

PACS: 75.30.Hx

ISSN 1729-4428 (Print)
ISSN 2309-8589 (Online)

О.В. Кінзерська¹, М.М. Сльотов¹, Т.М. Мазур², О.М. Сльотов¹, М.П. Мазур²

Ефект Фарадея в кристалах ZnSe, легованих перехідними металами

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, oksanakinzerska@gmail.com;

²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна,
tetiana.mazur@nuing.edu.ua

Досліджено ефект Фарадея в кристалах селеніду цинку, легованих домішками перехідних металів. Встановлено, що магнітні домішки зумовлюють формування правої та лівої компонент колової поляризації випромінювання внаслідок взаємодії носіїв заряду з іонами кристалічної ґратки. У поздовжньому магнітному полі це призводить до появи різних спектральних компонент випромінювання та обертання площини поляризації світла. Визначено дисперсійні залежності сталої Верде для досліджуваних зразків. Показано, що легування базових підкладінок ZnSe домішками Mn і Co приводить до формування парамагнітного стану, тоді як домішка Fe зумовлює появу феромагнітних властивостей матеріалу.

Ключові слова: селенід цинку, 3d-домішки, ефект Фарадея, стала Верде, магнітні властивості.

Подано до редакції 20.03.2026 р.; прийнято до друку 02.09.2026 р.; опубліковано 16.09.2026 р.

Вступ

Широкозонні напівпровідники II–VI сполук привертають значну увагу дослідників завдяки своїм унікальним електронним та оптичним властивостям, що відкривають широкі можливості для створення сучасних оптоелектронних та фотонних пристроїв. Серед таких матеріалів особливе місце займає селенід цинку (ZnSe), який характеризується прямозонною структурою та великою шириною забороненої зони. Завдяки цим властивостям ZnSe є перспективним матеріалом для виготовлення світлодіодів, лазерних джерел випромінювання, фотоприймачів та інших приладів, що працюють у короткохвильовій синьо-блакитній області спектра [1,2].

Відомо, що фізичні властивості ZnSe можуть суттєво змінюватися внаслідок введення різних домішок. Легування елементами I, III, V та VII груп періодичної системи дозволяє керувати електричними та оптичними характеристиками матеріалу, що є важливим для оптимізації параметрів напівпровідникових приладів. Особливий інтерес становить легування ізовалентними домішками, яке

сприяє підвищенню температурної та радіаційної стабільності матеріалу, а також забезпечує ефективні генераційно-рекомбінаційні процеси з високою квантовою ефективністю випромінювання [3,4].

Окрему наукову і практичну зацікавленість викликає легування ZnSe домішками перехідних металів. У цьому випадку можуть формуватися так звані напівмагнітні напівпровідники, для яких характерною є сильна обмінна взаємодія між локалізованими магнітними моментами іонів перехідних металів та носіями заряду у зонах дозволених енергій. Така взаємодія суттєво впливає на електронну структуру матеріалу і може призводити до виникнення різних магнітних станів – діамагнітного, парамагнітного або феромагнітного залежно від типу та концентрації домішки [5–7]. Вивчення таких матеріалів є важливим не лише для фундаментальної фізики напівпровідників, але й для розвитку нових напрямів електроніки, зокрема магнітооптики та спінтроніки.

Одним із ефективних методів дослідження взаємодії носіїв заряду з магнітними домішками є аналіз магнітооптичних явищ. До таких явищ

належить ефект Фарадея, який полягає в обертанні площини поляризації лінійно поляризованого світла під час його проходження через речовину, що перебуває у поздовжньому магнітному полі. Спектральні залежності сталої Верде, що характеризує величину обертання площини поляризації, містять важливу інформацію про електронну структуру матеріалу, характер міжзонних та внутрішньоцентрових переходів, а також про роль домішкових центрів та дефектів кристалічної ґратки у формуванні оптичних і магнітних властивостей напівпровідників [8–12].

Незважаючи на значну кількість досліджень магнітооптичних властивостей напівпровідників II–VI групи, вплив домішок перехідних металів на формування ефекту Фарадея у кристалах ZnSe вивчений недостатньо. Зокрема, потребують подальшого дослідження особливості спектральної поведінки сталої Верде та зв'язок між типом магнітної домішки і магнітним станом матеріалу.

У зв'язку з цим метою даної роботи є дослідження ефекту Фарадея в кристалах ZnSe, легованих 3d-домішками перехідних металів (Mn, Fe, Co), та встановлення закономірностей зміни їх магнітооптичних властивостей.

I. Зразки та методи дослідження

Базовими підкладками слугували пластинки ZnSe типорозміром $4 \times 4 \times 1$ мм³, які вирізались з об'ємних кристалів. Останні отримано з розплаву стехіометричного складу під тиском інертного газу. Для зазначених спеціально нелегованих кристалів ZnSe характерним є достатньо високі концентрації ($\sim 10^{20}$ см⁻³) катіонних V_{Zn} і аніонних V_{Se} вакансій, які відповідно є глибокими акцепторами і мілкими донорами [13]. Разом з тим, в області кімнатних температур базові підкладки мають достатньо низьку електронну провідність ($\sigma_n \leq 10^{-9}$ Ом⁻¹·см⁻¹). Вона визначалася за типовою методикою для такого типу досліджень [14].

Для отримання шарів ZnSe з 3d-домішками вибрано метод дифузії у закритому об'ємі. Для цього підкладки після попередньої обробки розташовувалися у кварцовій ампулі разом з наважкою одного з 3d-елементів напівпровідникової чистоти. Їх кількість визначалася за умовою утворення насиченої пари при максимальній температурі відпалу T_a^m . Разом з 3d-елементом в ампулу завантажувалася також шихта елементарного селену. Її наважка забезпечувала створення надлишкового тиску, що запобігає ерозії поверхні підкладки. На досліді після проведення дифузії поверхня залишається дзеркальною, що важливо для проведення у подальшому оптичних досліджень (без додаткових обробок). Також важливим при такій кількості Se є запобігання входженню 3d-елемента в аніонну підґратку (підґратку Se). За таких умов реалізується умова входження домішок у катіонні (цинкові) вузли, що є принциповою умовою заміщення 3d-елементами при легуванні ними III-V і II-VI сполук [15–18].

Спектральні характеристики визначалися за використовуваними відомими методиками [19,20]. В якості спектрального слугував дифракційний прилад МДР-23, фотоприймач забезпечували надійну реєстрацію сигналу у спектральному діапазоні 0,82–0,27 мкм.

II. Обговорення результатів досліджень

Як відомо [14], ефект Фарадея полягає в обертанні площини поляризації при проходженні лінійно поляризованого світла через речовину, що знаходиться у поздовжньому магнітному полі. Такий процес у наближенні класичної електронної дисперсії обумовлений різницею фазових швидкостей світлових хвиль лівої і правої колових поляризацій при їх поширенні вздовж магнітного поля у речовині. Відповідно кут обертання θ площини поляризації становить [21,22]

$$\theta = V \cdot H \cdot d, \quad (1)$$

де H – напруженість магнітного поля; d – товщина зразка; V – стала Верде, яка в свою чергу залежить від частоти світла та природи речовини.

У ефекті Фарадея магнітне поле розщеплює рівні енергій атомів за ефектом Зеемана, що супроводжується появою нових електронних переходів. У широкозонних напівпровідниках такі переходи є міжзонними, екситонними і внутрішньо центровими. Також у формуванні переходів відіграють важливу роль домішкові і власні дефекти ґратки. Внесок кожного з них визначається багатьма факторами, серед яких найбільш важливими є параметри матеріалу, умови досліду (температура, напруженість магнітного поля, довжини світлової хвилі тощо), тип і концентрації магнітної домішки. Вони впливають на характер взаємодії носіїв заряду у зонах дозволених енергій із іонами речовини і в такий спосіб впливають на обертання площини поляризації. Відповідно особливого значення набувають так звані напівмагнітні напівпровідники [17]. Їх характерною особливістю є здатність в залежності від вмісту магнітної компоненти і температури досліду зумовлювати формування діаманітного, парамагнітного або феромагнітного станів.

Досліджено ефект Фарадея у ZnSe і аналізується вплив домішок перехідних металів Mn, Fe і Co на обертання площини поляризації. На рис.1 наведено спектральні залежності (дисперсійні криві) сталої Верде, яка розраховувалась за допомогою співвідношення (1). Дослідження кута повороту площини поляризації проводились при $T = 77$ К і напруженості $H = 10000$ В/м при товщині зразків $d_0 \approx 0,1$ см.

Спостерігається для всіх досліджуваних зразків зростання сталої Верде при збільшенні енергії кванта світла, що є характерним для діаманітного стану речовини [18,22]. Домішка перехідного металу розподілена не по всьому об'єму зразка, а відповідно до законів формування дифузійного шару охоплює

певний дифузійний шар товщиною d [15]. Його величина менша за товщину досліджуваного зразка d_0 . Відповідно для встановлення достовірної спектральної залежності сталої Верде у легованих зразках необхідним постає виявлення різниці значень величини сталої Верде V для легованого ZnSe:Me та її значення при тій же енергії фотонів $\hbar\omega$ для базових кристалів ZnSe. Отримані значення наведено на рис. 2.

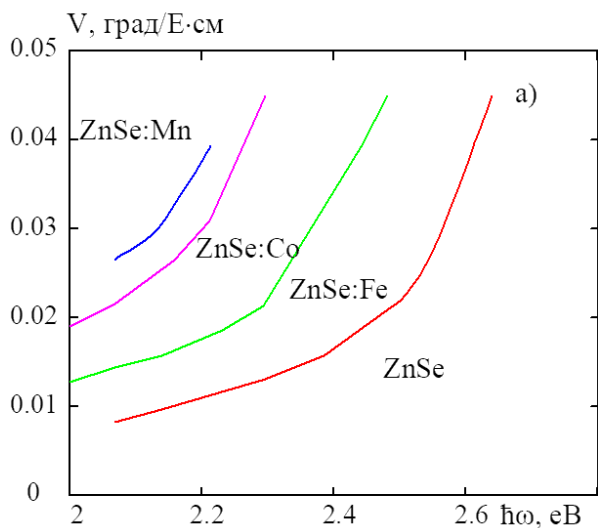


Рис. 1. Спектральні залежності сталої Верде, розраховані за співвідношенням (1).

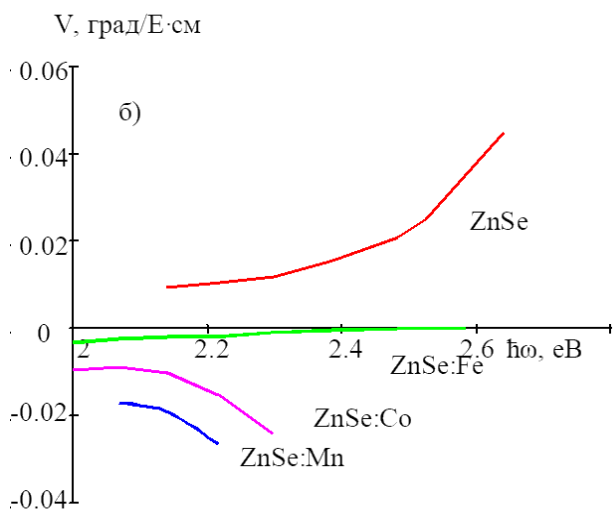


Рис. 2. Спектральні залежності сталої Верде.

Спостерігаються характерні дисперсійні криві залежності сталої Верде від енергії фотонів $V(\hbar\omega)$. Їх характер визначається відповідним магнітним станом легованої речовини. Необхідно відмітити зсув спектрального інтервалу, а також зміну знаку величини, а саме від'ємну величину. Для усіх залежностей характерним є зростання сталої Верде при збільшенні енергії кванта світла. Для базової нелегованої підкладки притаманний нелінійний характер залежності $V(\hbar\omega)$ із достатньо стрімкою зміною величини сталої Верде. Такі властивості характерні для діаманітного стану речовини. Легування селеніду цинку домішками Mn і Co приводять їх у парамагнітний стан, що

підтверджується зміною знаку намагніченості. При легуванні домішкою Fe величина сталої Верде спадає при збільшенні енергії кванта світла і ступеню зміни величини $V(\hbar\omega)$. Такі властивості притаманні феромагнітному стану речовини [17,18].

Таким чином, базові нелеговані кристали ZnSe є типовими матеріалами з діаманітними властивостями. Дисперсійні криві залежності сталої Верде від енергії фотонів $V(\hbar\omega)$ характеризуються нелінійним збільшенням сталої при зростанні енергії фотонів. Легування базових підкладок селеніду цинку елементами перехідних металів Mn і Co приводять їх у парамагнітний стан, а Fe – у феромагнітний. Про це свідчить зміна знаку намагніченості. Для феромагнітного стану спостерігається лінійна залежність намагніченості при зміні енергії фотонів.

Висновки

У роботі експериментально досліджено магнітооптичний ефект Фарадея в кристалах ZnSe, легованих 3d-домішками перехідних металів Mn, Fe та Co, та встановлено особливості формування їх магнітооптичних властивостей у порівнянні з відомими літературними даними [17,18] для інших матеріалів.

1. Вперше для кристалів ZnSe з дифузійно введеними домішками перехідних металів визначено спектральні залежності сталої Верде у широкому діапазоні енергій фотонів при температурі рідкого азоту. Показано, що для нелегованих кристалів ZnSe характерна типова для діаманітних матеріалів нелінійна дисперсійна залежність сталої Верде зі зростанням її величини при збільшенні енергії фотонів.

2. Встановлено, що введення магнітних 3d-домішок істотно модифікує магнітооптичні властивості селеніду цинку. Легування Mn та Co призводить до формування парамагнітного стану матеріалу, що проявляється у зміні характеру дисперсійних залежностей сталої Верде та появи специфічних особливостей у спектральній області дослідження.

3. Показано, що легування ZnSe домішкою Fe спричиняє формування феромагнітного стану в дифузійному шарі, що супроводжується зміною знаку та характеру спектральної залежності сталої Верде. Отримані результати свідчать про суттєву роль обмінної взаємодії між локалізованими магнітними моментами 3d-іонів та носіями заряду у формуванні магнітооптичних властивостей матеріалу.

4. Встановлені закономірності зміни сталої Верде залежно від типу магнітної домішки підтверджують можливість керування магнітним станом і магнітооптичними параметрами кристалів ZnSe шляхом контрольованого легування перехідними металами.

5. Отримані результати розширюють уявлення про механізми формування магнітооптичних ефектів у напівмагнітних напівпровідниках на основі II–VI сполук та свідчать про перспективність використання

легованих кристалів ZnSe у магнітооптичних модуляторах, сенсорах магнітного поля та інших елементах сучасної оптоелектроніки.

Подяки.

Дослідження Т.М. Мазур було профінансовано Національним фондом наукових досліджень України (проект 2025.07/0427 «Новітні комплексні ймовірнісні методи дослідження асимптотичних властивостей аналітичних розв'язків диференціальних рівнянь, представлених множинними випадковими рядами та інтегралами, та їхні потенційні застосування», 0126U002547).

Кінзерська О.В. – кандидат фізико-математичних наук, асистент кафедри оптики та видавничо-поліграфічної справи;

Сльотов М.М. – професор, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри поліграфічних, мультимедійних та оптичних технологій;

Мазур Т.М. – доктор філософії, доцент кафедри фізико-математичних наук;

Сльотов О.М. – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки і енергетики;

Мазур М.П. – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізико-математичних наук.

- [1] A. Sadao, Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors. (New Jersey: Wiley, 2009).
- [2] O. Ermakov, Applied Optoelectronics. (M.: Tekhnosfera, 416, 2004).
- [3] B. Dzundza, & all, *Software and Hardware Complex for Study of Photoelectric Properties of Semiconductor Structures*, IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, 635 (2019); <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783544>.
- [4] A.N. Georgobiani, M.K. Sheinkman, Physics of A₂B₆ compounds. (M. Mir, 320, 1986).
- [5] B.M. Bullah, P.P. Gorbik, M.K. Komashchenko, Heterostructures of solid-phase substitution based on single crystals of A₂B₆ compounds, FTP, 15(2), 357 (1981).
- [6] O.V. Kinzerska, I.M. Senko, M.M. Slyotov, O.M. Slyotov, T.M. Mazur, *Features of the management of the rule of Urbakh in ZnSe:Yb crystals*, Physics and Chemistry of Solid State, 24(3), 495 (2023); <https://doi.org/10.15330/pcss.24.3.495-498>.
- [7] V.I. Fistul, Physics and Chemistry of Solids. (M.: Metallurgy, V.2, 320, 1995).
- [8] M.M. Slyotov, T.M. Mazur, V. V. Prokopiv, O.M. Slyotov, M.P. Mazur, *Sources of optical radiation based on ZnTe/ZnSe/ZnS heterostructures*, Materials Today: Proceedings, 62, 5763 (2022); <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.476>.
- [9] V.P. Gribkovsky, The theory of absorption and emission of light in semiconductors (Science and technology, Minsk, 464, 1975).
- [10] T.M. Mazur, M.M. Slyotov, V.V. Prokopiv, O.M. Slyotov, M.P. Mazur, *Light emitters based on II-VI chalcogenides with nanostructured surface*, Molecular Crystals and Liquid Crystals, 752(1), 95 (2023); <https://doi.org/10.1080/15421406.2022.2091276>.
- [11] I. V. Horichok, L. I. Nykyruy, T. O. Parashchuk, S. D. Bardashevskaya, & M. P. Pylyponuk, *Thermodynamics of defect subsystem in zinc telluride crystals*. Modern Physics Letters B, 30(16), 1650172 (2016); <https://doi.org/10.1142/S0217984916501724>.
- [12] G. Wisz, P. Sawicka-Chudy, A. Wal, M. Sibiński, P. Potera, R., Yavorskyi, ... & O. M. Chernikova, *Structure defects and photovoltaic properties of TiO₂:ZnO/CuO solar cells prepared by reactive DC magnetron sputtering*, Applied Sciences, 13(6), 3613 (2023); <https://doi.org/10.3390/app13063613>.
- [13] I.V. Tkachenko, Mechanisms of Defect Formation and Luminescence in Undoped and Tellurium-Doped Zinc Selenide Crystals. PhD Thesis (Physics and Mathematics), Specialty 01.04.10. Chernivtsi, 136, 2005.
- [14] Yu.V. Vorobyev, V.I. Dobrovolskiy, V.I. Strikha, Methods of semiconductor research. (K.: Higher School; 288, 1988).
- [15] V.P. Makhnii, O.V. Kinzerska, K.S. Ulianytskyi, *Method for Doping Zinc Selenide with Transition Metal Impurities*. Patent of Ukraine No. 46928, IPC C30B31/00. Applicant and patent holder: Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University. Application No. u200907592, filed July 20, 2009; published January 11, Bulletin No. 1, 2010.
- [16] T.M. Mazur, M.M. Slyotov, O.M. Slyotov, M.P. Mazur, *Light emitters based on ZnSe*, Low Temperature Physics, 51(2), 256 (2025). <https://doi.org/10.1063/10.0035413>.
- [17] V.I. Fistul, Atoms of Doping Impurities in Semiconductors. (M.: Fizmatlit, 432, 2004).
- [18] O.V. Kinzerska, Physical Properties of Zinc Selenide Crystals Doped with Transition Metals. PhD Thesis (Physics and Mathematics), Specialty 01.04.10. Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, 137, (2012).
- [19] V.I. Gavrilenko, A.M. Grekhov, D.V. Korbutyak, V.G. Litovchenko, Optical properties of semiconductors. Reference book. (K.: Naukova dumka, 608, 1987).
- [20] P.Yu., M. Kardona, Fundamentals of Semiconductor Physics. (M: Fizmatlit, 560, 2002).
- [21] P.I. Nikitin, A.I. Savchuk, *Faraday Effect in Semimagnetic Semiconductors*, Physics-Successes, 160(11), 167 (1990).
- [22] A.M. Ermolaev, G. I. Rashba, *Faraday Effect in Conductors with Magnetic-Impurity Electron States*, Low Temperature Physics, 23(11), 1211 (1997).

O.V. Kinzerska¹, M.M. Slyotov¹, T.M. Mazur², M.P. Mazur²

Faraday Effect in ZnSe Crystals Doped with Transition Metals

¹*Yuri Fedkovich Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, oksanakinzerska@gmail.com;*

²*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine, tetiana.mazur@nung.edu.ua*

The Faraday effect in zinc selenide crystals doped with transition metal impurities has been investigated. It has been established that magnetic impurities cause the formation of right- and left-handed components of circular polarisation of radiation due to the interaction of charge carriers with ions of the crystal lattice. In a longitudinal magnetic field, this leads to the appearance of different spectral components of radiation and the rotation of the plane of polarisation of light. The dispersion dependencies of the Verdet constant for the studied samples were determined. It has been shown that doping ZnSe base substrates with Mn and Co impurities leads to the formation of a paramagnetic state, while Fe impurities cause the appearance of ferromagnetic properties in the material.

Keywords: zinc selenide, 3D impurities, Faraday effect, Verde constant, magnetic properties.