

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені В. Н. КАРАЗІНА

**ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРА МАГНІТНОГО ДИХРОЇЗМУ  
АНТИФЕРОМАГНІТНОГО КРИСТАЛА**

Методичні вказівки до загального лабораторного практикуму  
магістрів фізичного факультету

*Електронний ресурс*

Харків – 2024

УДК 577.3(075.8)

Д 70

**Рецензенти:**

**Д. М. Меренков** – ст. наук. співробітник, канд. фіз.-мат. наук, ФТІНТ ім. Б. І. Веркіна НАН України;

**О. М. Юнакова** – ст. наук. співробітник, канд. фіз.-мат. наук, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна.

*Затверджено до розміщення в мережі Інтернет рішенням Науково-методичної ради  
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна  
(протокол № 8 від 21 травня 2024 року)*

Д 70 **Дослідження** спектра магнітного дихроїзму антиферомагнітного кристала : методичні вказівки до загального лабораторного практикуму магістрів фізичного факультету [Електронний ресурс] / уклад. О. В. Милославська, О. М. Савченко, М. Ф. Харченко. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2024. – (PDF 24 с.)

Методичні вказівки «Дослідження спектра магнітного дихроїзму антиферомагнітного кристала» містять короткий опис природи, умов виникнення та типів магнітооптичних явищ. Надано характеристику станів поляризації світла, які можуть виникати в середовищах зі спонтанною або індукованою намагніченістю. Визначено явища оптичного і, зокрема, магнітного лінійного і циркулярного дихроїзму. Наведено описи методики вимірів, а також магнітооптичної спектральної установки, яку використано для цієї роботи, та процесу виконання лабораторного дослідження.

Для студентів спеціальності 104 «Фізика та астрономія».

© Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2024

© Милославська О. В., Савченко О. М., Харченко М. Ф., уклад., 2024

## Зміст

	Стор.
Вступ. Магнітооптичні ефекти – їх природа, типи та умови спостереження...	4
1. Визначення та природа виникнення магнітного дихроїзму в середовищі. Теоретичні відомості.....	5
2. Лабораторна робота. Експериментальне дослідження оптичного магнітного циркулярного дихроїзму в антиферомагнітному кристалі.....	11
Контрольні питання .....	18
ДОДАТОК 1. Приклад.....	19
ДОДАТОК 2. Опис модуляційної методики, яка використовується при вимірюваннях магнітного дихроїзму.....	20
Використані джерела.....	23

# **Дослідження спектру магнітного дихроїзму антиферомагнітного кристалу**

## **Вступ. Магнітооптичні ефекти – їх природа, типи та умови спостереження.**

Магнітооптичний ефект - це зміна оптичних властивостей речовини в залежності від її намагніченості або від напруженості прикладеного до неї зовнішнього магнітного поля. Спостерігати магнітооптичні явища можна при проходженні світла через намагнічене середовище і при відбитті від поверхні цього середовища.

Магнітооптичні дослідження при проходженні світла можуть відбуватися в поздовжній і поперечній геометріях, тобто при орієнтації магнітного поля вздовж (геометрія Фарадея) і перпендикулярно (геометрія Фохта) напрямку розповсюдження світла. У першому випадку можна спостерігати ефект Фарадея і магнітний циркулярний дихроїзм. У другому спостерігається ефект Котона-Мутона.

Магнітооптика широко використовується в фізиці конденсованого стану як тонкий інструмент досліджень важливих властивостей різних об'єктів. Об'єктами магнітооптичних досліджень можуть бути магніторозчинені та магнітоконцентровані сполуки: кристали, діелектричні і металічні плівки, масивні метали і сплави, а також такі актуальні в останні роки матеріали, як штучні нанорозмірні системи, метаматеріали з штучною оптичною дисперсією, плазмонні структури та магнітні фотонні кристали [3].

За допомогою методик, заснованих на магнітооптичних ефектах, можна вивчати рівні енергії іонів в магнітному полі, тонку енергетичну структуру електронних станів, магнітні і структурні фазові переходи, візуалізувати магнітні доменні структури і магнітні неоднорідності різної природи. Сполуки та штучні структури, в яких спостерігаються значні величини магнітооптичних ефектів, застосовуються в оптичних ізоляторах,

модуляторах, а в останні роки в спінтроніці, оптоелектроніці і в інформаційних технологіях.

## 1. Визначення та природа виникнення магнітного дихроїзму в середовищі. Теоретичні відомості.

Оптичні властивості середовища описуються тензором діелектричної проникності  $\varepsilon$ :

$$D_i(\omega) = \sum_j \varepsilon_{ij} E_j(\omega);$$

$\mathbf{D}$  – вектор електричної індукції, що характеризує реакцію середовища, на дію електричного поля світлової хвилі  $\mathbf{E}$ ,  $\omega$  – частота електромагнітного випромінювання. Компоненти тензора  $\varepsilon_{ij}$  визначають зв'язок проекцій  $\mathbf{D}$  і  $\mathbf{E}$  на осі координат; індекси  $i, j$  нумерують компоненти по осях декартової системи координат;  $i = x, y, z; j = x, y, z$ .

$$\varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix}$$

Якщо речовина ізотропна, не має спонтанної намагніченості і зовнішнє магнітне поле равно нулю, то тензор діелектричної проникності має вигляд

$$\varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{xx} \end{vmatrix}$$

В середовищі, яке намагнічене вздовж напрямку розповсюдження світла  $z$ , виникає одноосна анізотропія, і компоненти тензора  $\varepsilon$  можна записати як

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy} = -\varepsilon_{yx}, \varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zx} = \varepsilon_{zy} = 0.$$

В цьому випадку оптичні властивості магнітовпорядкованих або намагнічених середовищ описуються недиагональними компонентами тензора діелектричної проникності  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon(\mathbf{M}) = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ -\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix},$$

де  $M$  – намагніченість середовища.

Тензор діелектричної проникності пов'язаний з оптичними параметрами середовища:

$$\epsilon = (n - ik)^2$$

де  $n$  – показник заломлення середовища (параметр, що характеризує швидкість розповсюдження світла,  $n = c/v$ ,  $c$  – швидкість світла в вакуумі,  $v$  – фазова швидкість світла в середовищі);  $k$  – безрозмірний коефіцієнт екстинкції, який пов'язаний з коефіцієнтом поглинання  $\alpha = 4\pi k/\lambda$ .

В дослідженнях магнітооптичних ефектів використовується поляризоване світло. На відміну від природного, неполяризованого світла, в поляризованій хвилі коливання електричного вектора відбуваються визначеним чином: в лінійно поляризованій хвилі її електричний вектор  $E$  коливається в площині і його кінець описує пряму в площині, перпендикулярній напрямку розповсюдження світла. Еліптично поляризоване світло можна представити як таке, в якому кінець електричного вектора хвилі описує еліпс. Окремим випадком еліптичної поляризації є циркулярна, при якій кінець  $E$  описує коло в площині, перпендикулярній напрямку розповсюдження хвилі, з правим або лівим напрямком обертання.

Коливання електричного поля лінійно поляризованої монохроматичної електромагнітної хвилі, що розповсюджується вздовж осі  $z$ , можна представити як

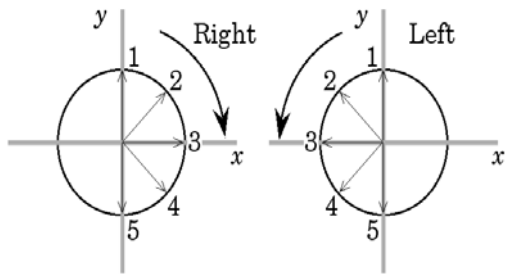
$$E = E_0 \sin(\omega t + kz),$$

де  $E_0$  є амплітуда коливань електричного вектору,  $(\omega t + kz)$  є фазою коливання хвилі,  $\omega$  – частота,  $t$  – час і  $k$  – хвильове число, яке дорівнює числу довжин хвиль  $\lambda$  на відстані  $2\pi$  ( $k = 2\pi/\lambda = \omega/v$ ,  $v$  – фазова швидкість світла).

Таку хвилю можна представити як суперпозицію двох циркулярно поляризованих коливань з однаковою амплітудою, але з протилежним напрямком обертання електричного вектора

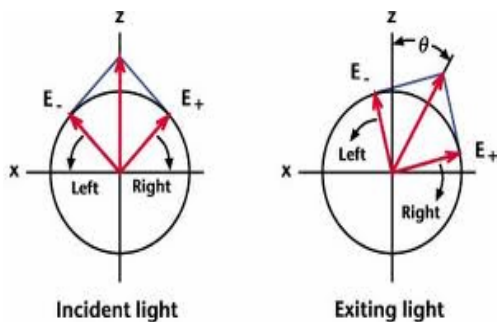
$$E(\omega) = E_+(\omega) + E_-(\omega), \quad E_+(\omega) = E_-(\omega) = E(\omega)/2$$

Це ілюструє Рис.1. Напрямок розповсюдження світла, а також орієнтація магнітного поля або намагніченості середовища перпендикулярні площині малюнку.



**Рис.1.** Схематичне зображення циркулярно поляризованих компонент світла з правим чи лівим напрямком обертання електричного вектора,  $E_+ = E_-$ . Радіус кола показує величину амплітуди коливань електричного вектора електромагнітної хвилі;  $H=0$ ;  $n_+ = n_-$ ,  $\kappa_+ = \kappa_-$ , ( $n_{\pm}$  і  $\kappa_{\pm}$  - відповідно, показник заломлення та безрозмірний коефіцієнт екстинкції для двох циркулярних мод світла).

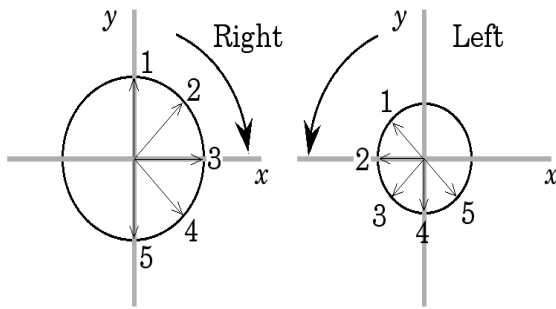
В середовищі, намагніченому паралельно напрямку світлового променя, дві циркулярно поляризовані моди розповсюджуються з різними швидкостями, тобто з  $n_+ \neq n_-$ . Таке явище є циркулярним двозаломленням. В результаті різниці швидкостей між хвилями «набігає» різниця фаз. За рахунок цього на виході із зразка суперпозиція циркулярно поляризованих мод складає лінійно поляризовану хвилю, але з площиною поляризації, повернутою відносно початкового положення (Рис.2).



**Рис.2.**  $H \neq 0$ : обертання площини лінійно поляризованого світла на кут  $\theta$  при складанні циркулярних мод з правим і лівим напрямком обертання, однаковою амплітудою  $E_+ = E_-$ , але різними показниками заломлення,  $n_+ \neq n_-$ ;  $\kappa_+ = \kappa_-$  на виході із зразку.

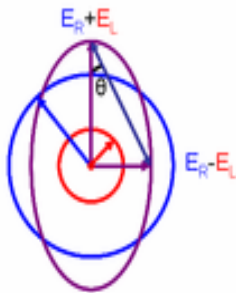
Крім того, при проходженні через намагнічене середовище циркулярні моди з протилежним напрямком обертання можуть поглинатися по-різному з

$k_+ \neq k_-$ , і в цьому випадку амплітуди циркулярних мод вже різні,  $E_+ \neq E_-$  (Рис3).



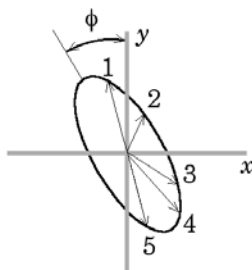
**Рис.3.**  $H \neq 0$ : ліво- та право циркулярно поляризовані компоненти мають різну амплітуду коливань електричного вектора,  $n_+ \neq n_-$ ;  $k \neq k$

Після проходження через середовище вздовж напрямку магнітного поля в результаті суперпозиції циркулярних мод із різними амплітудами виникає еліптична поляризація (Рис.4).



**Рис.4.** Поява еліптичної поляризації при складанні двох циркулярно поляризованих мод з  $E_+ \neq E_-$  як наслідок циркулярного дихроїзму.

Якщо, крім різних амплітуд, циркулярні моди набувають різницю фаз, то на виході маємо еліптично поляризовану хвилю з віссю еліпса, повернутою відносно початкового положення осі поляризації лінійно поляризованого світла на вході в зразок (Рис.5).



**Рис.5.** Еліптична поляризація світла з віссю, оберненою відносно стартового положення площини поляризації як результат складання двох

циркулярно поляризованих компонент з різними швидкостями та коефіцієнтами поглинання,  $n_+ \neq n_-$ ;  $\kappa_+ \neq \kappa_-$ ,  $\mathbf{H} \neq 0$ .

В магнітооптичному експерименті вимірюють кут обертання великої осі еліпса відносно площини поляризації світла, що падає на зразок (ефект Фарадея) (Рис.2), або ступінь еліптичності – кут, тангенс якого дорівнює відношенню малої та великої осей еліпса (магнітний циркулярний дихроїзм, Рис.4,5).

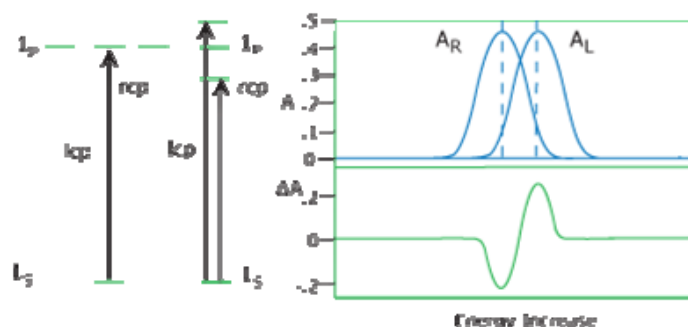
*Дихроїзм*, незалежно від його природи, є властивістю середовища по-різному поглинати світло різних поляризацій: в разі лінійного дихроїзму це лінійно поляризовані взаємно ортогональні моди світла, в разі циркулярного (колового) – це циркулярно поляризовані моди з правим або лівим напрямком обертання кінця електричного вектору. Ця властивість характерна для об'єктів, які описуються аксіальним вектором (наприклад, кристали без центра симетрії і площини симетрії), або знаходяться під дією збудження із симетрією аксіального вектора, не інваріантного по відношенню до операції обертання часу, наприклад, магнітного поля.

В даній роботі розглядається і використовується на практиці таке магнітооптичне явище, як магнітний дихроїзм світла, тобто дихроїзм, наведений магнітним полем прикладеним паралельно напрямку світлового променя.

При розгляді магнітооптичних явищ треба опиратися на первинне явище – ефект Зеємана, який полягає в розщеплення рівнів енергії в магнітному полі і який спостерігається як розщеплення смуг оптичного спектру кристалу. Величина розщеплення смуги  $\Delta\omega$  пропорційна напруженості магнітного поля:  $\Delta\omega \sim g\mu_B H$ , де  $\omega$  є частотою світла,  $\mu_B$  - магнетон Бора,  $g$  – множник Ланде. В магнітному полі, яке діє на зразок паралельно напрямку розповсюдження світла, в спектрі поглинання на ділянці частот оптичного переходу можуть спостерігатись особливості з частотами  $(\omega_0 + \Delta\omega)$  і  $(\omega_0 - \Delta\omega)$ , де  $\omega_0$  є частотою смуги поглинання при нульовому полі. Як правило, величини розщеплення

$\Delta\omega$  малі, і цю тонку структуру спектру поглинання важко виявити – найчастіше тонка структура «ховається» в відносно широкій смузі поглинання. Роздільна здатність спектроскопічного обладнання може бути недостатньою для спостереження тонких особливостей, і тоді одержати відповідну інформацію дозволяє використання магнітооптичних методик.

На Рис.6 (ліва частина) дуже схематично показано електронний перехід між енергетичними станами  $1S-1P$ . Магнітне поле, прикладене вздовж напрямку розповсюдження світла, знімає виродження стану  $1P$ , що призводить до його розщеплення. Згідно правил відбору, для циркулярних поляризацій з протилежними напрямками обертання в системі реалізуються два оптичних переходи. Поглинання для правої ( $rcp$ ) та лівої ( $lcp$ ) циркулярних мод відбувається при різних енергіях, які відповідають частотам  $(\omega_0 + \Delta\omega)$  і  $(\omega_0 - \Delta\omega)$  в спектрі поглинання (Рис.6).



**Рис.6.** Схематична ілюстрація спектрального спостереження магнітного циркулярного дихроїзму.

[<https://www.hindsinstruments.com/techniques/dichroism/magnetic-circular-dichroism/>]

На правій частині Рис.6 схематично показано результат спектрального спостереження оптичного переходу в магнітному полі: розщеплення смуги поглинання (зверху, позначено  $A$ ) на смуги  $A_R$  і  $A_L$ , сформовані, відповідно, оптичними переходами для правої і лівої циркулярних поляризацій, і спектральну криву магнітного циркулярного дихроїзму (знизу,  $\Delta A$ ), яка має вигляд першої похідної.

Нескладно показати, чим обумовлений такий вигляд залежності.

Величину дихроїзму визначаємо як різницю коефіцієнтів поглинання  $\alpha$ :

$\Delta\alpha = \alpha_+ - \alpha_-$ , де  $\alpha_+$ ,  $\alpha_-$  - коефіцієнти поглинання світла для двох супряжених лінійних або циркулярних поляризацій (ми розглядаємо циркулярні).

В магнітному полі смуга поглинання з частотою  $\omega_0$  розщеплюється на дві компоненти з коефіцієнтами поглинання

$$\alpha_+(\omega) = \alpha(\omega_0 + \Delta\omega/2) \quad \text{і} \quad \alpha_-(\omega) = \alpha(\omega_0 - \Delta\omega/2),$$

де  $\Delta\omega$  є величина розщеплення смуги поглинання в магнітному полі.

Розклавши  $\alpha_{\pm}(\omega)$  в ряд по  $\Delta\omega$ , одержимо

$$\alpha_{\pm}(\omega) = \alpha(\omega_0) \pm (d\alpha(\omega)/d\omega) \cdot \Delta\omega/2$$

Різниця між коефіцієнтам поглинання для двох мод  $\alpha_+$  і  $\alpha_-$

$$\Delta\alpha = \alpha_+(\omega) - \alpha_-(\omega) = (d\alpha(\omega)/d\omega) \cdot \Delta\omega$$

Таким чином, спектральна крива дихроїзму в районі смуги поглинання буде мати вигляд першої похідної.

Диференційний характер магнітооптичних ефектів, зокрема магнітного циркулярного дихроїзму, дозволяє використовувати відповідні методи у якості інформативного і чутливого інструменту спектральних досліджень.

Характер кривих дисперсії магнітного дихроїзму в області смуг поглинання визначається характером та величинами розщеплення рівнів та відносними інтенсивностями  $I_+$  та  $I_-$  оптичних переходів в різних станах поляризації світла.

## **2 Лабораторна робота. Експериментальне дослідження оптичного магнітного циркулярного дихроїзму в антиферомагнітному кристалі**

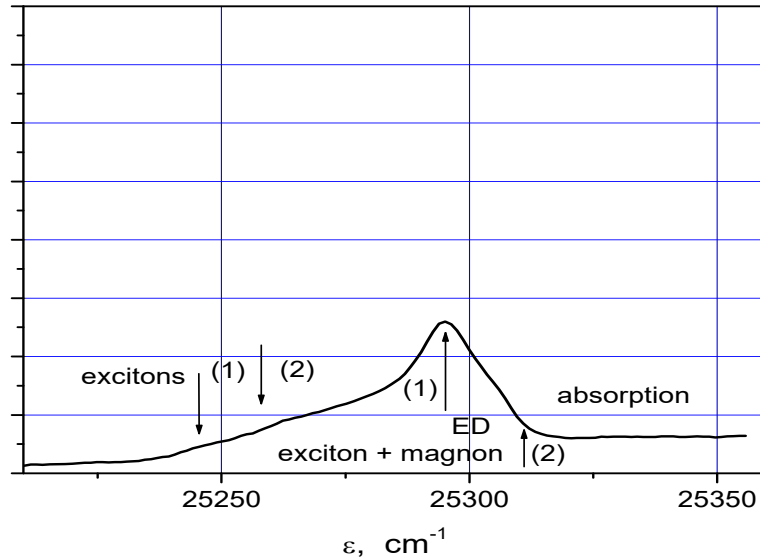
Вивчення дихроїзму на обраних ділянках оптичного спектру в області смуг поглинання дозволяє отримувати якісну та кількісну інформацію про основні та збуджені стани речовин та сполук, про величини магнітного розщеплення рівнів та про симетрію станів, що беруть участь в оптичних переходах.

**Мета лабораторної роботи** - провести виміри магнітного циркулярного дихроїзму в антиферромагнітному кристалі фториду марганцю в області оптичного переходу в іоні  $Mn^{2+}$ . Виявити спектральні особливості оптичного переходу.

Антиферромагнітний кристал фториду марганцю  $MnF_2$  має тетрагональну симетрію. Температура його магнітного впорядкування  $T_N=67K$ . Для досліджень використовується зразок  $MnF_2$  в формі паралелепіпеда розміром  $2 \times 2 \times 0.19$  мм (товщина  $d=0.19$  мм – вертикальний розмір вздовж тетрагональної осі). Кристал прозорий, блідо-рожевого забарвлення. В видимому діапазоні в спектрі поглинання  $MnF_2$  спостерігаються три групи смуг, пов'язаних з електронними переходами в іоні  $Mn^{2+}$ .

**Задача даної роботи** – виміри спектральної залежності магнітного циркулярного дихроїзму в інтервалі спектру, де спостерігається С-група оптичних переходів з основного стану  ${}^6A_{1g}({}^6S_{5/2})$  на розщеплений кристалічним полем і спін-орбітальною взаємодією збуджений  ${}^4E_g, {}^4A_{1g}({}^4G)$  стан іону двоцвалентного марганцю [2].

На Рис.7 показана смуга поглинання в області С- групи, попередньо експериментально одержана в інтервалі частот від  $25200 \text{ см}^{-1}$  до  $25450 \text{ см}^{-1}$  (в довжинах хвиль  $396 - 392 \text{ нм}$ , фактично, фіолетовий край видимого спектру). На малюнку стрілками показані відомі з літературних даних [2] оптичні особливості ексітонної та ексітон-магноної природи. Шляхом вимірів спектру магнітного циркулярного дихроїзму передбачається експериментально показати складну структуру спектру в області електро-дипольного переходу.



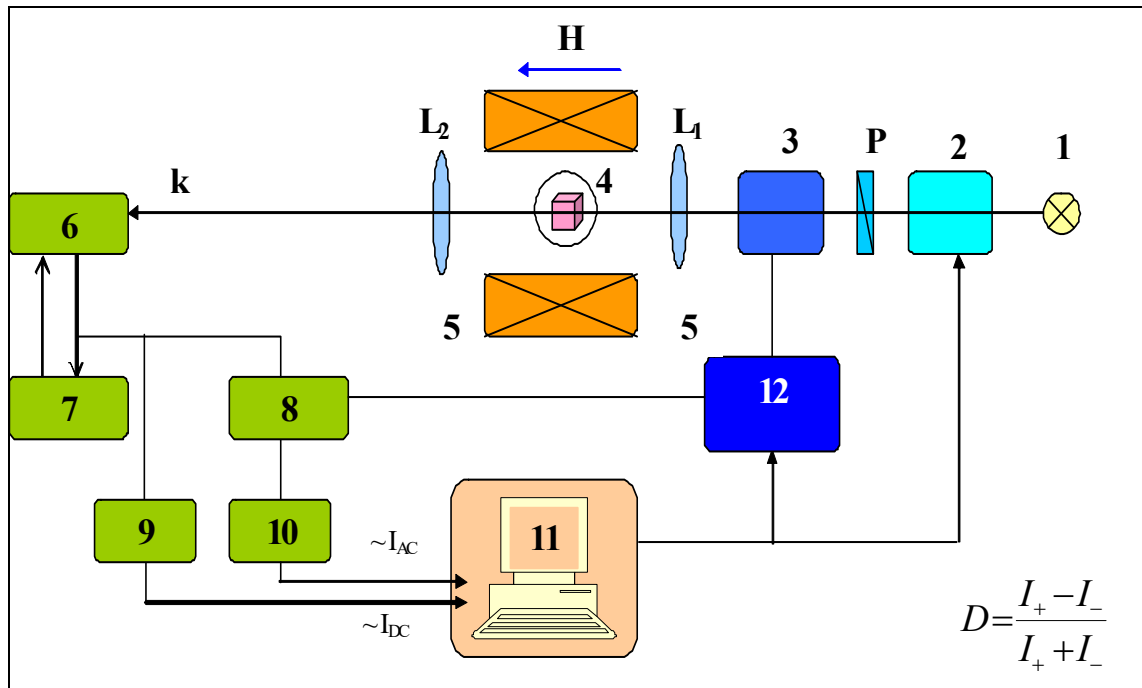
**Рис.7.** Смуга поглинання, створена електро-дипольним (ED) переходом  ${}^6A_{1g}({}^6S_{5/2}) - {}^4E_g {}^4A_{1g}({}^4G)$ .

### Опис магнітооптичної спектральної установки для низькотемпературних досліджень

Оптичні характеристики середовища змінюються з частотою (довжиною хвилі) світла.

В даній роботі передбачається вимірювання частотних залежностей (спектрів) наведеного магнітним полем циркулярного дихроїзму при низьких температурах.

Установка (Рис.8), яка використовується, дає можливість вимірювання оптичного поглинання, а також таких магнітооптичних ефектів, як магнітний лінійний та циркулярний дихроїзм, лінійне та циркулярне двозаломлення, полярний ефект Керра. Дослідження проводяться в магнітному полі, спрямованому паралельно напрямку розповсюдження світла.



**Рис.8.** Магнітооптична спектральна установка для низькотемпературних досліджень. Основні параметри установки: діапазон довжин хвиль – 300 - 800 нм (або частот  $33333 - 12500 \text{ см}^{-1}$ ); робочий інтервал температури зразка – 6 – 300К; магнітне поле на зразку може змінюватись від 0 до 7.5 Т.

1 – джерело світла; 2 – монохроматор; P- поляризатор 3 – п'єзооптичний модулятор; 4 – зразок в кріостаті; 5,  $L_1$ ,  $L_2$  – лінзи-конденсори; 6 – фотоелектронний помножувач; 7 – джерело живлення ФЕП; 8 – синхродетектор (lock-in multiplier) 9, 10 – вольтметри; 11 – персональний комп'ютер; 12 – джерело живлення модулятора.

Світло від джерела 1 (для даного експеримента використовується лампа розжарювання) прямує до вхідної щілини монохроматора 2. Після монохроматора, приладу, призначеного для виділення конкретної довжини хвилі світла  $\lambda$  із широкого спектру випромінювання лампи, монохроматичний промінь світла потрапляє на поляризатор P, вісь поляризації якого орієнтована під кутом  $45^\circ$  до осі анізотропії кристалу кварцового п'єзооптичного модулятора 3.

П'єзооптичний модулятор є важливим елементом установки. Це пристрій, який дозволяє перетворювати лінійно-поляризований монохроматичний промінь в циркулярно або лінійно поляризоване світло так, як це робить фазозсувна (чверть- або напівхвильова) двозаломлююча пластина. Його принцип дії оснований на фотопружному ефекті – зміні оптичної анізотропії

робочого елемента (в нашому пристрої це кристал кварцу) під дією механічної напруги. В пристрої, що використовується, змінна електрична напруга створює деформацію кристалу в модуляторі і модулятор періодично, з визначеною частотою, перетворює лінійно поляризований промінь в світло з право- та ліво-обертаючою циркулярною поляризацією або ортогональними лінійно поляризованими модами. Важливою властивістю модулятора є можливість використання на різних довжинах хвиль – амплітуда змінної напруги, що створює деформацію робочого кристалу модулятора, регулюється відповідно робочій довжині хвилі. Треба пам'ятати, що оптичні та пружні характеристики кристалу кварцу залежать від температури. Тому для досягнення на виході з модулятора станів поляризації світла, потрібних для вимірів, робота модулятора повинна відбуватись при постійній заданій температурі.

Після проходження світлової хвилі через модулятор стан її поляризації змінюється. Світло стає циркулярно поляризованим на частоті 18Гц і лінійно поляризованим на частоті 36Гц. Промінь світла, що пройшов через модулятор, за допомогою лінзи-конденсора  $L_1$  фокусується на зразку 4, який знаходиться в оптичному гелієвому кріостаті. Зразок фториду марганцю закріплюється в капсулі, розміщеній в каналі надпровідного соленоїда 5, вмонтованого в кріостат. Зразок встановлено таким чином, щоб тетрагональна вісь кристала була орієнтована паралельно напрямку розповсюдження світла, а також магнітному полю. Величина магнітного поля визначається за струмом соленоїда.

Захолоджувати зразок необхідно, адже зрозуміло, що дослідження антиферомагнітного кристалу повинно проводитись при температурі, нижчу за температуру його магнітного впорядкування (точку Нееля). Кріостат потрібен також для створення умов роботи надпровідного соленоїда.

Після проходження зразка, світло системою лінз  $L_2$  збирається на фотокатоді фотоелектронного помножувача ФЕП 6. Сигнал з ФЕП надходить до джерела високої напруги 7, що дає постійну складову сигналу, і до синхронного підсилювача (синхродетектора) перемінної складової 8. Через

вольтметри **9** і **10** інформація про інтегральну інтенсивність світла, яке пройшло через зразок (постійна складова сигналу), і про дихроїзм (змінна складова) в вигляді оцифрованого сигналу надходить до персонального комп'ютера **11**.

Установка також містить елементи, які не показані на Рис.8: генератор живлення надпровідного соленоїда і вольтметр для контролю напруженості магнітного поля; джерело живлення пічки для зміни температури зразка і вольтметр для контролю температури; пристрій для контролю температури модулятора.

Система реєстрації сигналу за допомогою синхронного підсилювача налаштована таким чином, що у кінцевому результаті вимірів можна одержувати інформацію як про циркулярний, так і про лінійний дихроїзм.

Інтенсивності право - та лівополяризованої мод світла після проходження крізь зразок можна записати за законом Бугера-Ламберта у вигляді

$$I_{+} = I_0 e^{-\alpha_{+} d} \quad \text{і} \quad I_{-} = I_0 e^{-\alpha_{-} d}$$

де  $I_0$  - інтенсивність світла, що падає на зразок,  $d$  – лінійний розмір зразка в напрямку проходження світла,  $\alpha_{+}$  і  $\alpha_{-}$  - коефіцієнти поглинання для двох хвиль з різними станами поляризації – циркулярних, з протилежним напрямком обертання електричного вектору, або ортогональних лінійних мод поляризації.

Система реєстрації сигналу налаштована спеціальним чином так, щоб на виході проводились виміри величини  $D$ :

$$D = \frac{I_{+} - I_{-}}{I_{+} + I_{-}} = \frac{e^{\Delta\alpha d} - 1}{e^{\Delta\alpha d} + 1}$$

Легко показати, що такий спосіб дозволяє безпосередньо одержати саме величину різниці коефіцієнтів поглинання  $\Delta\alpha$ , без урахування інтенсивності світла  $I_0$ . Таким чином, ми уникаємо впливу паразитних факторів (наприклад, зміни освітленості кімнати або нестабільності електричної напруги) на результати вимірів.

$$e^{\Delta\alpha d} = \frac{1+D}{1-D},$$

$$\Delta\alpha d = \ln \frac{1+D}{1-D}$$

Магнітний циркулярний дихроїзм фактично проявляється як еліптичність, тобто відношення осей еліпса поляризації при достатньо малих  $D$ ,  $\Delta\alpha d \approx 2D$ .

### Хід роботи

1. Відкачати вакуумний тепловий екран оптичного кріостату за допомогою форвакуумного насоса до тиску не більше, чим  $2 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст.
2. Залити рідкий азот в азотну ємність кріостата (тепловий екран кріостата).
3. Ввімкнути реєструючі пристрої і дати їм прогрітися не менше години.
4. Ввімкнути блок живлення модулятора. Поступово довести температуру модулятора до  $29^\circ\text{C}$ , орієнтуючись за показниками різниці потенціалів термопари, встановленої на модуляторі, та її таблиці градуювання. При вимірах відстежувати, щоб температура була постійною, і, якщо необхідно, регулювати її.
5. Залити рідкий гелій до оптичного кріостата. Контроль температури в кріостаті відбувається за допомогою мідь-константової термопари, показників вольтметра та таблиці градуювання. Температура зразка має бути нижче за точку магнітного впорядкування кристалу,  $T_N=67\text{K}$ . В даному дослідженні зразок заохолоджується до  $T \approx 10\text{K}$ .
6. Ввімкнути джерело світла.
7. За допомогою окуляру перевірити, чи попадає світло на обрану ділянку зразку, та за допомогою конденсорів (лінз) від'юстувати оптичну схему.
8. Ввімкнути генерацію модуляції і встановити амплітуду модуляції, що відповідає довжині хвилі в тому діапазоні спектру, де проводяться вимірювання (див. таблицю градуювання).
9. Ввімкнути джерело живлення соленоїда. Поступово ввести струм і довести напруженість магнітного поля до величини  $50\text{kE}$ .

10. За допомогою комп'ютера задати інтервал спектру і величину «кроку» вимірів  $\lambda$  світла, що виходить із монохроматора і регулюється кроковим двигуном, зв'язаним з монохроматором.
11. Отримати спектр магнітного циркулярного дихроїзму в заданому діапазоні (частоти  $25200 - 25350 \text{ см}^{-1}$ , або довжини хвиль  $395 - 397 \text{ нм}$ ) при температурі заохоложеного зразка. Зареєструвати спектр за допомогою комп'ютера.
12. Зробити висновок та обговорити з викладачем характер та природу отриманих спектральних залежностей магнітного циркулярного дихроїзму в досліджуваному діапазоні частот.

### **Контрольні питання**

1. Які стани поляризації світла можуть бути реалізовані?
2. Які ефекти спостерігають при взаємодії світла із середовищем в зовнішньому магнітному полі або при наявності внутрішньої намагніченості?
3. Які оптичні параметри описують магнітне обертання площини поляризації та магнітний дихроїзм?
4. З чим пов'язано виникнення еліптичної поляризації світла при проходженні лінійно поляризованого світла через кристал зі спонтанним магнітним моментом або в присутності магнітного поля?
5. Природа магнітного дихроїзму. Чим визначається величина дихроїзму?
6. Яку інформацію можна одержувати із досліджень магнітного дихроїзму? Чому методика вимірювання дихроїзму має перевагу перед вимірами спектрів поглинання речовин?
7. Елементи експериментальної установки та їх призначення у вимірах.
8. Оптична схема, яка задіяна для досліджень магнітооптичних ефектів – основні елементи.
9. Принцип модуляційної методики поляриметричних вимірів. На якому фізичному явищі основана робота п'єзо оптичного модулятора?

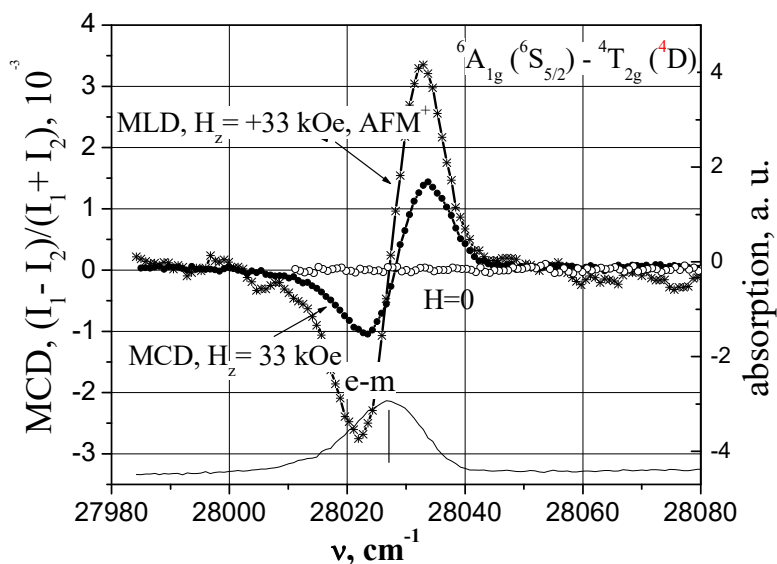
10. За яким принципом обирається спектральний діапазон при дослідженнях магнітного дихроїзму в кристалі?

11. Які стани поляризації світла можуть бути реалізовані?

## ДОДАТОК 1

### Приклад

На Рис.9 приведено результат магнітооптичних досліджень антиферомагнетика  $\text{MnF}_2$  в області спектру  $27980 - 28080 \text{ cm}^{-1}$  як ілюстрація типового ходу спектральної залежності магнітного дихроїзму. Результати, приведені на Рис.9, одержані при  $T=10\text{K}$  за допомогою вищеписаних методики та установки.



**Рис.9.** Спектр магнітного циркулярного дихроїзму (MCD) та магнітного лінійного дихроїзму (MLD), індукованих поздовжнім магнітним полем, в області оптичних переходів  ${}^6A_{1g}({}^6S_{5/2}) - {}^4T_{2g}({}^4D)$  D-групи смуг в кристалі  $\text{MnF}_2$ . Крапки ілюструють MCD, зірочки – MLD, світлі кружки – дихроїзм в нульовому полі. Знизу лінією показана смуга поглинання [2].

## ДОДАТОК 2

### Опис модуляційної методики, яка використовується при вимірюваннях магнітного дихроїзму

Циркулярно поляризоване світло з протилежними напрямками обертання кінця електричного вектора можна одержати за допомогою двозаломлюючої пластинки з товщиною, кратною до чверті довжини хвилі (чверть-хвильової пластинки), на яку падає монохроматичне лінійно поляризоване світло, площина поляризації якого орієнтована під кутом  $45^\circ$  до осі анізотропії («швидкої» осі) пластини. Кут  $45^\circ$  - це умова того, що на виході з двозаломлюючої пластинки буде або циркулярно, або лінійно поляризоване світло, в залежності від того, якому співвідношенню «довжина хвилі – товщина» вона задовольняє: при описаних умовах чверть-хвильова пластинка буде давати на виході циркулярну поляризацію, а напів-хвильова – лінійну [5]. Лінійно поляризоване світло можна уявити як суперпозицію двох циркулярно поляризованих мод з протилежним напрямком обертання кінця електричного вектору. У чверть-хвильовій пластинці ці моди мають різну швидкість розповсюдження (мають різні показники заломлення), і між ними виникає «запізнювання», або зсув по фазі  $\delta$ . Внаслідок цього на виході суперпозиція циркулярно-поляризованих мод буде мати інший стан поляризації, ніж на вході, в залежності від величини зсуву фаз: при  $\delta = \pi$  отримуємо лінійно поляризоване світло з площиною поляризації, повернутою на  $90^\circ$ , при  $\delta = \pm\pi/2$  світло буде право- чи ліво циркулярно поляризованим [5]. Якщо в фазовій пластинці є поглинання, світло не тільки набуває обертання площини поляризації, а стає еліптичним. Циркулярна та лінійна поляризація – це крайні випадки еліптично поляризованого світла (Рис.10).

В сучасній експериментальній практиці вимірювання дихроїзму проводять за допомогою модуляційного методу [5].

Модуляція оптичного випромінювання у нашому випадку – це зміна поляризації коливань оптичного випромінювання за заданим законом. Для модуляції світла застосовують двозаломлюючий елемент з матеріалу з природною або наведеною анізотропією. До цього елемента прикладається зовнішнє керуюче поле (напр., електричне або поле пружних напруг, яке приводить до зміни оптичних характеристик середовища. Також використовують штучну оптичну анізотропію, яка з'являється в деяких твердих тілах під дією пружних напруг (це явище є п'єзооптичним ефектом, або фотопружністю). Лінійно поляризоване світло, коли проходить через фотопружне середовище з наведеним двозаломленням, стає еліптично поляризованим.

В даній роботі використовується п'єзооптичний модулятор.

П'єзооптичний модулятор – це фактично чверть-хвильова двозаломлююча система з регульованим зсувом фаз між двома циркулярно поляризованими модами. На кварцову пластину, яка є основою модулятора, подається перемінна електрична напруга частотою  $\nu$  і амплітудою  $V$ :

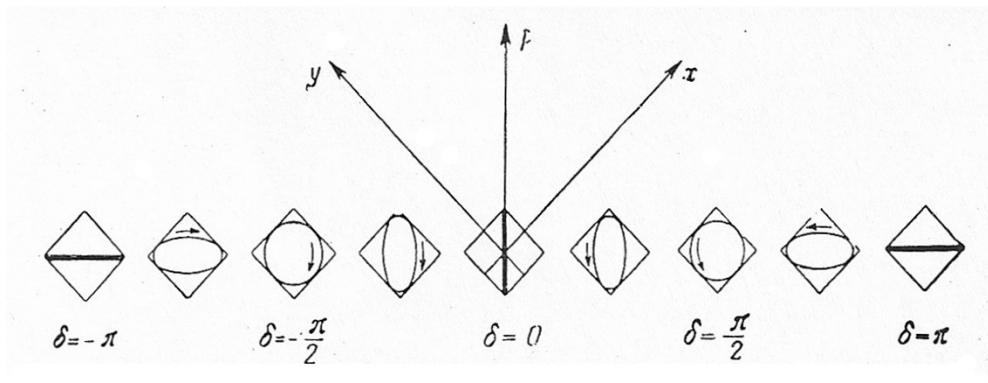
$$V = V_0 \sin(\nu t)$$

Внаслідок наведеного двозаломлення в кварцовій пластині створюється зсув по фазі між двома компонентами лінійно поляризованого світла, що падає на кварцову пластину,

$\delta = bV_0 \sin(\nu t)$ , де  $b$  – постійна величина для даної довжини хвилі;

$$\delta = \delta_0 \sin(\nu t), \quad \delta_0 = 1.98 \text{ рад.}$$

Величина  $\delta_0 = 1.98 \text{ рад}$  підтримується постійною при вимірах спектрів циркулярного дихроїзму за допомогою зміни амплітуди прикладеної напруги  $V_0$  в залежності від довжини хвилі (для одержання спектрів лінійного дихроїзму  $\delta_0 = 2.41 \text{ рад}$ ). Величини піка запізнювання фази  $\delta_0 = 1.98$  і  $\delta_0 = 2.41 \text{ рад}$  одержано із міркувань максимальної чутливості установки, при розрахунках функцій, що описують величини змінної частини напруги на фотоелектронному помножувачі, яка пропорційна величині дихроїзму [5]. Змінна частина напруги має синусоїдальний хід.



**Рис.10.** Дія двозаломлюючої пластинки із змінним запізнюванням на лінійно-поляризоване світло.  $\delta$  - різниця фаз (зсув по фазі) двох коливань, яка утворюється на виході із пластини [5].

За період зміни прикладеної до модулятора напруги, лінійно поляризоване світло стає циркулярно поляризованим (зсув по фазі становить  $\pi/2$ ), спочатку з правим напрямком обертання кінця електричного вектора, потім з лівим напрямком. Таким чином, світло, що падає на зразок, є промодульованим по стану поляризації. Якщо зразок виявляє дихроїчні властивості, світло після проходження зразка є промодульованим із інтенсивності з частотою  $\nu$ , для циркулярно поляризованого світла, або ж з частотою  $2\nu$  для лінійно поляризованого. Далі світло потрапляє на фотоприймач, напруга на виході якого пропорційна інтенсивності падаючого світла. Сигнал з фотоприймача несе інформацію, що визначає дихроїзм об'єкта досліджень: постійна складова сигналу пропорційна середній інтенсивності світла ( $I_+ + I_-$ ), а амплітуда змінної складової пропорційна різниці інтенсивностей поляризацій ( $I_+ - I_-$ ), циркулярних на частоті  $\nu$ , а лінійних на частоті  $2\nu$ .

Використання модуляційної методики дозволяє проводити поляризаційні виміри спектрів незалежно від загального світлового потоку, що потрапляє на зразок, поглинання конкретного зразку і буде визначати тільки величину дихроїзму.

## Використані джерела

1. Katsuaki Sato, Takayuki Ishibashi. **Fundamentals of Magneto-Optical Spectroscopy**. *Frontiers in Physics*. Volume 10, 1-15 2022.  
<https://doi.org/10.3389/fphy.2022.946515>
2. N.F. Kharchenko, O.V. Miloslavskaya, A.A. Milner. **Odd magnetic dichroism of linearly polarized light in the antiferromagnet MnF<sub>2</sub>**. *Low Temperature Physics* **31**, No.8, 825-830, 2005.
3. О. Морозова, О.М. Савченко, О.В. Милославська. **Фарадєєво обертання у магнітофотонних кристалах**. Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна. Тези конференції АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ФІЗИКИ ТА ЇХ ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ. 21 – 22 квітня 2021 р., НТУ «ХП» м. Харків, Україна. 2021, С.13.
4. Taskeya Haider. **A Review of Magneto-Optic Effects and its Application**. *International Journal of Electromagnetics and Applications*. **7** No.1, 17-24, 2017. doi:10.5923/j.ijea.20170701.03
5. Léon Velluz, Franc-Nohain, Maurice Le Grand, Marc Grosjean. **Optical Circular Dichroism: Principles, Measurements, and Applications**. Verlag Chemie, 247, 1965.
6. Born, M. and Wolf, E. **Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference, and Diffraction of Light**. Cambridge University Press, London. 1999. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781139644181>.

Електронне навчальне видання комбінованого використання  
Можна використовувати в локальному та мережному режимі

**Милославська** Ольга Володимирівна  
**Савченко** Олена Максимівна  
**Харченко** Микола Федорович

## **ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРА МАГНІТНОГО ДИХРОЇЗМУ АНТИФЕРОМАГНІТНОГО КРИСТАЛА**

Методичні вказівки до загального лабораторного практикуму  
магістрів фізичного факультету

В авторській редакції

Підписано до розміщення 21.05.24 р. Гарнітура Times New Roman.  
Ум. друк. арк. 1,09. Обсяг 0,486 Мб. Зам. № 111/24.

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.2009

Видавництво ХНУ імені В. Н. Каразіна