrodes, Journal of ELECTRONIC MATERIALS, 47, 3026 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6146-4>
- [26] Wei Wei, Wei Sun, Huihui Hu, Zhifeng Jiang, Lirong Ma, and Jimin Xie, Controllable synthesis of magnetic Fe₃O₄ encapsulated semimetal Bi nanospheres with excellent stability and catalytic activity, J Mater Sci, 53, 13886–13899 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2585-9>

Investigation of structure and physical properties of Bismuth-doped $\text{Bi}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ Magnetite Nanoparticles

B. Buyankhishig^{1,2}, B. Khongorzul², A. Uyanga², N. Jargalan², P. Tuvshintor³, G.G. Gorokh⁴
and G. Erdene-Ochir¹

¹Department of Physics, School of Arts and Sciences, National University of Mongolia, Ulaanbaatar 14201, Mongolia

²Laboratory of Functional Materials, Institute of Physics and Technology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar 13330, Mongolia

³Baigali Ekh High School, National University of Mongolia, Ulaanbaatar 14192, Mongolia

⁴Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Belarus

Abstract: Among iron-oxide magnetic materials, three main phases are commonly encountered, namely hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), maghemite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), and magnetite (Fe_3O_4). Among them, Fe_3O_4 is a ferrimagnetic semiconductor exhibiting high saturation magnetization in the temperature range of 112–840 K. It possesses an inverse spinel structure in which Fe^{3+} cations occupy the tetrahedral (A) sites, whereas Fe^{2+} and Fe^{3+} cations are distributed over the octahedral (B) sites. This unique cation arrangement gives rise to its excellent magnetic and electronic properties, making Fe_3O_4 an attractive material for various high-tech applications.

In this work, the properties of $\text{Bi}_x\text{Fe}_{(3-x)}\text{O}_4$ ($x = 0.0\text{--}0.3$) compounds were investigated with the aim of improving their physical characteristics. The crystal structure and properties of the samples were characterized using X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR), and ultraviolet–visible (UV–Vis) spectroscopy. XRD analysis confirmed the successful synthesis of pure Fe_3O_4 ($x = 0$) phase with an inverse spinel structure by the co-precipitation method. For $x > 0.1$, Bi-doped compounds were obtained, and the cell volume expanded from $581.56 \text{ \AA}^3$ to $586.80 \text{ \AA}^3$, indicating the incorporation of Bi into the magnetite crystal structure. UV–vis measurements revealed that Bi doping reduced the optical band gap of Fe_3O_4 from 1.78 eV to 1.50 eV, suggesting an enhancement of its electronic conductivity.

*E-mail address: erdeneochir_g@num.edu.mn

Received: July 7, 2026. Revised: September 9, 2026. Accepted: September 15, 2026.

©2026. National University of Mongolia. All rights reserved.