

ГІГАНТСЬКИЙ ЕФЕКТ ФАРАДЕЯ В КРИСТАЛАХ CdTe:Dy

Проведено дослідження магнітооптичного ефекту Фарадея кристалів телуриду кадмію, легованих домішками диспрозію. Виявлено зміну знака кута обертання θ_F від додатного для CdTe до від'ємного для кристалів CdTe:Dy. Для останніх також має місце значне підсилення константи Верде за абсолютною величиною, яка сягає при температурі рідкого гелію значення 0,36 град/(Е·см). Встановлені особливості в спектральній та температурній залежностях фарадеївського обертання є свідченням прояву *s, p-f*-спінової обмінної взаємодії в напівмагнітних напівпровідниках із рідкоземельними іонами.

Investigation of magnetooptical Faraday effect in cadmium telluride crystals doped with dysprosium has been carried out. Change of the sign of the rotation angle θ_F from positive to negative has been revealed when one goes from CdTe to CdTe:Dy crystals. For the latter there is significant enhancement of the absolute value of the Verdet constant which reach 0.36 deg/Oe cm at liquid helium temperature. The observed peculiarities on spectral and temperature dependence of the Faraday rotation suggest of exhibition of the *s, p-f*-spin exchange interaction in semimagnetic semiconductors with rare earth ions.

Більше двох десятиліть минуло з часу опублікування роботи [1], в якій вперше повідомлялось про гігантський ефект Фарадея в кристалах телуриду кадмію, легованих домішками марганцю. За цей проміжок часу напівпровідники, леговані домішками елементів з незаповненими *3d*- чи *4f*-оболонками та тверді розчини, що містять відповідну магнітну компоненту, сформувався в окремий клас речовин, отримавши назву напівмагнітних напівпровідників. Головною особливістю таких матеріалів є те, що введення магнітної компоненти значно підсилює роль у протіканні електронних процесів спінових обмінних взаємодій, зокрема взаємодії між спінами зонних носіїв та спінами електронів локалізованих на магнітних іонах. Результат такої взаємодії – значне підсилення зееманівського розщеплення зонних та екситонних станів і прояв гігантського ефекту Фарадея. Відзначимо, що завдяки таким унікальним спіново залежним явищам, напівмагнітні напівпровідники стали базовими для розвитку нового наукового напрямку, який ґрунтується на можливості практичного використання електронного спіна в принципово нових оптоелектронних пристроях і вже навіть отримав назву "спінтроніка" [2]. Зазначені магнітооптичні явища були предметом інтенсивного дослідження як в об'ємних кристалах, так і у квантових структурах на основі системи $A_{1-x}M_xB^{VI}$ (де M –

3d елементи з групи заліза). Проте в значно меншій мірі подібні явища досліджені в напівмагнітних напівпровідниках з рідкоземельними елементами. Нам відомі тільки нещодавно опубліковані результати дослідження спектрів фарадеївського обертання у твердих розчинах $Cd_{1-x}Gd_xTe$ [3]. Автори цієї роботи наводять докази прояву *s, p-f*-обмінної взаємодії з отриманих результатів, але отримані значення константи Верде не набагато перевищують відповідну величину для бінарної сполуки CdTe. Причиною цього може бути обмежений температурний інтервал 85-300 К, який не охоплює в достатній степені низькі температури, де обмінні взаємодії проявляються відчутніше.

У даній роботі нами представлені результати експериментального дослідження магнітооптичного ефекту Фарадея в кристалах CdTe, легованих домішкою диспрозію. Дослідження охоплюють широкий інтервал температур 4,2-295 К та діапазон магнітних полів до 250 кЕ.

Монокристали CdTe:Dy отримані методом горизонтально направленої кристалізації. Рівень легування у вихідній шихті перед вирощуванням складав $(2 \cdot 10^{18} - 5 \cdot 10^{20}) \text{ см}^{-3}$. Концентрація магнітної компоненти N_{Dy} у вирощених кристалах визначалась за допомогою вимірювань магнітної сприйнятливості і густини зразків.

Вимірювання спектральної, температурної та

магнітопольової залежностей кута фарадеївського обертання θ_F проводились на багатофункціональних установках, зібраних на базі дифракційних монохроматорів МДР-3, МДР-23. Джерелом магнітного поля слугували потужний електромагніт СП-58Б ($H_{\max}=50$ кЕ), невеликий мідний соленоїд ($H_{\max}=2$ кЕ) та імпульсний соленоїд ($H_{\max}=250$ кЕ). Як джерело випромінювання використано кінопроекційну лампу розжарення К-400, а поляризаторами слугували призми Рошона і Волластона. Сигнал детектувався фотоелектронним помножувачем ФЭУ-62 з подальшим селективним підсиленням та синхронним детектуванням. Низькотемпературні дослідження проводились у спеціальних оптичних азотному та гелієвому кріостатах. Переважна більшість зразків для магнітооптичних досліджень готувалася в формі плоскопаралельних пластинок (товщиною $d=0,5-3$ мм) зі сколотими гранями.

На рис.1 наведені експериментальні результати вимірювання спектральної залежності константи Верде ($V=\theta_F/Hd$) легованих кристалів CdTe:Du при різних температурах. Для порівняння наведені також аналогічні дані для нелегованого CdTe та CdTe:Mn з $N_{Mn}=10^{20}$ см⁻³ при кімнатній температурі. Відразу ж звернемо увагу на кардинальні зміни в спектрі фарадеївського обертання при переході від нелегованого кристала CdTe до зразка CdTe:Du з $N_{Du}=10^{20}$ см⁻³. Ці зміни майже аналогічні до тих, які раніше були виявлені нами для кристалів Cd_{1-x}Mn_xTe [4]. Як і у випадку компоненти марганцю, введення домішки Ду приводить до появи інверсії знака кута обертання. Збільшення концентрації диспрозію супроводжується зміщенням точки інверсії в бік менших енергій фотонів. З рис.1 витікає також, що одна і та ж сама концентрація домішок викликає відчутніші зміни в залежності $V(E)$ для випадку легування рідкоземельним елементом. Зауважимо, що відмінності між кристалами CdTe:Mn та CdTe:Du виявлені і при дослідженні екситонного відбивання. Якщо для зразка CdTe:Mn зміщення екситонної структури відбивання (перехід на основний екситонний стан $n=1$) складає $\Delta E_{ex}=10$ меВ при температурі $T=4,2$ К, то для кристалів CdTe:Du при тих же самих концентрації домішки і температурі цей зсув значно суттєвіший $\Delta E_{ex}=17$ меВ. Тим не менше, очевидним є те, що природа виявлених аномалій в дисперсії ефекту Фарадея для кристалів CdTe:Du та ж сама, що й в напівмагнітних напівпровідниках, які містять 3d-елементи. Для останніх на основі численних теоретичних та

експериментальних досліджень добре встановлена роль, яку відіграють спінові обмінні взаємодії між d-елекtrонами магнітних іонів та s, p-зонними носіями. У відповідності до мікроскопічної моделі [5] константу Верде в напівмагнітних напівпровідниках у залежності від енергії фотонів можна записати в такій формі

$$\phi V(E)=Zf(X)+CYg(X), \quad (1)$$

де аргумент $X=E/E_g$, E – енергія фотонів, E_g – ширина забороненої зони. Інші параметри та функції розписуються так

$$Y=(Q/E_g \cdot 1/2)[x/(T-\theta_0x)], \quad (2)$$

де $Q=qE_{g0}/E_g$, $q=h^2 k_0^2 / 2m_3 E_{g0}$, E_{g0} – ширина забороненої зони CdTe при 77 К.

$$f(X)=1/(1+X)^{1/2}+1/(1-X)^{1/2}-2, \quad (3)$$

$$g(X)=-[1/(1+X)^{1/2}[(1+X)^{1/2}+Q^{1/2}]^2+1/(1-X)^{1/2} \times [(1-X)^{1/2}+Q^{1/2}]^2-2/(1+Q^{1/2})^2]. \quad (4)$$

Отже, спектральна залежність константи Верде визначається функціями $f(X)$ і $g(X)$, які являють собою "чистий" зєсманівський та обмінний внески відповідно. Якщо в рівнянні (1) перший доданок – додатний, то другий доданок – від'ємний, що й пояснює наявність відповідної інверсії знака обертання при певних умовах.

Очевидно, що аналогічна концепція придатна і для напівмагнітних напівпровідників, що містять елементи з незаповненою 4f-оболонкою. Це дозволяє використати вищенаведені співвідношення і для аналізу отриманих даних по спектральних залежностях фарадеївського обертання в кристалах CdTe:Du. На даний час кількісні зіставлення експерименту та теорії виконати проблематично внаслідок відсутності для досліджуваних кристалів числових значень ряду параметрів, зокрема констант s, p-f-обмінної взаємодії.

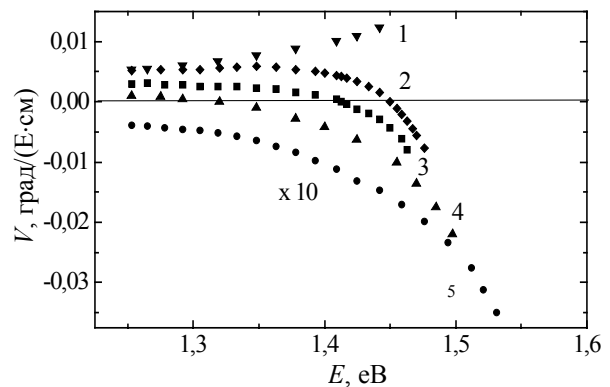


Рис.1. Спектральна залежність фарадеївського обертання кристалів CdTe (крива 1), CdTe:Mn (2) та CdTe:Du (при температурі $T=295$ К (3), 85 К (4), 4,2 К (5)).

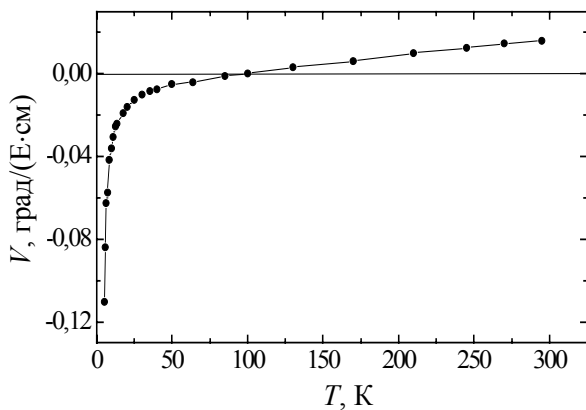


Рис.2. Температурна залежність фарадєївського обертання кристалів CdTe:Dy ($N_{Dy}=10^{20}$ см⁻³) при фіксованому значенні енергії фотонів $E=1,378$ еВ.

Додаткове підтвердження доцільності обраного підходу дають результати по температурній залежності фарадєївського обертання в CdTe:Dy (рис.1, 2). По мірі зниження температури зразка інверсія знака кута обертання в досліджуваному спектральному діапазоні зникає. Натомість має місце сильне наростання абсолютної величини константи Верде, яке припадає головним чином на температурний інтервал $4,2 \text{ K} < T < 40 \text{ K}$. При температурі рідкого гелію максимально зафіксоване значення $V=-0,36$ град/(Е·см), що на два порядки перевищує цю величину в нелегованому CdTe. Отже, можна стверджувати про експериментальне спостереження гігантського ефекту Фарадея, який обумовлений проявом сильної s , p - f -обмінної взаємодії в напівмагнітних напівпровідниках із рідкоземельними іонами.

Необхідно відзначити, що поряд з спільними рисами між s , p - d та s , p - f -взаємодіями повинні проявлятися і відмінності хоча би внаслідок того, що внутрішня $4f$ -оболонка екранована сильніше за $3d$ -оболонку. Для виявлення цих відмінностей потрібні подальші комплексні дослідження як твердих розчинів Cd_{1-x}Dy_xTe, так і напівмагнетиків за участю інших рідкоземельних елементів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Комаров А.В., Рябченко С.М., Терлецкий О.В., Жеру И.И., Иванчук Р.Д. Магнитооптические исследования и двойной оптико-магнитный резонанс экситонной полосы в CdTe:Mn²⁺ // ЖЭТФ. - 1977. - **73**, вып.2 - С.608-618.
2. Schmidt G., Molenkamp L.W. Electrical spin injection into semiconductors // Physica. - 2001. - **Е9**. - P.202-208.
3. Chen C., Wang X., Liu A., Wu H. Faraday-rotation spectra of the diluted magnetic semiconductor Cd_{1-x}Gd_xTe // J. Appl. Phys. - 2000. - **87**, №9. - P.6463-6465.
4. Ватаманюк П.П., Савицкий А.В., Савчук А.Й., Ульяницкий К.С. Эффект Фарадея в полумагнитном полупроводнике Cd_{1-x}Mn_xTe: аномалии спектральной, магнитополевой и температурной зависимостей // ЖЭТФ. - 1988. - **94**, вып.10. - С.225-231.
5. Никитин П.И., Савчук А.И. Эффект Фарадея в полумагнитных полупроводниках // УФН. - 1990. - **160**, вып.11. - С.167-196.
6. Huggonard-Bruyere S., Buss C., Vouilloz F., Frey R., Flytzanis C. Faraday-rotation spectra of semimagnetic semiconductors // Phys. Rev. - 1994. - **В50**, №4. - P.2200-2207.