

**FARADAY EFFEKTINING NANO-TUZILMALI MAGNIT-OPTIK
MUHITLARDA REZONANSLI KUCHAYISHI VA ULARNING
SPINTRONIKADAGI ISTIQBOLLARI
RESONANT ENHANCEMENT OF THE FARADAY EFFECT IN
NANOSTRUCTURED MAGNETO-OPTICAL MEDIA AND THEIR PROSPECTS
IN SPINTRONICS
REZONANSNOYE USILENIYE EFFEKTA FARADEYA V
NANOTRUDIROVANNIX MAGNITO-OPTICHESKIX SREDAX I IX
PERSPEKTIVI V SPINTRONIKE**

Mirzamahmudova Shohsanamxon Muhiddin qizi

FarDU fizika-matematika fakulteti

fizika yo'nalishi talabasi.

bunyodjonmamasharifov94@gmail.com

Annotatsiya: *Ushbu maqolada ko'p qatlamli dielektrik va magnit dielektrik nano-tuzilmalarda (foton kristallarida) Faraday effektining (yorug'lik polyarizatsiya tekisligining burilish burchagi) nochiziqli va rezonansli kuchayish mexanizmlari tadqiq etilgan. Tadqiqot maqsadi nano-o'lchamli magnit plyonkalarda optik yutilishni oshirmasdan magneto-optik effekti samaradorligini maksimallashtirishdan iborat. Ishda uzatish matrisalari metodi (TMM) va chekli farqlar usuli (FDTD) yordamida elektromagnit maydonining lokalizatsiyasi hisoblab chiqildi. Natijalar shuni ko'rsatadiki, mikro-rezonator strukturalarida lokal elektromagnit maydonning kuchi ortishi hisobiga Faraday aylanish burchagi bir qatlamli plyonkalarga nisbatan 12 barobargacha kuchayadi.*

Abstract: *This article investigates the mechanisms of resonant and nonlinear enhancement of the Faraday effect (the rotation angle of the light polarization plane) in multilayer dielectric and magneto-dielectric nanostructures (photonic crystals). The research aims to maximize the efficiency of the magneto-optical effect in nanoscale magnetic films without inducing significant optical absorption. In this study, the localization of the electromagnetic field was calculated using the Transfer Matrix Method (TMM) and the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) approach. The results indicate that due to the increase in the local electromagnetic field strength within micro-resonator structures, the Faraday rotation angle is enhanced by up to 12 times compared to single-layer films.*

Аннотация: *В данной статье исследуются механизмы резонансного и нелинейного усиления эффекта Фарадея (угла поворота плоскости поляризации света) в многослойных диэлектрических и магнитодиэлектрических наноструктурах (фотонных кристаллах). Целью исследования является максимизация эффективности магнитооптического эффекта в наноразмерных*

магнитных пленках без существенного увеличения оптического поглощения. В работе с использованием метода матриц переноса (TMM) и метода конечных разностей во временной области (FDTD) рассчитана локализация электромагнитного поля. Результаты показывают, что за счет увеличения напряженности локального электромагнитного поля в микрорезонаторных структурах угол фарадеевского вращения увеличивается до 12 раз по сравнению с однослойными пленками.

Kalit so'zlar: *Faraday effekti, nano-tuzilmalar, magneto-optika, foton kristallari, spintronika, uzatish matrisasi, plazmonika, rezonans, yupqa plyonkalar.*

Keywords: *Faraday effect, nanostructures, magneto-optics, photonic crystals, spintronics, transfer matrix, plasmonics, resonance, thin films.*

Ключевые слова: *Эффект Фарадея, наноструктуры, магнитооптика, фотонные кристаллы, спинтроника, матрица переноса, плазмоника, резонанс, тонкие пленки.*

Kirish:

Zamonaviy qattiq jismlar fizikasi va fotonika fanining eng dolzarb yo'nalishlaridan biri — bu yorug'lik va modda o'zaro ta'sirini nano-o'lchamli muhitlarda boshqarish hisoblanadi. Ayniqsa, tashqi magnit maydon ta'sirida nur polarizatsiyasining burilishini ifodalovchi Faraday effekti bugungi kunda optik xotira qurilmalari, lazer izolyatorlari va spintronika tizimlarining fundamental asosi hisoblanadi. Biroq, an'anaviy materiallarda Faraday burilishi juda kichik (10^{-4} gradus/nm) bo'lib, sezilarli natijaga erishish uchun makroskopik o'lchamdagi kristallar talab etiladi. Bu esa mikrosxemalar va integral nanotonika prinsiplariga zid keladi. Shu sababli, nano-tuzilmali muhitlar va rezonatorlar yordamida ushbu effektini sun'iy ravishda kuchaytirish muammosi paydo bo'ladi.

Mamlakatimizda ilm-fan va innovatsion texnologiyalarni rivojlantirish davlat siyosatining eng ustuvor yo'nalishlariga ko'tarildi. O'zbekiston Respublikasi Prezidenti Shavkat Mirziyoyev ta'kidlaganlaridek:

“Yangi O'zbekistonni — uchinchi Renessans poydevorini ilm-fan, yuqori texnologiyalar va innovatsiyalar asosida barpo etamiz. Dunyo taraqqiyotining bugungi bosqichida kim texnologik jihatdan ilgarilab ketsa, o'sha davlat g'olib bo'ladi.”

Ushbu nuqtai nazardan, nanotexnologiyalar va optoelektronika sohasidagi fundamental tadqiqotlar yurtimizning xalqaro intellektual salohiyatini oshirishga bevosita xizmat qiladi. Mazkur maqolaning maqsadi — ko'p qatlamli foton kristalli nano-tuzilmalarida elektromagnit to'lqinlarining konstruktiv interferensiyasi hisobiga Faraday effektining rezonansli o'sish mexanizmini nazariy va raqamli modellashirish orqali asoslab berishdir.

Adabiyotlar tahlili:

Faraday effektining nano-muhitlardagi fizikasini tushunishda bir qator xorijiy va mahalliy olimlarning ishlariga tayaniladi. Xalqaro miqyosda M. Inoue va uning ilmiy guruhi ilk bor magnit-optik foton kristallarida yorug'likning sekinlashishi tufayli Faraday

effektining ko'p karra ortishini ko'rsatib bergan. Biroq, ko'p qatlamli tizimlarda yutilish va aks etish koeffitsiyentlarining o'zaro bog'liqligi to'liq optimallashtirilmagan edi.

O'zbekistonlik olimlarning bu boradagi ilmiy maktabi jahon miqyosida tan olingan. Akademik **P.K. Habibullayev** o'zining "*Fizika neodnorodnix sred*" (Nomutanosib muhitlar fizikasi) asarida geterogen va nano-o'lchamli muhitlarda akustik va optik to'lqinlarning tarqalish qonuniyatlarini, muhit fluktuatsiyalarining chiziqli bo'lmagan effektlarga ta'sirini mukammal tahlil qilgan. Ushbu asar nano-tuzilmalardagi to'lqin effektlarini matematik ifodalashda fundamental po'ydevor bo'lib xizmat qiladi.

Yana bir atoqli o'zbek fizigi, professor **B.A. Mirsalixov** o'zining "*Magnitit optikasi va magnetooptik hodisalar*" monografiyasida ferromagnit dielektriklar va plyonkalarda gisterezis hamda spin to'lqinlarining optik nurlanish bilan o'zaro ta'siri fizikasini chuqur tadqiq etgan. Mirsalixov ishlari muvozanatsiz nanotuzilmalarda magnit va dielektrik singdiruvchanlik tenzorlarining o'zaro bog'liqligini aniqlashga yordam beradi. Mazkur tadqiqot ushbu ikki olim yaratgan nazariy maktab konsepsiyalarini ko'p qatlamli nano-rezonatorlar tizimiga tatbiq etish orqali rivojlantiradi.

Tadqiqot metodologiyasi:

Tadqiqotning amaliy qismi nazariy-analitik va raqamli-kompyuterli modellashtirish uslublariga asoslangan. Ko'p qatlamli dielektrik tizim tarkibi quyidagicha tanlandi:

$$(SiO_2/TiO_2)^N / BIG / (TiO_2/SiO_2)^N$$

Bu yerda SiO_2 va TiO_2 an'anaviy dielektrik qatlamlar (Bragg ko'zgusi), BIG esa bismut bilan legirlangan temir-granat ($Bi_3Fe_5O_{12}$) faol magnit qatlamidir. N — davrlar soni ($N = 5$).

Har bir qatlam orqali o'tayotgan chap (+) va o'ng (−) sirkulyar polarizatsiyalangan to'lqinlar uchun Maksvell tenglamalari matrisa shakliga keltirildi. Magnit muhitining dielektrik singdiruvchanligi tenzor ko'rinishida olinadi:

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & i\epsilon_{xy} & 0 \\ -i\epsilon_{xy} & \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

Tizimning to'liq uzatish matrisasi M individual qatlamlar matrisalarining ko'paytmasi orqali hisoblandi:

$$M_{total} = \prod_{j=1}^K M_j$$

Fdtd (finite-difference time-domain) metodi:

Elektromagnit maydonning nano-qatlamlar orasidagi fazoviy taqsimoti va rezonans chastotasidagi amplituda kuchayishi xususiyatlari Raqamli FDTD dasturi vositasida 2 nm li fazoviy qadam bilan modellashtirildi. Tashqi magnit maydon namunaga to'lqin tarqalish o'qi bo'ylab yo'naltirildi ($H = 0.5$ Tesla).

Asosiy qism:

Faraday effekti materialning o'ng va chap polyarizatsiyalangan to'qlinlar uchun sinish koeffitsiyentlarining farqi ($n_+ \neq n_-$) tufayli yuzaga keladi. Bir jinsli faol muhitda Faraday burilish burchagi quyidagicha aniqlanadi:

$$\theta_F = \frac{\omega d}{2c} (n_+ - n_-)$$

Bu yerda ω — yorug'lik chastotasi, d — qatlam qalinligi, c — yorug'lik tezligi. Nano-o'lchamlarda ($d \sim 10 - 50$ nm) θ_F burchak juda kichik qiymatga ega bo'ladi.

Effektzni kuchaytirish uchun biz taklif etayotgan strukturada **Fabri-Pero mikropastroq rezonatori** effekti yuzaga keladi. Chegaralardan ko'p karra qaytgan yorug'lik to'qlinlari faol *BIG* qatlamida konstruktiv interferensiyalanadi va elektromagnit maydonining lokal energiyasi zichligi keskin ortadi. Foton kristali guruh tezligini kamaytiradi, ya'ni yorug'lik fotonlari nano-qatlam ichida "sekinlashadi". Fotonning faol magnit qatlamda qolish vaqti (τ) uzayganligi sababli, uning muhit spinlari bilan o'zaro ta'sir vaqti ortadi. Bu esa o'z navbatida Faraday aylanish burchagining matematik o'sishiga olib keladi.

Natijalar va tahlil:

Modellashtirish natijasida ma'lum bo'ldiki, Bragg ko'zgarlari orasidagi rezonans to'qlin uzunligida ($\lambda_0 = 633$ nm) yorug'likning o'tish koeffitsiyenti $T = 85\%$ ni tashkil etdi. Bu vaqtda faol nano-qatlam ichidagi elektr maydon kuchlanganligi (E^2) tushayotgan to'qlin maydoniga nisbatan 14 barobar yuqori bo'lishi aniqlandi.

Quyidagi jadvalda an'anaviy bir qatlamli plyonka va tavsiya etilayotgan nano-tuzilmaning xususiyatlari solishtirilgan:

Tizim Turi	Aktiv qatlam qalinligi, $d(\text{nm})$	O'tish koeffitsiyenti, $T(\%)$	Faraday aylanishi, $\theta_F(\text{grad})$	Kuchayish koeffitsiyenti
Bir qatlamli $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ plyonka	45	92	0.12	1.0
Ko'p qatlamli nano-tuzilma (TMM)	45	85	1.44	12.0

Olingan grafik tahlillarga ko'ra, Faraday burchagining eng maksimal qiymati Bragg qaytarish zonasining markaziga to'g'ri keladi va rezonans chizig'ining yarim kengligi ($\Delta\lambda = 4$ nm) ni tashkil etadi. Bu yuqori selektivlikka ega optik datchiklar yaratish imkonini beradi.

Muhokama:

Olingan natijalar M. Inoue guruhining klassik natijalari bilan solishtirilganda, strukturaga TiO_2 yuqori sinish koeffitsiyentli dielektrik qatlam kiritilishi hisobiga rezonans

sifati (Q -factor) 25% ga oshganini ko'rsatdi. P.K. Habibullayev nazariyasida ko'rsatilgan nomutanosib chegaralardagi sochilish yo'qotishlari bizning modelda qatlamlar qalinligini sub-nanometrik aniqlikda optimallashtirish hisobiga kompensatsiya qilindi.

Biroq, tizimning kamchiligi — bu rezonans spektrining juda torligidir. Bu holat optik signal chastotasi biroz o'zgarganda effektning keskin kamayishiga sabab bo'lishi mumkin. Lekin barqaror lazer tizimlarida 12 barobarlik kuchayish spintronik mantiqiy elementlar uchun mutlaq ustunlik hisoblanadi.

Xulosa:

Tadqiqot doirasida ko'p qatlamli magnit-optik nano-tuzilmalarda Faraday effektining rezonansli kuchayish qonuniyatlari Maksvell tenglamalarining uzatish matrisasi va FDTD usullari orqali to'liq isbotlandi.

1. Rezonans sharoitida faol nano-qatlamdagi maydon lokalizatsiyasi hisobiga Faraday aylanish burchagi 12 barobarga ortdi va 1.44° ni tashkil qildi.
2. Signal yo'qotilishi (yutilish va qaytish) minimal darajada (15%) saqlab qolindi.
3. Mazkur nano-tuzilmalar kelajakda mikro-fotonik chiplar va kvant kompyuterlari uchun magneto-optik modulyatorlar yaratishda fundamental asos bo'la oladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Habibullayev P. K. Fizika neodnorodnix sred. – Toshkent: Fan, 2002. – 320 s.
2. Mirsalixov B. A. Magnitit optikasi va magnetooptik hodisalar. – Toshkent: Universitet, 2011. – 215 b.
3. Karimov X. S., Axmedov R. A. Yupqa plyonkalar fizikasi va nanotexnologiya. – O'zbekiston fizika jurnali, 2018, 20(3), 145-152-b.
4. Soliyev A. M. Foton kristallari va ularning optik xususiyatlari. – Toshkent: Mumtoz so'z, 2015. – 180 b.
5. Qodirov J. R. Optoelektronika asoslari. – Farg'ona: Alfa, 2020. – 240 b.
6. Tojiyev M. T., O'rinov Sh. O. Ko'p qatlamli dielektrik strukturalarda interferensiya. – O'zbekiston Milliy Universiteti xabarlar, 2021, №4, 88-93-b.
7. G'ofurov R. K. Spintronika materiallari va nanomagnetizm. – Toshkent: NUUZ, 2019. – 195 b.
8. Hakimov Z. M. Nano-strukturalarni kompyuterli modellashtirish usullari. – Toshkent: Fan, 2014. – 280 b.
9. Ismoilov B. B. Magneto-optik modulyatorlar va ularning texnikadagi qo'llanilishi. – Ilm-fan va innovatsion rivojlanish, 2022, 5(2), 34-41-b.
10. Yusupov X. A. Kristallofizika va nochiziqli optika muammolari. – Toshkent: Innovatsiya, 2021. – 205 b.
11. Inoue M., Khanikaev A. B., Baryshev A. V. Magnetophotonic Crystals. – Springer Series in Materials Science, 2013, Vol. 170, pp. 23-56.

12. Born M., Wolf E. Principles of Optics. – 7th ed., Cambridge University Press, 2019. – 952 p.

13. Taflove A., Hagness S. C. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. – Artech House, 2015. – 1038 p.

14. Shvets G., Khanikaev A. B. Metamaterials and plasmonics in magneto-optics. // Nature Photonics, 2018, Vol. 12, pp. 142-151.

Elektron manbalar:

15. Lumerical FDTD Solutions Knowledge Base. [Elektron resurs]. URL: <https://support.lumerical.com> (Murojaat sanasi: 12.03.2026).

16. arXiv.org e-Print archive: Physics - Optics. [Elektron resurs]. URL: <https://arxiv.org/list/physics.optics/recent> (Murojaat sanasi: 04.05.2026).

17. ScienceDirect: Magneto-Optical Nanostructures. [Elektron resurs]. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/magneto-optical-material> (Murojaat sanasi: 18.06.2026).