

## Вимірювання індукції магнітного поля із застосуванням ефекту Зеемана в ядерному квадрупольному резонансі сполук GaSe та InSe

А.П. Саміла<sup>1,\*</sup>, Г.І. Ластівка<sup>1</sup>, В.О. Хандожко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,  
вул. Коцюбинського, 2, 58000 Чернівці, Україна

<sup>2</sup> Телерадіокомпанія «НБМ», вул. Електриків, 26, 04176 Київ, Україна

(Одержано 12.09.2016, опубліковано online 23.12.2016)

Використовуючи імпульсний метод ЯКР з швидким перетворенням Фур'є сигналів спаду спінової індукції, досліджено вплив зовнішнього слабкого магнітного поля ( $0 \div 10$  Гс) на спектральні лінії ЯКР  $^{69}\text{Ga}$  та  $^{115}\text{In}$  в шаруватих напівпровідникових сполуках GaSe та InSe. Встановлено, що розщеплення резонансних ліній в результаті ефекту Зеемана може бути використано для визначення напрямку дії та оцінки величини індукції прикладеного магнітного поля.

**Ключові слова:** Ефект Зеемана, Магнітна індукція, Ядерний квадрупольний резонанс, Шаруваті напівпровідники.

DOI: [10.21272/jnep.8\(4\(2\)\).04081](https://doi.org/10.21272/jnep.8(4(2)).04081)

PACS numbers: 07.55.Ge, 76.60.Gv, 71.70.Ej

### 1. ВСТУП

Інтерес до магнітометрії слабких магнітних полів викликаний не тільки особливостями магнітного поля Землі, а й існуванням природної магнітної активності живих організмів, зокрема – людини. Як сенсори магнітного поля найбільшого поширення набули давачі на основі ефекту Холла, проте в області слабких магнітних полів ( $< 10$  Гс) вони є неефективними внаслідок недостатньої чутливості за рівнем вимірювального сигналу [1, 2].

Ефект Зеемана в ядерному квадрупольному резонансі (ЯКР) виникає при накладанні на досліджуваний зразок слабкого магнітного поля, яке викликає розщеплення резонансних ліній ЯКР, що є меншим за відстань між рівнями квадрупольної енергії. Зазначений ефект обумовлений тим, що за присутності магнітного поля квантова частинка зі спіновим магнітним моментом отримує додаткову енергію пропорційну останньому [3]. Додаткова енергія призводить до зняття виродження атомних станів за магнітним квантовим числом і до розщеплення резонансних ліній.

Напівпровідникові сполуки GaSe та InSe вирізняються шаруватою кристалічною структурою. Останнє призводить до сильної анізотропії їх фізичних властивостей і, як наслідок, до появи градієнта електричного поля на металевих вузлах Ga та In [4]. Наявність квадрупольних моментів й висока природна поширеність ізотопів  $^{69}\text{Ga}$  та  $^{115}\text{In}$  дозволяє спостерігати досить інтенсивні сигнали ЯКР [5, 6]. Метою даної роботи є дослідження поведінки спектрів ЯКР у напівпровідникових кристалах GaSe і InSe при впливі слабкого магнітного поля.

### 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД

У випадку накладання на монокристалічний зразок зовнішнього магнітного поля  $H_0$  рівні ядерної квадрупольної енергії описуються виразом [3]:

$$E_Q = \frac{eQq_{zz}}{4J(2J-1)} [3m^2 - J(J+1)] \pm \gamma \hbar m H_0 \cos \theta, \quad (1)$$

де  $\theta$  – кут між напрямком квадрупольної поляризації та зовнішнім магнітним полем,  $H_0$  – величина напруженості зовнішнього магнітного поля,  $J$  – ядерний спин,  $\gamma$  – гіромагнітне відношення для ядер  $^{69}\text{Ga}$  та  $^{115}\text{In}$ .

З виразу (1) випливає, що магнітне поле знімає  $\pm m$  – виродження і викликає розщеплення кожного квадрупольного рівня (рис. 1). Величина цього симетричного розщеплення становитиме [3]

$$\Delta \nu = \pm \frac{\gamma}{4\pi} H_0 \cos \theta. \quad (2)$$

Для отримання чіткої залежності розщеплення від величини напруженості магнітного поля слід вибирати якісні та кристалічно досконалі монокристали з неширокими лініями ЯКР й відсутністю в них блочних включень. Для досліджень ЯКР використані монокристали вирощені за методом Бріджмена. Для послаблення впливу недосконалості кристалічної матриці на якість резонансних ліній зразки об'ємом  $1 \text{ см}^3$  відпалювали у вакуумі поетапно при температурах  $500^\circ\text{C}$ ,  $250^\circ\text{C}$  і  $150^\circ\text{C}$  відповідно. У такому випадку спостерігаються резонансні спектри  $^{69}\text{Ga}$  і  $^{115}\text{In}$  з відносно вузькими лініями, ширина яких не перевищувала  $2,5 \text{ кГц}$ . Мультиплетність спектрів є характерною для GaSe і InSe, яка обумовлена наявністю політипів в кристалічній структурі даних сполук [4]. Градієнт електричного поля для кристалічної структури даних сполук має аксіальну симетрію, а тому лінії ЯКР не підлягають додатковому розщепленню.

Сpektри ЯКР ядер  $^{69}\text{Ga}$  і  $^{115}\text{In}$  спостерігалися при кімнатній температурі в частотному діапазоні  $19,0 \div 20,7 \text{ МГц}$  з використанням імпульсного радіоспектрометра ЯКР з швидким перетворенням Фур'є

\* [andriysamila@gmail.com](mailto:andriysamila@gmail.com)

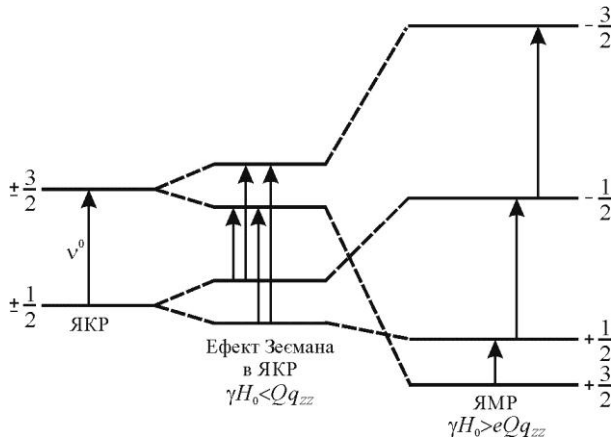


Рис. 1 – Розщеплення рівнів енергії за рахунок квадрупольних та магнітних взаємодій

(ШПФ) сигналів ядерної спінової індукції, при дії на досліджуваний зразок збуджуючого імпульсу довжиною 3 мкс та потужністю 250 Вт [7]. Для створення магнітного поля використовувалися екрановані котушки Гельмгольца з калібруванням індукції магнітного поля в робочій зоні методом електронного парамагнітного резонансу [8].

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Ефект Зеемана спостерігався на всіх лініях резонансних спектрів, однак кращі результати отримані на інтенсивних лініях, для яких вплив сусідніх компонент на форму розщепленого спектру послаблений. Отримані спектри ЯКР зображені на рис. 2 та на рис. 3 для сполук GaSe і InSe відповідно. Для GaSe розщеплення лінії спектру при даній її ширині вже стає помітним в полі 0,4 Гс, що наближається до рівня магнітного поля Землі, а для InSe – при 0,5 Гс (рис. 3, вставка). Величина індукції магнітного поля визначалась за частотним інтервалом, на який розщеплюється окрема лінія спектру ЯКР.

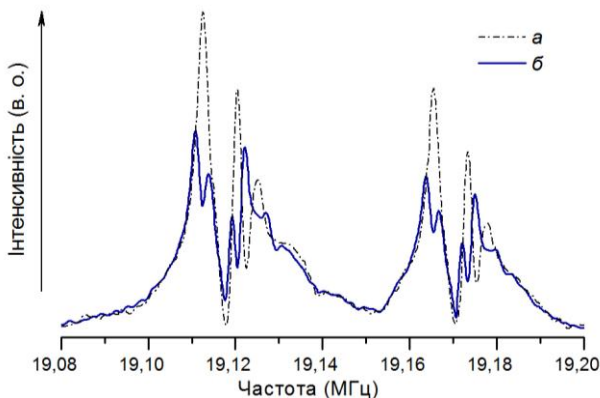


Рис. 2 – Розщеплення ліній спектру ЯКР <sup>69</sup>Ga в монокристалі GaSe, розміщеному у зовнішньому магнітному полі:  $H_0 \rightarrow 0$  (а),  $H_0 = 1,5$  Гс (б)

Наявність в шаруватих сполуках аксіальної симетрії градієнта електричного поля в околі квадрупольних ядер забезпечує сильну орієнтаційну залежність спектрів ЯКР відносно кристалічних осей [9].

Таким чином можна оцінювати не тільки величину індукції магнітного поля, але й визначати її напрямки у просторі.

Амплітуда розщеплення залежить від орієнтації монокристала у магнітному полі. На рис. 4 у вигляді частотного інтервалу представлена залежність розщеплення ліній спектру ЯКР <sup>69</sup>Ga в GaSe від орієнтації прикладеного магнітного поля відносно оптичної вісі *c*. Максимальна відстань між лініями спостерігається при орієнтації магнітного поля  $H_0$  уздовж градієнта електричного поля, тобто паралельно оптичній вісі кристалу  $H_0 \parallel c$ , яка у свою чергу збігається з напрямком ковалентного зв'язку пар атомів Ga – Ga для GaSe та In – In для InSe. У цьому випадку височастотне поле  $H_1$  направлено перпендикулярно вісі *c*.

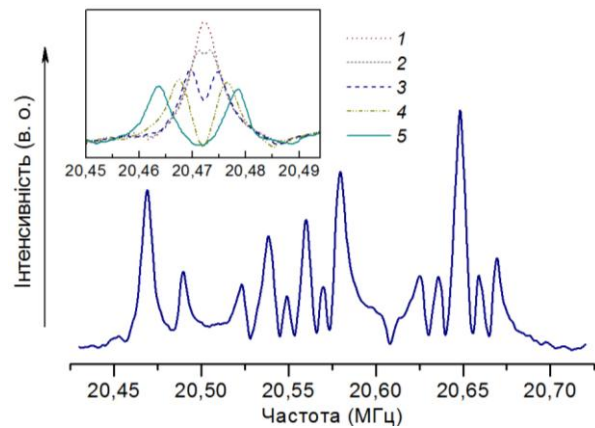


Рис. 3 – Спектр ЯКР <sup>115</sup>In в монокристалі InSe при  $H_0 \rightarrow 0$ . На вставці динаміка розщеплення окремої лінії при величині  $H_0$ : 0 Гс (1); 0,5 Гс (2); 1,5 Гс (3); 3 Гс (4); 5 Гс (5).

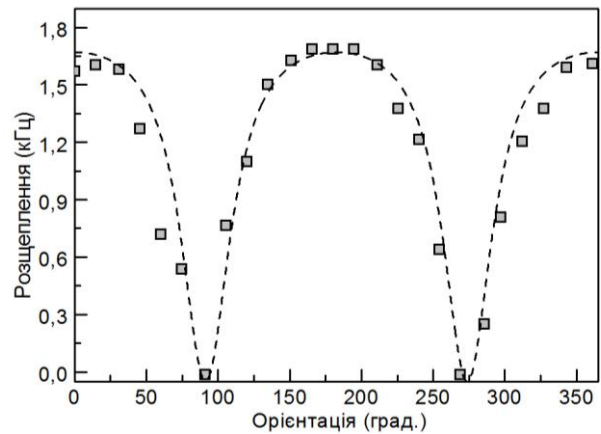


Рис. 4 – Залежність величини розщеплення лінії ЯКР від взаємної орієнтації магнітного поля та вісі аксіальної симетрії *c* для <sup>69</sup>Ga в GaSe

На рис. 5 представлені залежності амплітуди розщеплення лінії ЯКР для ядер <sup>69</sup>Ga і <sup>115</sup>In. Особливість розщеплення ліній спектру від величини магнітного поля полягає в його лінійній залежності при значеннях магнітного поля менше 10 Гс. Для ядер <sup>115</sup>In спостерігається сильніша залежність розщеплення ліній спектру ЯКР від магнітного поля порівняно із <sup>69</sup>Ga, що узгоджується з величинами гіромагнітних відношень досліджуваних ядер.

В полі індукцією 1 Гс величина розщеплення складає порядку 1,54 кГц для GaSe та 5,20 кГц для InSe, відповідно. Для досліджуваних шаруватих напівпровідників точність вимірів становила  $\pm 0,05$  Гс в інтервалі величин напруженості магнітного поля  $0,05 \div 10$  Гс.

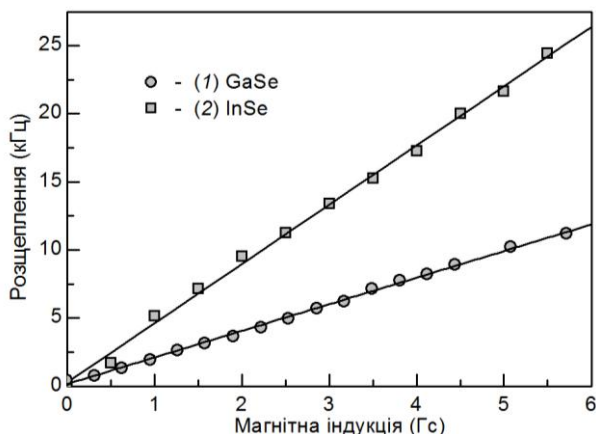


Рис. 5 – Залежність розщеплення ліній в спектрах ЯКР від магнітного поля для ядер  $^{69}\text{Ga}$  (1) та  $^{115}\text{In}$  (2) в GaSe і InSe відповідно

Таким чином, метод вимірювання індукції магнітного поля із застосуванням ефекту Зеемана в ЯКР монокристалів GaSe та InSe зводиться до визначення величини частотного інтервалу розщеплення

окремої резонансної лінії спектру ЯКР, а основна похибка вимірів визначається шириною даної лінії, що безпосередньо залежить від якості досліджуваних зразків.

Апаратна реалізація магнітометра на основі ефекту Зеемана в ЯКР може мати два варіанти. Для отримання спектру ЯКР в магнітному полі можна застосувати як стаціонарний метод спостереження, так і імпульсний з ШПФ сигналів спаду ядерної спінової індукції [10]. Однак, останній, за рахунок малого часу реєстрації спектру ЯКР, є більш придатним для досліджень.

#### 4. ВИСНОВКИ

З результатів експерименту видно, що ефект Зеемана в ЯКР ядер галію та індію в сильно анізотропних кристалах GaSe і InSe може бути використаний не тільки для оцінки величини індукції магнітного поля, але й для визначення його просторової орієнтації:

1. Встановлено, що для GaSe розщеплення лінії спектру при даній її ширині вже стає помітним в полі 0,4 Гс, що наближається до рівня магнітного поля Землі, а для InSe – при 0,5 Гс;

2. Максимальний інтервал розщеплення спостерігається при орієнтації магнітного поля  $H_0$  паралельно оптичній вісі кристалу  $H_0 \parallel c$ .

### Измерение индукции магнитного поля с применением эффекта Зеемана в ядерном квадрупольном резонансе соединений GaSe и InSe

А.П. Самила<sup>1</sup>, Г.И. Ластивка<sup>1</sup>, В.А. Хандожко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2, 58012 Черновцы, Украина

<sup>2</sup> Телерадиокомпания «НБМ», ул. Электриков, 26, 04176 Киев, Украина

Используя импульсный метод ядерного квадрупольного резонанса с быстрым преобразованием Фурье сигналов спиновой индукции, исследовано влияние слабого магнитного поля ( $0 \div 10$  Гс) на спектральные линии ЯКР  $^{69}\text{Ga}$  и  $^{115}\text{In}$  в слоистых полупроводниковых соединениях GaSe и InSe. Установлено, что расщепление резонансных линий в результате эффекта Зеемана может быть использовано для определения направления действия и оценки величины индукции приложенного магнитного поля.

**Ключевые слова:** Эффект Зеемана, Магнитная индукция, Ядерный квадрупольный резонанс, Слоистые полупроводники.

### Measuring the Magnetic Field Using the Zeeman Effect in Nuclear Quadrupole Resonance of GaSe and InSe Compounds

A.P. Samila<sup>1</sup>, G.I. Lastivka<sup>1</sup>, V.O. Khandozhko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2, Kotsjubynskyi st., 58012 Chernivtsi, Ukraine

<sup>2</sup> Broadcasting company «NBM», 26, Elektrikov st., 04176 Kyiv, Ukraine

Using pulsed nuclear quadrupole resonance method with a fast Fourier transform of the free induction decay signals, the influence of a weak magnetic field ( $0 \div 10$  Gauss) on NQR spectral lines  $^{69}\text{Ga}$  and  $^{115}\text{In}$  in layered semiconductors GaSe and InSe was investigated. It has been found that the splitting of resonance lines, caused by the Zeeman effect, can be used to determine the magnitude and direction of the applied magnetic field.

**Keywords:** Zeeman effect, Magnetic induction, Nuclear quadrupole resonance, Layered semiconductors.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. R.S. Popovic, *Hall Effect Devices: 2nd Edition, Series in Sensors* (IOP Publishing: 2004).
2. O. Petruk, R. Szewczyk, T. Ciuk, W. Strupiński, J. Salach, M. Nowicki, I. Pasternak, W. Winiarski, K. Trzcinka, *Sensitivity and Offset Voltage Testing in the Hall-Effect Sensors Made of Graphene: Series Advances in Intelligent Systems and Computing* (Springer: 2014).
3. В.С. Гречишкин, *Ядерные квадрупольные взаимодействия в твердых телах* (Москва: Наука: 1973) (V.S. Grechishkin, *Yadernyye kvadрупольnyye vzaimodeystviya v tverdykh telakh* (Moskva: Nauka: 1973)).
4. J.C.J.M. Terhell, *Prog. Cryst. Growth Charact.* **7**, 55 (1983).
5. A.P. Samila, V.O. Khandozhko, Z.D. Kovalyuk, *J. Nano-Electron. Phys.* **7** No 3, 03024 (2015).
6. A.P. Samila, G.I. Lastivka, V.A. Khandozhko, Z.D. Kovalyuk, *Semiconductors* **50** No 8, 1034 (2016).
7. А.Г. Хандожко, В.А. Хандожко, А.П. Саміла, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий* **6** No 12(66), 21 (2013) (A.G. Khandozhko, V.A. Khandozhko, A.P. Samila, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* **6** No 12(66), 21 (2013)).
8. В.В. Браїловський, А.П. Саміла, О.Г. Хандожко, *Вісник національного університету Львівська політехніка* **646**, 46 (2009) (V.V. Brailovsky, A.P. Samila, O.G. Khandozhko, *Visnyk of Lviv Polytechnic National University* **646**, 46 (2009)).
9. Z.D. Kovalyuk, A.G. Khandozhko, G.I. Lastivka, A.P. Samila, *Semicond. Phys., Quantum Electron. Optoelectron.* **14** No 2, 164 (2011).
10. А.П. Саміла, В.О. Хандожко, Л.Ф. Політанський, *Вісник національного університету Львівська політехніка* **766**, 35 (2013) (A.P. Samila, V.O. Khandozhko, L.F. Politansky, *Visnyk of Lviv Polytechnic National University* **766**, 35 (2013)).