

Соронзон-Оптик Керрийн Эффе́ктэд суурилсан нимгэн хальсны соронзон шинж чанарын судалгаа

Г.Батзул^{1,2,*}, Р.Галбадрах¹, Д.Өнөрбилэг¹, Н. Наранбилэгт², Л.Мэнд-Амар¹,
Б. Мөнх-Учрал¹, У. Нэргүй¹, Н.Төвжаргал^{2,3}, Ж.Даваасамбуу^{1,2}

¹Шинжлэх Ухааны Академи, Физик технологийн хүрээлэн, Электроник фотоникийн лаборатори

²Монгол Улсын Их Сургууль, Лазерын судалгааны төв

³Монгол Улсын Их Сургууль, Шинжлэх ухааны сургууль, Физикийн тэнхим

Хураангуй: СОКЭ-д суурилсан төхөөрөмжөөр орчин үеийн спинтроник ба нанотехнологийн салбарын хэрэглээнд тохирох нимгэн хальсны соронзон шинж чанарын судалгааг хийх боломжтой. Энэхүү ажлаар нимгэн хальсан дээжийн гадаргууд нормаль чиглэлээр соронзон орон дагуу гэрэл тусгах (полар конфигурац) горимд СОКЭ хэмжих төхөөрөмжийг угсарч, $Gd_3Ga_5O_{12}$ суурь ялтас дээр эпитакс аргаар ургуулсан 133 нм зузаантай, висмутаар хольцолсон $Bi_2:Y_1Fe_3O_{12}$ дээжийн талстын (100) чиглэл дагуу соронзон гистерезисийн муруйг хэмжсэн үр дүнг танилцуулж байна.

Түлхүүр үгс: Соронзон-Оптик Керрийн Эффе́кт, лазерын туйлшрал, соронзон гистерезисийн муруй

УДИРТГАЛ

Соронзон-оптик Керрийн Эффе́кт (СОКЭ) бол материалд соронзон орноор үйлчлэх үед түүнээс ойсон гэрлийн туйлшрал өөрчлөгддөг үзэгдэл ба нимгэн хальс материалын соронзон шинж чанарыг судлахад хэрэглэгддэг. [1, 2] Туйлшралын өөрчлөлтийг Керрийн өнцөг θ_K , болон эллипсийн өнцөг ϵ_K -аар илэрхийлдэг ба энэ нь тухайн материалын соронзжилтоос хамаардаг. Ихэнх материалын хувьд $\epsilon_K \ll \theta_K$ байх тул ϵ_K –ийг гээж хялбаршуулан тооцоолдог байна. [2]

Шугаман туйлширсан лазерын гэрлийг дээж дээр тусган СОКЭ-ийг хэмжин гадаргуугийн соронзон оптик гистерезисийн муруйг гарган авснаар нимгэн хальсны соронзон шинж чанарыг өндөр нарийвчлалтай хэмжих боломжтой. [3]

Бид энэ ажлаараа нимгэн хальсны СОКЭ-ийг хялбар горимоор хэмжих төхөөрөмжийг угсран тохируулга хийж орчин үеийн спинтроник ба нанотехнологийн салбарын хэрэглээнд зориулсан уламжлалт ба шинэлэг материалын нимгэн хальсны соронзон шинж чанарын судалгааг бие даан гүйцэтгэх чадамжийг бий болгох зорилго тавьсан болно.

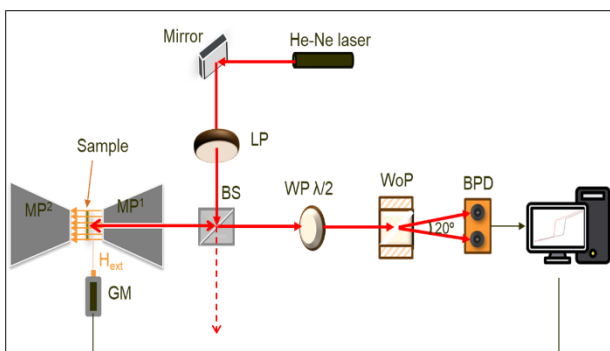
ХЭМЖИЛТИЙН ТӨХӨӨРӨМЖ

Нимгэн хальсны СОКЭ-ийн хэмжилтийн гурван конфигурац байх ба тууш, полар болон хөндлөн гэж ангилдаг.[4]

Эдгээрээс полар СОКЭ-ийн хэмжилтээр гистерезисийн муруйны ханалт, коэрцитив хүчийг шууд олохоос гадна, тууш СОКЭ-тэй харьцуулан соронзон анизотропик шинж чанарыг тогтооход зайлшгүй хэрэглэгдэнэ. [5]

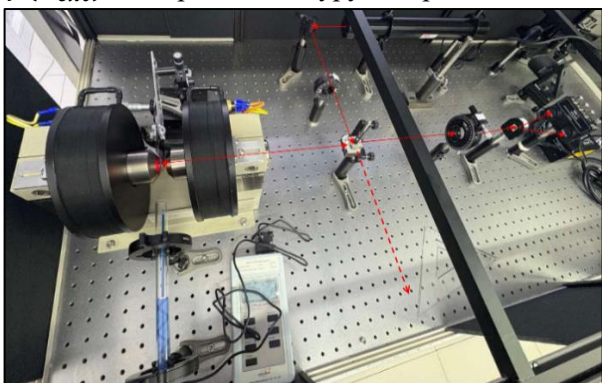
Зураг 1 дээр бүдүүвчлэн (Зураг 2 дээр бодитоор) үзүүлснээр туршилтын төхөөрөмж нь 633 нм долгионы урттай, шугаман туйлшралтай He-Ne лазер (5 мВт, Thorlabs), хавтгай толь (Mirror), нэмэлт шугаман туйлшруулагч (LP), цацраг хуваагч (BS), хагас долгионы хавтан (WP $\lambda/2$), Волластоны призм (WoP, Thorlabs), хос фотодетектортой бүртгэгч (BPD, Thorlabs), гауссметр (GM, DX-102F RTN), цахилгаан соронз ($MP^{1,2}$, GMW-3470) болон цахилгаан соронзны гүйдлийн хоёр туйлт тэжээлийн блок (KEPCO-50-8D, зураг дээр харуулаагүй), удирдлагын компьютерээс бүрдэнэ.

GMW-3470 цахилгаан соронзны MP^1 цилиндр зүрхэвч нь тэнхлэг дагуу 3мм диаметртэй нүхтэй ба түүгээр лазерын гэрэл дээжийн гадаргуу дээр эгц тусна. Зүрхэвч хоорондын зай 10 мм үед дээж дээр гэрэл тусах цэг дээрх соронзон орны индукцийн хэмжилт ба тэжээлийн гүйдлийн хамаарал шугаман болохыг Зураг 3 дээр харуулав. Зүрхэвчүүдийн үлдэгдэл соронзжилт (< 10 мТл) бага тул хэмжилтийн дүнд нөлөөлөхгүй гэж тооцсон.

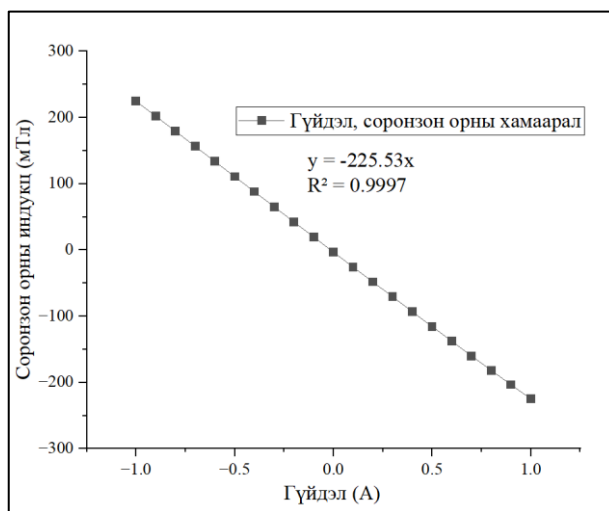


Зураг 1. СОКЭ хэмжих төхөөрөмжийн бүдүүвч.

Хэмжилт хийхдээ эхлээд соронзон оронгүй үед хагас долгионы хавтаны туйлшралын чиглэлийг өөрчлөх замаар Волластоны призмээр хуваагдан хоёр фотодетектор дээр ирэх гэрлийн эрчмүүдийг тэнцүүлнэ. Волластоны призм нь туссан гэрлийг харилцан перпендикуляр шугаман туйлшралтай хоёр гэрэл болгон 20°-аар салган нэвтрүүлдэг, **BPD** нь гэрлийг фото-гүйдэл болгон хувиргаж хүчдэлийн зөрүүгээр өндөр нарийвчлалтай хэмждэг ба хоёр фотодетектор дээр тусч буй гэрлийн эрчмийн зөрүүг $\Delta I/I$ хэлбэрээр тоон дохионд хувирган компьютерт дамжуулдаг оптик элемент юм. Иймд дээжээс ойсон лазерын гэрлийн туйлшрал (эрчим өөрчлөгдөхгүй, зөвхөн туйлшралын хавтгайн өөрчлөлт) СОКЭ-ийн нөлөөгөөр өөрчлөгдөхөд волластоны призмээр дайран фотодетекторууд дээр ирэх хоёр эрчим хоорондоо зөрүүтэй болно. Энэхүү эрчмийн харьцангуй зөрүүг **СОКЭ-ийн дохио** гэх ба дээжинд үйлчлэх соронзон орны индукцийн H_{ext} хэмжээ ба чиглэлээс хамааруулан хэмжиж дээжийн соронзон оптик $\Delta I/I = f(H_{ext})$ гистерезисийн муруйг гарган авна.



Зураг 2. СОКЭ хэмжих төхөөрөмжийн фото зураг.



Зураг 3. GMW-3470 цахилгаан соронзны гүйдэл ба зурхэвч хоорондын төв цэг дээрх соронзон орны индукци хоорондын хамаарал.

КЕРРИЙН ӨНЦГИЙН ТООЦОО

Олон бүрдэл хэсэгтэй оптик системээр нэвтрэх гэрлийн эрчим болон туйлшралын төлөвийн өөрчлөлтийг тооцоход Жонсын матрицаар илэрхийлж хийх нь хялбар байдаг. [6] Жонсын матрицаар туйлширсан гэрлийг цахилгаан орны хүчлэгээр илэрхийлж, харилцан үйлчлэх оптик элемент болгоны нөлөөг матриц хэлбэрээр тооцдог. Энэхүү ажилд зөвхөн гэрлийн фазын өөрчлөлтийг тооцон эрчмийг

$$I = I_x + I_y = 1$$

байхаар нормчлов.

Керрийн бага өнцөгт харгалзах матриц нь:

$$J_{Kerr} \approx \begin{bmatrix} 1 & -\theta_K + i\varepsilon_K \\ \theta_K - i\varepsilon_K & 1 \end{bmatrix} \text{ байна.}$$

Энэ матрицаар дээжээс ойсон лазерын гэрлийн өөрчлөлтийг бичвэл:

$$\vec{E}_{samp} = J_{Kerr}[1,0]^T = \begin{bmatrix} 1 \\ \theta_K - i\varepsilon_K \end{bmatrix} \text{ болно.}$$

Дараагаар нь, лазерын гэрлийн хагас долгионы хавтанг нэвтрэн гарахдаа:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{out} &= J_{HWP}(\varphi)\vec{E}_{samp} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(2\varphi) & \sin(2\varphi) \\ \sin(2\varphi) & -\cos(2\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \theta_K - i\varepsilon_K \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(2\varphi) + (\theta_K - i\varepsilon_K)\sin(2\varphi) \\ \sin(2\varphi) - (\theta_K - i\varepsilon_K)\cos(2\varphi) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

гэж илэрхийлэгдэнэ. Энд:

$$J_{HWP}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos(2\varphi) & \sin(2\varphi) \\ \sin(2\varphi) & -\cos(2\varphi) \end{bmatrix}$$

$J_{HWP}(\varphi)$ нь хагас долгионы хавтан φ өнцгөөр эргүүлэхэд харгалзах Жонсын матриц болно. Волластоны призмээр перпендикуляр хэвтээ x ба босоо y тэнхлэг дагуу хуваагдсан лазерын цахилгаан орны байгуулагч нь харгалзан:

$$E_x = \cos(2\varphi) + (\theta_K - i\varepsilon_K)\sin(2\varphi)$$

$$E_y = \sin(2\varphi) - (\theta_K - i\varepsilon_K)\cos(2\varphi)$$

болон ба уг гэрлийн эрчмээр илэрхийлбэл:

$$I_x = \cos(2\varphi)^2 + 2\theta_K \cos(2\varphi)\sin(2\varphi) + \theta_K^2 \sin(2\varphi)^2 + \varepsilon_K^2 \sin(2\varphi)^2$$

$$I_y = \sin(2\varphi)^2 - 2\theta_K \cos(2\varphi)\sin(2\varphi) + \theta_K^2 \sin(2\varphi)^2 + \varepsilon_K^2 \sin(2\varphi)^2$$

болно. Үүний хоёрдугаар эрэмбийн гишүүдийг бага хэмээн гэж эрчмүүдийн ялгавар болон нийлбэрийг олоход:

$$\begin{aligned} \Delta I(\varphi) &= I_x - I_y = E_x E_x^* - E_y E_y^* \\ &= \cos(4\varphi) - 2\theta_K \sin(4\varphi), \end{aligned}$$

$I = I_x + I_y = 1$ тул;

$$\frac{\Delta I(\varphi)}{I} = \frac{I_x - I_y}{I_x + I_y} = \cos(4\varphi) - 2\theta_K \sin(4\varphi) \quad \text{болно.}$$

Үүнээс хагас долгионы хавтганг $\varphi = \frac{\pi}{8}$ өнцөгт тохируулбал Керрийн өнцгийн тухайн утга:

$$\frac{\Delta I(\pi/8)}{I} = -2\theta_K$$

гэж хялбар илэрхийлэгдэнэ. Үүнээс үзвэл хэмжигдэж буй эрчмүүдийн ялгаврын харьцангуй утгаас Керрийн өнцгийг тооцоолон бодох боломжтой нь харагдаж байна.

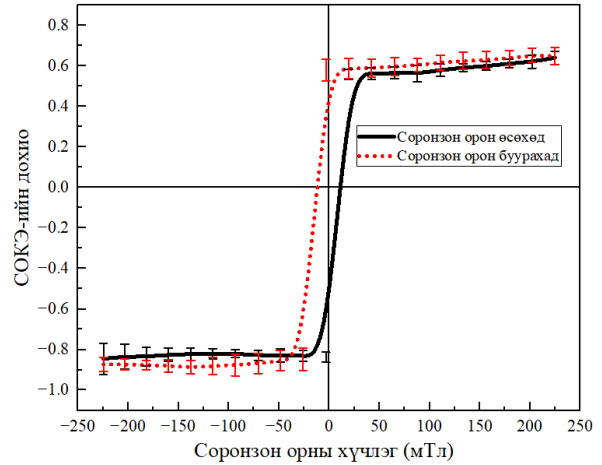
АНХНЫ ХЭМЖИЛТИЙН ҮР ДҮН

Соронзон материал дундаас $Y_3Fe_5O_{12}$ (иттрий төмрийн гарнет, YIG) талст нь зөөлөн соронзжилттой, сайн тусгаарлагч гэх мэт шинж чанараараа олон хэрэглээнд нэвтэрсэн байдаг. [7-9] YIG-ийг өөр элементээр хольцолж сайжруулах судалгаа олон байдаг ч, висмутаар хольцолж хийсэн судалгаа харьцангуй цөөн байдаг.

Бид харилцагч байгууллагаас ирүүлсэн $Gd_3Ga_5O_{12}$ суурь ялтас дээр висмутаар хольцлон эпитахс ургуулсан $Bi_2:Y_1Fe_5O_{12}$ ($Bi:YIG$) 133 нм зузаан хальсны дээж дээр анхны хэмжилтийг олон давталттай хийж талстын (100) чиглэл дагуух соронзон гистерезисийн муруйг нь гарган авсныг Зураг 4 дээр харуулав.

Соронзон орны -200 мТл-аас +200 мТл мужид хэмжилт хийхэд $Bi:YIG$ нимгэн хальс 40 мТл орчмоос соронзон ханалтад орж, 12 мТл-

ээс ихгүй коэрцитив хүч үзүүлсэн болно. Энэ нь цэвэр иттрий-төмрийн гарнеттай ($Y_3Fe_5O_{12}$) харьцуулахад висмутаар хольцолсон $Bi:YIG$ гарнет илүү соронзон оптик чанартай гэдгийг энэхүү хэмжилтийн үр дүн бататгаж байна. [10]



Зураг 4. Соронзон орон өсөх болон буурах үед $Bi:YIG$ дээжээс ойсон лазерын цацрагийн туйлшралын өөрчлөлтөөс гарган авсан соронзон гистерезисийн муруй

ДҮГНЭЛТ

Бидний угсарч тохируулсан СОКЭ хэмжих төхөөрөмж нь сул соронзон чанартай материалыг хэмжих боломжтойг $Bi_2:Y_1Fe_5O_{12}$ -ийн нимгэн хальсны гистерезисийн муруйн хэмжилт хийн нотоллоо.

Иймд бид төхөөрөмжөө автоматжуулан пульстай лазер ашиглаж өдөөн-тандах аргыг СОКЭ-тэй хослуулан судалгаа хийх боломжтой болж байна.

ТАЛАРХАЛ БА МЭДЭГДЭЛ

Энэхүү ажилд үнэтэй хувь нэмэр оруулсан Монгол Улсын Их Сургуулийн Лазерын судалгааны төв болон Физик технологийн хүрээлэнгийн Электроник, фотоникийн лабораторийн хамт олонд талархал илэрхийлье.

ИШЛЭЛД АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

[1] John Kerr LL.D. (1878) XXIV. On reflection of polarized light from the equatorial surface of a magnet, *Philosophical Magazine Series 5*, 5:30, 161-177,

<http://dx.doi.org/10.1080/14786447808639407>

[2] Suzuki, D. H., & Beach, G. S. D. (2024). Measurement of Kerr rotation and ellipticity in magnetic thin films by MOKE magnetometry.

- Journal of Applied Physics*, 135(063901). <https://doi.org/10.1063/5.0185341>
- [3] Hubert, A., & Schäfer, R. (1998). *Magnetic domains: The analysis of magnetic microstructures*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-85054-0>
- [4] Fumagalli, P., & Schoenes, J. (2022). *Magneto-optics: An introduction*. Walter de Gruyter GmbH. <https://doi.org/10.1515/9783110635300>
- [5] Kehlberger, A., Richter, K., Onbasli, M. C., Jakob, G., Kim, D. H., Goto, T., Ross, C. A., Götz, G., Reiss, G., Kuschel, T., & Kläui, M. (2015). Enhanced Magneto-optic Kerr Effect and Magnetic Properties of CeY₂Fe₅O₁₂ Epitaxial Thin Films. *Physical Review Applied*, 4(1). <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.4.014008>
- [6] Hecht, E. (2017). *Optics* (5th ed.). Pearson Education.
- [7] Sposito, A., Gregory, S. A., de Groot, P. A. J., & Eason, R. W. (2014). Combinatorial pulsed laser deposition of doped yttrium iron garnet films on yttrium aluminium garnet. *Journal of Applied Physics*, 115(5). <https://doi.org/10.1063/1.4864134>
- [8] Fakhrol, T., Tazlaru, S., Beran, L., Zhang, Y., Veis, M., & Ross, C. A. (2019). Magneto-Optical Bi:YIG Films with High Figure of Merit for Nonreciprocal Photonics. *Advanced Optical Materials*, 7(13). Portico. <https://doi.org/10.1002/adom.201900056>
- [9] Deb, M., Popova, E., Fouchet, A., & Keller, N. (2012). Magneto-optical Faraday spectroscopy of completely bismuth-substituted Bi₃Fe₅O₁₂ garnet thin films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45(45), 455001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/45/455001>
- [10] Jesenska, E., Yoshida, T., Shinozaki, K., Ishibashi, T., Beran, L., Zahradnik, M., Antos, R., Kučera, M., & Veis, M. (2016). Optical and magneto-optical properties of Bi substituted yttrium iron garnets prepared by metal organic decomposition. *Optical Materials Express*, 6(6), 1986. <https://doi.org/10.1364/ome.6.001986>

Investigation of Magnetic Properties of Thin Films Using the Magneto-Optical Kerr Effect

G. Batzul^{1,2,*}, R. Galbadrakh¹, D. Unurbileg¹, N. Naranbilegt², L. Mend-Amar¹,

B. Munkh-Uchral¹, U. Nergui¹, N. Tuvjargal^{2,3}, J. Davaasambuu^{1,2}

¹*Institute of Physics and Technology, Mongolian Academy of Sciences, Laboratory of Electronics and Photonics*

²*Laser Research Center, National University of Mongolia*

³*School of Science, Department of Physics, National University of Mongolia*

Abstract:

The Magneto-Optic Kerr Effect (MOKE) refers to the change in the polarization state of light reflected from a material when an external magnetic field is applied. MOKE-based instrumentation setup enables high-precision investigation of the magnetic properties of thin films relevant to contemporary applications in spintronics and nanotechnology. In this work, a MOKE measurement set-up of the polar configuration where the incident light is directed normal to the sample surface and parallel to the applied magnetic field was designed and assembled. Using this setup, magnetic hysteresis loops were measured along the (100) crystallographic direction of a 133-nm-thick bismuth-substituted Bi: YIG thin film epitaxially grown on a Gd₃Ga₅O₁₂ substrate. The obtained results demonstrate the capability of the constructed system for reliable characterization of the magnetic properties of magnetic thin films.

Keywords: Magneto-Optical Kerr Effect, laser polarization, magnetic hysteresis loop