

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР
імені Б. І. Веркіна

ГАЙДАМАК Тетяна Миколаївна



УДК 538.9

ПРУЖНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ FeSe , $\text{SmFe}_3(\text{VO}_3)_4$, $\text{NdFe}_3(\text{VO}_3)_4$
ТА АКУСТОЕЛЕКТРИЧНА ТРАНСФОРМАЦІЯ В НИХ

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Фізико-технічному інституті низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Філь Вячеслав Дмитрович,
Фізико-технічний інститут низьких температур
імені Б. І. Веркіна НАН України,
головний науковий співробітник відділу магнітних і
пружних властивостей твердих тіл.

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор
Тарапов Сергій Іванович,
Інститут радіофізики та електроніки
імені О. Я. Усикова НАН України, м. Харків,
завідувач відділу радіоспектроскопії.

доктор фізико-математичних наук, професор
Пашкевич Юрій Георгійович,
Донецький фізико-технічний інститут
імені О. О. Галкіна НАН України, м. Київ,
завідувач відділу теорії динамічних
властивостей складних систем.

Захист відбудеться «29» січня 2019 року о 15:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.175.03 при Фізико-технічному інституті низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України за адресою: 61103, м. Харків, пр. Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України за адресою: 61103, м. Харків, пр. Науки, 47.

Автореферат розісланий «28» грудня 2018 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.175.03,
кандидат фізико-математичних наук



Юзефович О. І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Магістральний шлях розвитку фізики твердого тіла - синтез різноманітних сполук, найчастіше не існуючих у природі, з метою отримання функціональних матеріалів, що мають бажані технологічні характеристики. Яскравий приклад руху в цьому напрямку – синтез високотемпературних надпровідників. На даний час наука ще далеко від своєї «блакитної» мрії – цілеспрямованого синтезу сполук із заданими властивостями. Поки що всі задачі вирішуються методом спроб та помилок – синтезуються нові сполуки з передбачуваними властивостями та проводяться їх всебічні дослідження. Очевидно, що при такому алгоритмі розвитку науки комплексні дослідження фізичних характеристик нових сполук є актуальними та затребуваними.

Серед великої кількості різноманітних напрямків пошуку новітніх функціональних матеріалів останнім часом помітно виділяються такі об'єкти, як залізовмісні надпровідники та мультифероїки. Перші мають значний потенціал підвищення критичної температури, другі є перспективними у приладах для обробки та зберігання інформації.

Добре відомо, що явища надпровідності та магнетизму – антагоністи. Лише факт існування надпровідності у речовині, що містить у великій концентрації іони заліза, раніше здавався неможливим. Це було так, доки у 2008 році не з'явилося перше повідомлення про виявлення надпровідності в залізовмісній сполуці $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$. Це відкриття стало початком цілого напрямку досліджень залізовмісних надпровідників. На даний момент широко досліджуються два типи сполук – пніктиди та халькогеніди. Сполука FeSe відноситься до халькогенідів, тобто речовинам, що містять у своєму складі один з халькогенів.

Плівки FeSe досліджувались ще у 70-х роках минулого століття, та до спроб виявлення в них надпровідності справа не дійшла. Однак, вслід за відкриттям надпровідності в $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ у 2008 році, з'явилося повідомлення про її виявлення у FeSe . Сполука швидко завоювала інтерес наукової спільноти завдяки простій структурі й достатньо високій критичній температурі, значення якої сильно зростає при всебічному стиску.

Сімейство рідкісноземельних фероборатів відноситься до класу мультифероїків. Мультифероїки – речовини, в яких реалізуються фазові перетворення з хоча б двома з трьох параметрів порядку – електричним, магнітним або пружним. Не зважаючи на те, що даний клас речовин вже давно відомий, в теперішній час популярність мультифероїків стрімко зростає. Температури магнітних переходів та реєстрованих магнітоелектричних ефектів наближаються до кімнатних, що робить реальною перспективу їх практичного застосування. В даний час кількість речовин, що проявляють мультифероїдні властивості, значно зростає.

Сімейство рідкісноземельних фероборатів єднає у собі речовини із загальною формулою $\text{RFe}_3(\text{BO}_3)_4$, де R- рідкісноземельний йон (Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Yb). Всі вони кристалізуються у нецентросиметричну групу

R32. Завдяки наявності двох магнітних підсистем (заліза та рідкісної землі), сімейству притаманне велике різноманіття фізичних властивостей. Цікавим для сучасної науки також є те, що вони являються не тільки мультифероїками, але й п'єзоелектриками. Отже, фероборати представляють інтерес як для фундаментальної фізики, так і з точки зору їх практичного застосування в енергонезалежних пристроях та приладах для обробки й зберігання інформації.

Таким чином, дослідження характеристик новітніх залізовмісних надпровідників та мультифероїків є важливими і актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, які склали дисертаційну роботу, виконані у відділі магнітних і пружних властивостей твердих тіл Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б.І. Веркіна НАН України в рамках тематичного плану інституту відповідно до відомчих тем: «Спектроскопічні, транспортні, магнітні та пружні дослідження новітніх низьковимірних структур та надпровідних сполук» (номер держреєстрації 0112U002635, термін виконання 2012-2016 рр.), «Функціональні властивості новітніх надпровідних сполук і металовмісних спін та зарядово-впорядкованих структур» (номер держреєстрації 0117U002294, термін виконання 2017-2021 рр.).

Мета дослідження. Метою дисертаційної роботи є з'ясування особливостей низькотемпературної поведінки модулів пружності, а також встановлення механізмів акустоелектричної трансформації в монокристалах FeSe та рідкісноземельних фероборатах самарію та неодиму.

Для досягнення мети ставилися та вирішувалися наступні **задачі**:

- вимірювання абсолютних швидкостей звуку в монокристалах FeSe, $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ та $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$. Розрахунок компонент тензорів модулів пружності та п'єзоелектричних модулів.
- дослідження температурних та магнітопольових залежностей відносних змін швидкості та поглинання звуку.
- дослідження акустоелектромагнітної трансформації в FeSe.
- дослідження особливостей поведінки п'єзовідгука та діелектричної проникності в антиферомагнітній фазі в $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ та $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$.

Об'єктом дослідження є механізми взаємодії магнітної, електричної та пружної підсистем у діапазоні температур структурних та магнітних фазових перетворень.

Предметом дослідження є процеси акустоелектромагнітної трансформації у FeSe та акустоелектричної трансформації у фероборатах самарію та неодиму.

Методи дослідження. Усі експерименти були проведені на установці, що являє собою мостову схему й працює в імпульсному режимі на частотах ~ 55 МГц. Установка дозволяє вимірювати швидкість звуку, діелектричну проникність, акустоелектромагнітну (АЕМТ) та акустоелектричну (АЕТ) трансформації. Температурні (в діапазоні 1,7-300 К) та магнітопольові (магнітне поле до 5 Тл) залежності вказаних характеристик досліджуваних сполук записуються в режимі реального часу.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше експериментально з високою точністю ($\sim 1\%$) отримано значення швидкостей звуку в монокристалах FeSe, $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ та $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$. Розраховано основні компоненти тензорів модулів пружності та п'єзоелектричних модулів досліджуваних сполук.

2. Вперше запропоновано та розвинуто експериментальну методику дослідження п'єзомагнітних явищ акустичними методами.

3. Вперше експериментально виявлено електромагнітний відгук, що виникає в монокристалах FeSe під дією ультразвуку. Цей ефект було кваліфіковано як п'єзомагнетизм.

4. Вперше виявлено гігантський магнітоп'єзоелектричний ефект в антиферомагнетиках та досліджено його прояви у фероборатах самарію та неодиму.

5. Вперше визначено параметри магнітоелектричної та магнітопружної взаємодій в мультифероїках $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ та $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані в ході досліджень FeSe дані допоможуть в розумінні механізмів надпровідності в залізовмісних сполуках. Отримані дані по швидкостям звуку та модулям пружності досліджуваних сполук можуть бути використані як довідкова інформація. В ході досліджень встановлено, що рідкісноземельні фероборати відносяться до сильних п'єзоелектриків, тому можуть бути рекомендовані до технічних застосувань. Встановлені особливості механізмів взаємодії пружної, магнітної та електричної підсистем вказують на перспективність прикладного використання сімейства рідкісноземельних фероборатів.

Особистий внесок здобувача. Дисертант приймала активну участь у всіх етапах підготовки та виконання робіт: підготовці зразків до експерименту, проведенні експериментальних досліджень, обробці експериментальних даних, обговоренні отриманих результатів, написанні та підготовці статей. Усі основні результати були представлені у вигляді доповідей на наукових семінарах, радах та міжнародних конференціях особисто дисертантом. Таким чином, особистий внесок дисертанта є **визначальним**.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи були представлені та обговорені на наступних міжнародних та вітчизняних наукових конференціях:

- III International Conference for Young Scientists «Low Temperature Physics-2012» (ICYS-LTP-2012) (Kharkiv, Ukraine, May 14-18, 2012);
- ЭВРИКА-2012 (Україна, Львів, Квітень 19-22, 2012);
- IV International Conference for Young Scientists «Low Temperature Physics-2013» (ICYS-LTP-2013) (Kharkiv, Ukraine, June 3-7, 2013);
- XI Міжнародна наукова конференція «Фізичні явища в твердих тілах» (Харків, Україна, Грудень 3-6, 2013);
- V International Conference for Young Scientists «Low Temperature Physics-2014» (ICYS-LTP-2014) (Kharkiv, Ukraine, June 2-6, 2014);

- VI International Conference for Young Scientists «Low Temperature Physics-2015» (ICYS-LTP-2015) (Kharkiv, Ukraine, June 2–5, 2015);
- VII International Conference for Young Scientists «Low Temperature Physics-2016» (ICYS-LTP-2016) (Kharkiv, Ukraine, June 6–10, 2016);
- International School & Conference on Nanoscience and Quantum Transport (nanoQT-2016) (Kyiv, Ukraine, October 8-14, 2016);
- VIII International Conference for Professionals and Young Scientists «Low Temperature Physics- 2017» (ICPYS-LTP-2017) (Kharkiv, Ukraine, May 29 – June 2, 2017);
- International conference on strongly correlated electron systems (SCES – 2017) (Prague, Czech Republic, July 17-21, 2017);
- V International research and practice conference «Nanotechnology and nanomaterials» (NANO – 2017) (Chernivtsi, Ukraine, August 23 – 26, 2017).
- 6th International Symposium in Optics and its Applications, (OPTICS-2018) (Trento, Italy, February 17-20, 2018);

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 18 наукових працях: 6 статтях у провідних спеціалізованих наукових журналах [1-6] та 12 тезах доповідей у збірниках праць міжнародних та вітчизняних наукових конференцій [7-18].

Структура дисертації. Дисертація складається із анотацій, вступу, огляду літератури, розділу з методикою експериментальних досліджень, трьох оригінальних розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації 130 сторінок, вона містить 49 рисунків, 6 таблиць та список використаних джерел з 77 найменувань на 9 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **анотаціях** державною і англійською мовами стисло викладено основний зміст і висновки дисертації. Представлено основні результати досліджень із зазначенням наукової новизни та практичного значення. Сформульовано найсуттєвіші положення по кожному із розділів дисертації.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та основні задачі досліджень, об'єкти, предмет і методи досліджень. Сформульована та викладена наукова новизна і практична значимість отриманих результатів, наведені дані про особистий внесок дисертанта та апробації роботи й публікацій по темі дисертації, а також подається інформація про її структуру і обсяг. Охарактеризовано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами і тематичними планами Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України.

У **першому розділі** «Огляд літератури» наведено аналітичний огляд літературних джерел за темою дисертації. У **підрозділі 1.1** «Залізовмісні надпровідники. Халькогенід заліза» стисло наведено основні відомості про FeSe: його кристалічну структуру, вплив тиску на магнітні властивості, фазову діаграму FeSe. Варто відмітити, що на початок досліджень у літературі не було достатньо

даних про пружні властивості FeSe, були доступні лише деякі розрахункові результати, що не давали повної картини. У **підрозділі 1.2** «Рідкісноземельні фероборати $RFe_3(BO_3)_4$ » наведено основні відомості про кристалічну, електричну й магнітну структури сімейства рідкісноземельних фероборатів, та їх фізичні властивості. Кристали належать до класу мультифероїків, які характеризуються сильним зв'язком між магнітною, електричною та пружною підсистемами. Систематичні дані про пружну підсистему цих сполук були відсутні на початок досліджень, тому вивчення їх акустичних властивостей є **актуальним**.

У **другому розділі** «Методика експерименту» описано експериментальне обладнання, що використовувалося в ході експериментів. У **підрозділі 2.1** «Приборна реалізація» наведено стисло блок - схему експериментальної установки та коротко описано принцип й алгоритм її роботи. У **підрозділі 2.2** «Методика вимірювання абсолютних та відносних швидкостей звуку» описано методику, за якою з високою точністю були виміряні абсолютні та відносні швидкості звуку. У **підрозділі 2.3** «Ноніусний метод» описано більш детально процес розрахунку абсолютних швидкостей звуку – «ноніусну процедуру». У **підрозділі 2.4** «Схема криогенної частини установки» описано низькотемпературну частину експериментальної установки – кріостат та його внутрішній устрій. У **підрозділі 2.5** – «Методика акустоелектричної та акустоелектромагніної трансформації» описано принципову схему проведення таких експериментів. Серію експериментів по АЕМТ було виконано для FeSe та CoF_2 . Експерименти по АЕТ були проведені для фероборатів самарію та неодиму.

У **третьому розділі** «Акустичні характеристики та акустоелектромагнітна трансформація в FeSe» наведено результати низькотемпературних досліджень пружних та акустоелектомагнітних характеристик залізовмісного надпровідника. У **підрозділі 3.1** «Акустичні характеристики залізовмісного надпровідника FeSe» наведено дані про швидкості звуку у даній сполуці, що були **вперше** експериментально отримані з достатньою ($\sim 1\%$) точністю (див. Табл.1).

Таблиця 1. Швидкості звуку у FeSe, $T=77K$.

Модя	C_{11}	C_{33}	C_{66}	C_{44}	$C' = 0.5(C_{11} + C_{12}) + C_{66}$
$S (10^5)$ см/сек	2.94	2.69	2.14	1.38	3.59

Також було розраховано значення компонент тензора модулів пружності FeSe. Для розрахунку модулів було використано значення густини $\rho = 5,65$ г/см³.

Експериментально досліджено температурні залежності деяких компонент тензору (див. Рис.1). Зареєстровано аномальну поведінку залежностей C_{11} та $(C_{11} - C_{12})$ мод, яка є наслідком структурного тетра-орто фазового перетворення в FeSe при $T_S \approx 100$ К. Така поведінка, можливо, є проявом нематичності електронного спектру.

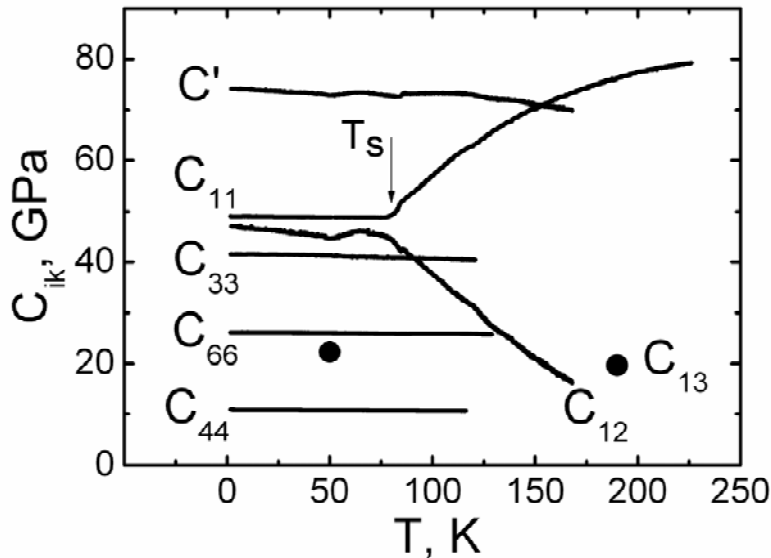


Рис.1. Температурні залежності деяких компонент тензору модулів пружності.

● – розраховані з літературних даних по стисливості значення C_{13} .

У підрозділі 3.2

«Вплив надпровідного переходу на поведінку пружних характеристик» було розглянуто особливості поведінки швидкостей та поглинання звуку при переході в надпровідний стан. Результат детального вивчення згасання різних мод (в тому числі й частотної залежності) нижче T_c представлено на Рис.2. Поведінку амплітуди C_{11} -моди можна інтерпретувати як спад електронного внеску в згасання. З такого підходу випливають неочікувані висновки:

1) поглинення C_{11} -моди в нормальній фазі виявилось рекордним для металів, включаючи й самі високочисті. Це може бути пов'язано як зі значною величиною деформаційного потенціалу, так і зі сплюсненням поверхні Фермі при переході у нематичну фазу.

2) коефіцієнт поглинання C_{11} -моди змінюється з частотою практично лінійно, що припускає виконання умови $ql \geq 1$ (де q - хвильове число, l -довжина вільного пробігу).

3) ефект є анізотропним – для C_{33} та C' -мод він не спостерігається.

Теорія надпровідності БКШ безвідносно до величини параметру ql дає залежність відношення згасання звуку в надпровіднику до згасання в нормальному металі:

$$\frac{\alpha_s}{\alpha_n} = \frac{2}{\exp\left(\frac{\Delta(T)}{kT}\right) + 1},$$

де $\Delta(T)$ - енергетична щілина. Обертаючи цю формулу, можливо оцінити величину щілини (Рис.3), яка виявилася трохи нижче ніж БКШ значення ($\Delta(T) \sim 1.6kT_c$). Експериментальна температурна залежність щілини від теоретичної практично не відрізняється.

В підрозділі 3.3 «Акустоелектомагнітні характеристики халькогеніду заліза» було досліджено акустоелектомагнітну трансформацію в FeSe. При постановці цих експериментів передбачалось вивчення характеристик інерційного поля (поля Стюарта - Толмена).

Однак, всуперч очікуванню, за відсутності зовнішнього магнітного поля було зареєстровано сигнали АЕМТ, на два-три порядки перевищуючі можливу

величину інерційного поля та спостережені в поляризації, ортогональній полю деформації.

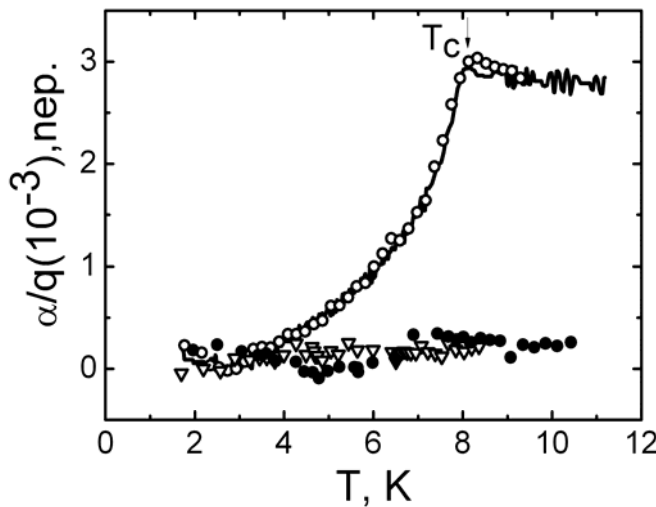


Рис.2. Вплив надпровідного переходу на згасання повздовжнього звуку. Суцільна – C_{11} -мода, ($F = 55$ МГц); \circ - C_{11} (100 МГц), Δ – C' (55 МГц), \bullet – C_{33} (55 МГц).

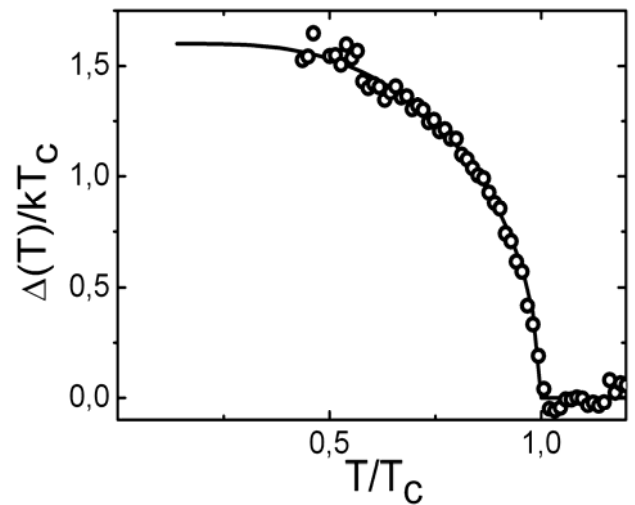


Рис.3. Температурна залежність енергетичної щілини.
 \circ – експеримент, суцільна лінія – БКШ залежність ($\Delta(0)=1,6kT_c$).

Магнітопольові залежності АЕМТ - відгуку представлено на Рис.4. Амплітуда й фаза електромагнітного поля при протилежних напрямках H представляють результат інтерференції двох сигналів. Приймаючи за початок відліку сигнал при $H=0$ та розділяючи відгук АЕМТ на парну та непарну складові, ми бачимо, що один з сигналів представляє собою нормальну холівську компоненту, лінійну по магнітному полю. Амплітуда другого сигналу від H практично не залежить.

Найбільш вірогідна причина його появи - п'єзомагнетизм. Оцінити величину п'єзомагнітної константи можна з рівнянь Максвелла:

$$\frac{d^2 E_y}{dz^2} = k^2 E_y - \frac{4\pi i \omega}{c} \frac{dm_x}{dz},$$

де m_x - x – компонента індукованого пружною деформацією магнітного моменту. В нашому окремому випадку вона може бути представлена: $m_x = \Pi_{xiz} L_i C_{44} \frac{du}{dz}$, де C_{44} – модуль пружності, L_i – i -та компонента вектору антиферромагнетизму, k – скінова глибина проникнення. Замінюючи d/dz на $-iq$, отримуємо оцінку п'єзомагнітної константи $\Pi_{xiz} L_i = 2.4 \cdot 10^{-10} \text{ Гс} \cdot \text{см}^2 / \text{дин}$. Значення цілком прийнятне. Воно на порядок менше за максимальні значення, виміряні Боровіком-Романовим в CoF_2 .

Поведінка сигналу АЕМТ в надпровідній фазі при $H = 0$ наведена на Рис. 5: поле E_y нижче T_c зменшується, але не до повного зникнення, а зупиняється на значенні, що є доступним для вимірювання.

В нормальному стані $k_n^2 \ll q^2$, в надпровіднику $q^2 \ll k_s^2 = \lambda_L^{-2}$ (λ_L - лондонівська глибина). Величина $\lambda_L(0) \approx 1,65 \pm 0,1 \mu$ визначається як граничним значенням при $T \rightarrow 0$ (Рис.5, вставка), так і може бути знайдена з нахилу апроксимуючої прямої поблизу T_c .

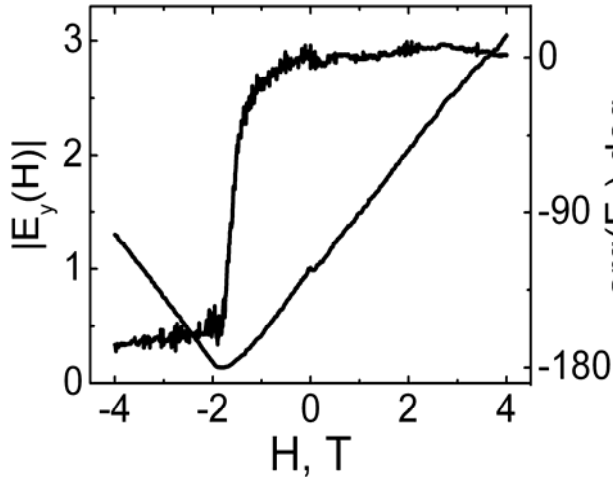


Рис.4. Магнітопольові залежності амплітуди й фази сигналу АЕМТ.

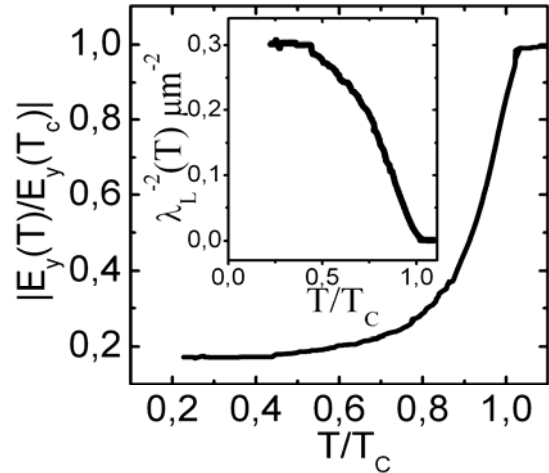


Рис.5. Поведінка сигналу АЕМТ в надпровідній фазі. Вставка – λ_L^{-2} .

Четвертий розділ «Дослідження акустичних характеристик акустoeлектромагнітної трансформації в CoF_2 » присвячено вивченню можливості реєстрації застосованою при дослідженні FeSe методикою п'єзомагнітного відгуку на класичному п'єзомагнетику.

Ці експерименти були мотивовані необхідністю верифікації методу АЕМТ після реєстрації електромагнітного відгуку на акустичну деформацію в FeSe , що був інтерпретований як прояв п'єзомагнетизму.

В **підрозділі 4.1** «Дослідження акустичних характеристик CoF_2 » представлені результати вимірювання швидкостей звуку та розрахунку модулів пружності сполуки. В **підрозділі 4.2** «П'єзомагнетизм за відсутності магнітного поля» наведено результати вимірювання п'єзомагнітного відгуку за АЕМТ методом, результати яких якісно та практично кількісно співпадають з відомими даними прямих статичних вимірювань.

В **підрозділі 4.3** «Акустoeлектромагнітна трансформація в магнітному полі» описано ще один канал генерації електромагнітного поля пружною поперечною хвилею. В магнітному полі ($H \parallel q \parallel C_4$) з'являється відгук на поперечну пружну хвилю, що існує як в антиферомагнітній фазі, так і при температурах, що значно перевищують T_N .

Температурні залежності АЕМТ відгуку в різних полях представлено на Рис. 6. Їх характерною властивістю є лінійна (в напівлогарифмічних координатах) залежність, що, ймовірно, обумовлена проявом близького порядку.

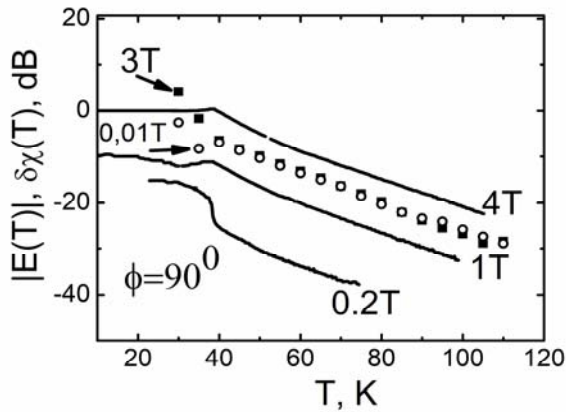


Рис.6. Температурні залежності амплітуд АЕМТ сигналів та χ . Суцільні лінії – АЕМТ сигнали в різних полях $\delta\chi(T) = \chi_{CW} - \chi_{||}$, \circ – $H = 0,01$ Тл, \blacksquare – $H = 3$ Тл.

Можна порівняти ці результати з поведінкою магнітної сприйнятливості $\chi_{||}$ при $H \parallel C_4$ та $T > T_N$ (Рис.7).

Теоретично за відсутності парних кореляцій, сприйнятливість високосиметричних магнетиків в парафазі дотримується закону Кюрі-Вейса. При $T > 150$ К сприйнятливість достатньо добре підпорядковується закону Кюрі-Вейса ($\chi_{CW} = \frac{C}{T + \Theta}$, $\Theta \approx 101$ К, $C = 0.039$ при $H = 3$ Тл), на що вказує різницева крива (Рис.7, вставка). Відхилення, що проявляються при наближенні до T_N , направлені в сторону зменшення сприйнятливості, тобто вони зумовлені саме антиферромагнітними кореляціями. Ці відхилення у відповідному масштабі також представлені на Рис.7. Дивно, але температурні варіації усіх величин близькі. Навряд такий збіг випадковий, тобто як АЕМТ відгук, так і $\delta\chi_{||}$ відображають внесок одного й того ж фізичного процесу. Цей процес розвивається як наслідок спін-кореляційної взаємодії, пов'язаної, ймовірно, з температурними змінами сумарного об'єму скорильованих спінів.

В п'ятому розділі «Пружні та п'єзоелектричні характеристики фероборатів самарію та неодиму» наведено результати досліджень двох легкоплощинних представників сімейства рідкісноземельних фероборатів – самарієвого та неодимового.

В підрозділі 5.1 «Пружні та п'єзоелектричні модулі фероборатів Nd й Sm» наведено експериментальні результати по вимірюванню швидкостей звуку й розрахунку пружних та п'єзоелектричних модулів в $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ та $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$. Вибір цих представників сімейства фероборатів диктувався відносною простотою їх поведінки в парамагнітному стані – відсутністю структурних фазових перетворень.

Нижче наведено значення швидкостей звуку в досліджуваних сполуках в парафазі при $T = 77$ К (див. Табл.2).

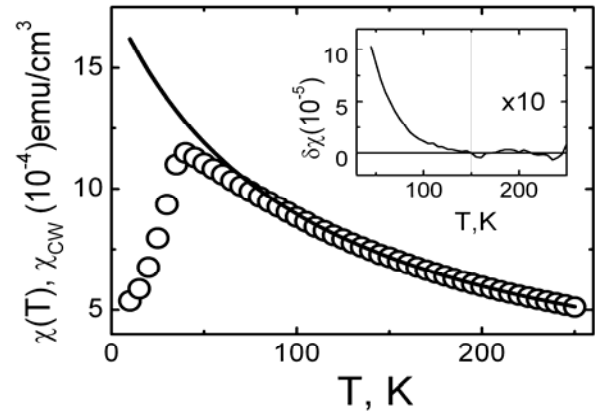


Рис.7. Магнітна сприйнятливість CoF_2 . \circ – $\chi_{||}$, суцільна лінія – закон Кюрі-Вейса χ_{CW} . Вставка – $\delta\chi(T) = \chi_{CW} - \chi_{||}$, $H = 3$ Тл.

Таблиця 2. Швидкості звуку (10^5 см/сек) в $NdFe_3(BO_3)_4$ та $SmFe_3(BO_3)_4$.

n_1, n_2, n_3	0,0,1		1,0,0	0,1,0			0,1/ $\sqrt{2}$, 1/ $\sqrt{2}$			0,-1/ $\sqrt{2}$, 1/ $\sqrt{2}$		
	L	T	L	QL	QT	T	QL	QT	T	QL	QT	T
Мода												
$NdFe_3(BO_3)_4$	6.9	3.3	8.62	8.46	3.19	4.42	6.8	3.95	4.6	8.08	3.64	2.68
$SmFe_3(BO_3)_4$	6.9	3.35	8.7	8.52	3.25	4.27	-	-	-	-	-	-

Величини модулів пружності та п'єзоелектричних модулів наведено в Табл.3. Представлені в Табл.3 числові значення модулів отримано з використанням значення густини $\rho = 4,5$ г/см³.

Таблиця 3. Модулі пружності (ГПа) і п'єзомодулі (К/м²) фероборатів Nd та Sm

Сполука	C_{11}	C_{33}	C_{44}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	B	e_{11}	e_{14}
$NdFe_3(BO_3)_4$	319	214	49	174	117±3(129±21)	29.6	172	1.4±0.3	0.4±0.2
$SmFe_3(BO_3)_4$	324	214	50.5	194	-	28.6	175	1.4±0.3	-

В підрозділі 5.2 «Магнітоп'єзоелектричний ефект й магнітоємність в $SmFe_3(BO_3)_4$ » описано **вперше** експериментально спостережений магнітоп'єзоелектричний ефект в самарієвому феробораті.

В описаних нижче експериментах вивчалися спін-залежні ефекти в поведінці п'єзоелектричного модуля e й діелектричної проникності ϵ . Всі вимірювання було проведено з використанням описаної раніше високочастотної (~ 50 МГц) установки (АЕТ експеримент), але її застосування до п'єзоелектричних середовищ потребує додаткових пояснень.

При вимірюванні ϵ (ϵ – експеримент) зразок разом з металевими обкладинками утворює конденсатор достатньо малої ємності (0,2-0,5 пФ), який навантажений на вхідний опір приймальної системи (~ 50 Ом). При подачі радіоімпульсу на такий контур в п'єзоактивному зразку збуджуються дві власні моди – швидка поляризаційна (потенціал, що запізнюється) і повільна акустична. На наших частотах таке включення являє собою диференціюючий ланцюг. Амплітуда зв'язаного зі швидким сигналом потенціалу, що передається через нього, є пропорційною діелектричній проникності. Амплітуда повільного сигналу (не реєструвалася) в нашому випадку, внаслідок роботи вдалині від механічного резонансу, була малою.

Вимірювання п'єзоелектричного модуля (p – експеримент) проводилося фактично за тією ж схемою, але замість електричного поля зовнішнім сигналом збудження була акустична деформація. У зразку також збуджувалися поляризаційна та акустична моди, але з іншим співвідношенням інтенсивностей. Аналіз показує, що в режимі того ж диференціюючого ланцюжка амплітуда поляризаційної моди пропорційна ефективному п'єзомодулю (e).

На Рис.8 приведено результати ϵ - та p – експериментів в досліджуваних зразках за відсутності магнітного поля при розповсюдженні поляризаційної хвилі в п'єзоактивному напрямку.

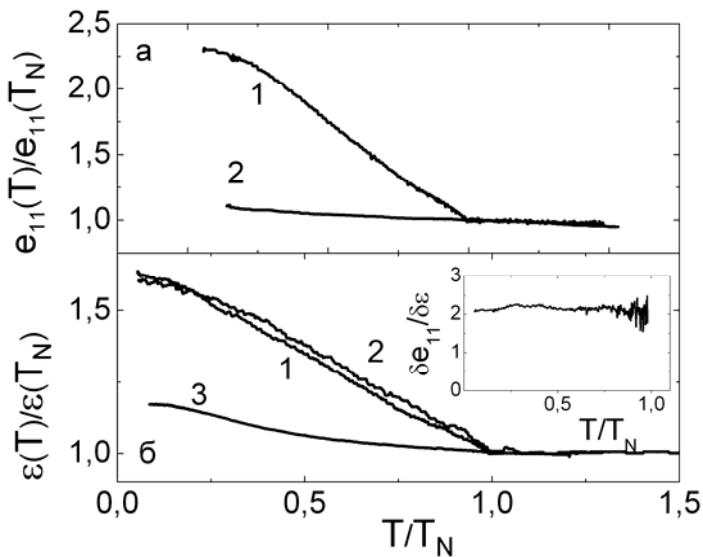


Рис.8. Температурні варіації електричних параметрів в ферборатах у магнітовпорядкованій фазі. а) зміни п'єзомодуля в самарієвому (1) та неодимовому (2) ферборатах ($H=0$). б) зміни діелектричної проникності в $SmFe_3(BO_3)_4$: 1) $E \parallel x, H=0$, 2) $E \parallel y, H=0$, 3) $E \parallel x, H=2.5$ Тл, $H \parallel [110]$. Вставка: температурна поведінка співвідношення відносних змін п'єзомодуля та діелектричної проникності ($H=0$).

магнітного поля в процесі спінової перебудови.

Поведінка обох характеристик (ϵ та e) в магнітному полі при $T=1.7$ К представлена на Рис. 9. При деяких напрямках поля реєстровані величини повертаються до значень, що фіксуються в парафазі (значення поля ≥ 2 Тл). Але є напрямки, де й 5 Тл недостатньо для подавлення впливу антиферомагнетизму. Звертає на себе увагу очевидна подібність результатів різних експериментів, їх яскраво виражена анізотропія та діаметрально протилежна поведінка при зміні напрямку електричного поля (Рис.9б. та Рис.9в.).

В парафазі магнітне поле будь-якої орієнтації не змінює величин п'єзоелектричного відгуку та ϵ . Поле, що орієнтовано вздовж осі z , на п'єзовідгук також практично не впливає.

В самарієвому фербораті нижче температури Нееля спостерігається значне зростання п'єзомодуля (Рис.8а.), абсолютно нехарактерне для невласного сегнетоелектрика. За характером температурної залежності та масштабом знайдений ефект нагадує поведінку діелектричної проникності в магнітовпорядкованих сполуках (Рис.8б), яку прийнято називати магніодіелектричним ефектом (або магнітоємністю). Поведінка п'єзовідгуку, яка зареєстрована в нашому випадку, за аналогією може бути визначена як магнітоп'єзоелектричний ефект. Ефект є наслідком спільного впливу магнітоелектричної та магнітопружної взаємодій на орієнтаційний стан магнітної структури антиферомагнетика. Його особливістю є пригнічення цього впливу під дією

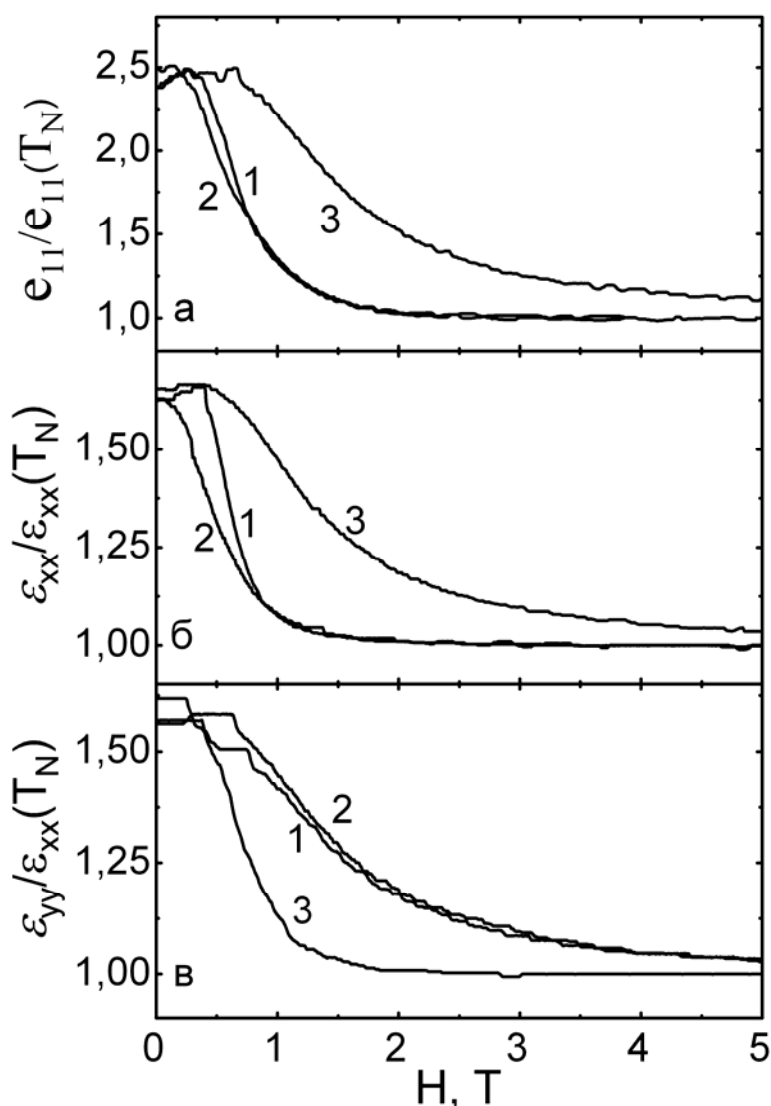


Рис.9 Магнітопольові залежності ρ - та ϵ – відгуків при $T=1,7$ K,
 1 – $H \parallel x$,
 2 – $H \parallel y$,
 3 – $H \parallel [110]$.
 а) п'єзомодуль,
 б) діелектрична проникність, $E \parallel x$,
 в) діелектрична проникність, $E \parallel y$.

і при зміні магнітного поля.

В підрозділі 5.3 «Магнітодіелектричний й магнітоп'єзоелектричний ефекти в $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ » наведено результати досліджень вказаних ефектів у феробораті неодиму.

За відсутності магнітного поля діелектрична проникність нижче температури Нееля починає зростати з нахилом, близьким до лінійного (Рис.10.). Швидкість зростання приблизно в 6 разів менша, ніж в $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$. При температурах 15-20 K зростання ϵ змінюється невеликим спаданням. Ми асоціюємо залежну від зразка точку перегину на $\epsilon(T)$ з появою гелікоїдальної фази.

Феноменологічний опис викладених експериментів засновано на аналізі термодинамічного потенціалу \tilde{F} . Використані в роботі частоти - малі в порівнянні з характерними енергіями спектру збуджень антиферомагнетику, так що в будь-який момент часу в системі встигає встановитися рівноважний (стаціонарний) стан, і тому використовується чисто термодинамічний підхід. Поведінка діелектричної проникності та п'єзомодуля в монодоменизованій спін-флуп легкоплощинній фазі описується формулами:

$$\epsilon_{xx}^{eff} = \epsilon_{xx} + \frac{4\pi a^2 \sin^2 2\varphi}{\partial^2 \tilde{F} / \partial \varphi^2}$$

$$e_{11}^{eff} = e_{11} - \frac{ab \sin^2 2\varphi}{\partial^2 \tilde{F} / \partial \varphi^2}$$

Де φ – кут між вектором антиферомагнетизму й віссю C_2 , а й b – константи магнітоелектричного й магнітопружого зв'язків відповідно, чисельні значення яких отримано у роботі. Феноменологія дозволяє також описати зміни швидкостей звуку як при переході у магнітовпорядкований стан, так

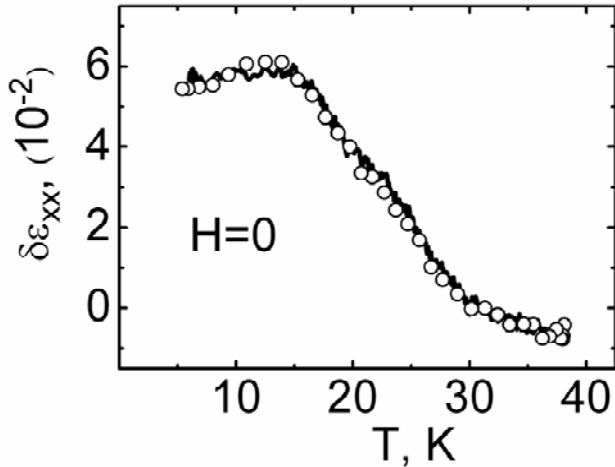


Рис.10 Температурная залежність відносних змін діелектричної проникності за відсутності магнітного поля в $NdFe_3(BO_3)_4$. Суцільна крива – залежність при нагріванні, \circ - при охолодженні.

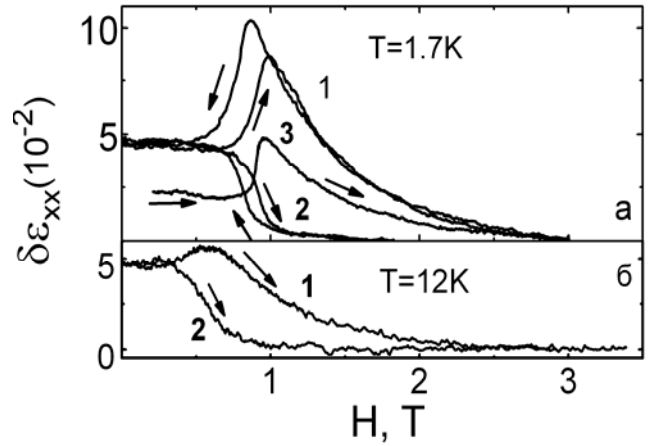


Рис.11 Польові залежності відносних змін діелектричної проникності в $NdFe_3(BO_3)_4$ при $T=1.7$ K (а) та $T=12$ K (б), $\varphi_H = \pi/4$, (1) $\varphi_H = 0$ (2). Напрямок зміни магнітного поля вказано стрілками.

Поведінка діелектричної проникності в магнітному полі, орієнтованому в базовій площині, представлено на Рис.11. На Рис.11. та Рис.12. φ_H – кут між напрямком зовнішнього магнітного поля та віссю C_2 . (Нагадуємо, що у спін-флоп фазі $\varphi = \varphi_H + \pi/2$).

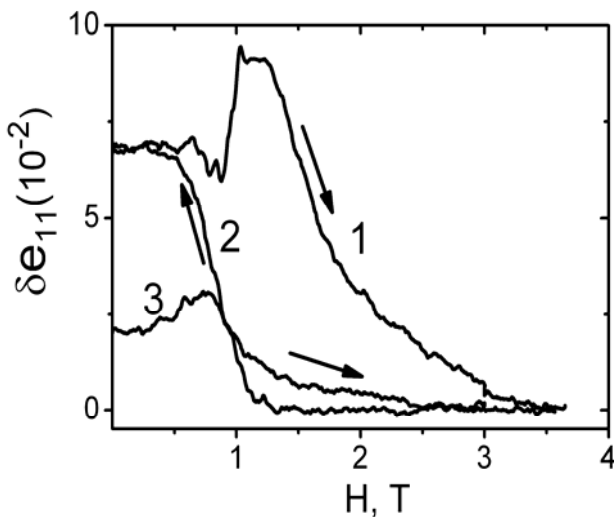


Рис.12. Польові залежності відносних змін п'єзомудуля 1) $T=1.7$ K, $\varphi_H = \pi/4$, 2) $T=1.7$ K, $\varphi_H = 0$, 3) $T=12$ K, Напрямок зміни магнітного поля вказано стрілками.

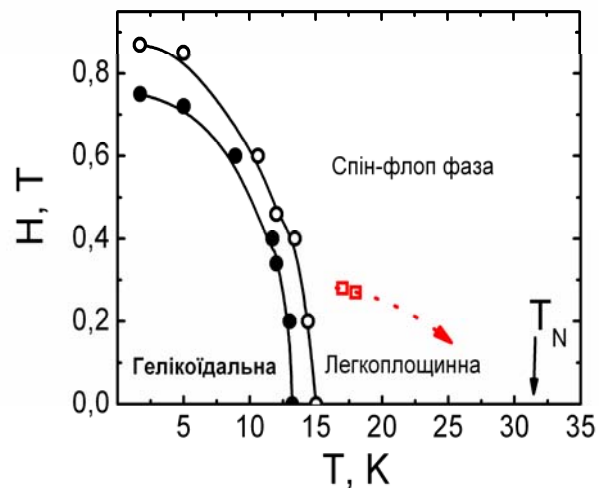


Рис.13. $H-T$ діаграма ліній розділу фаз $NdFe_3(BO_3)_4$. \circ – при зростанні поля чи температури, \bullet – при зменшенні вказаних параметрів.

Для цих залежностей характерна стрибкоподібна й гістерезисна зміна ε в полях ~ 1 Тл. «Напрямок» стрибка залежить від орієнтації H в базовій площині, в той час як його положення від неї не залежить.

Характер змін п'єзомодуля з магнітним полем ілюструє Рис.12. Як й при вимірюванні $\varepsilon(H)$, спостерігається стрибкоподібна зміна e_{11} з залежним від орієнтації H «напрямок» стрибка.

Напевно, стрибки на температурних та магнітопольових залежностях різних характеристик відповідають переходу від гелікоїдальної структури до спін-флор фази. Гістерезисність свідчить, що ця перебудова проходить по сценарію фазового перетворення I роду. Фрагмент H - T діаграми для $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ де лініями відділено гелікоїдальну фазу від легкоплощинної, наведено на Рис.13. Його було отримано комбінацією даних температурних та польових сканів.

ВИСНОВКИ

1. Вперше експериментально й з високою точністю ($\sim 1\%$) виміряні швидкості звуку в монокристалах FeSe , $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ й $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$. Розраховано величини основних компонент тензорів модулів пружності. Для фероборатів Sm и Nd отримані значення п'єзоелектричних модулів. Показано, що інтенсивність п'єзоелектричної взаємодії в досліджуваних фероборатах на порядок перевищує відповідну характеристику для α -кварцу.
2. Вперше запропоновано та розвинуто експериментальну методику дослідження п'єземагнітних явищ акустичними методами. До переваг методики варто віднести можливість її використання для дослідження крихких зразків міліметрового і, навіть, субміліметрового розміру.
3. Вперше експериментально зареєстровано електромагнітний відгук з поверхні монокристала FeSe , що з'являється під дією ультразвуку за відсутності зовнішнього магнітного поля. Найбільш вірогідною причиною цього явища є п'єземагнетизм.
4. Вперше виявлено гігантський магнітоп'єзоелектричний ефект в антиферромагнетиках. Ефект є наслідком спільного впливу магнітоелектричної та магнітопружної взаємодій на орієнтаційний стан магнітної структури антиферромагнетика і полягає в аномально великому зростанні ефективного п'єзомодуля нижче температури Неєля та пригніченні цього зростання магнітним полем. Ефект досліджено в $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ й $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$.
5. Вперше визначено параметри магнітоелектричної й магнітопружної взаємодій в мультифероїках $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ й $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$. Виявлено, що параметр магнітопружного зв'язку в $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ змінює знак при зміні температури. Визначено границі існування гелікоїдальної фази в $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Acoustic characteristics of FeSe single crystals / G.A. Zvyagina, **T.N. Gaydamak**, K.R. Zhekov, I.V. Bilich, V.D. Fil, D.A. Chareev, A.N. Vasiliev // *Europhysics Letters*. – 2013. – Vol.101. – 56005– p1– 56005– p5.
2. Piezomagnetism of FeSe single crystals / V.D. Fil, D.V. Fil, K.R. Zhekov, **T.N. Gaydamak**, G.A. Zvyagina, I.V. Bilich, D.A. Chareev, A.N. Vasiliev // *"Europhysics Letters*. – 2013. Vol. 103. – 47009– p1– 47009– p6.
3. Акустопьезомагнетизм и модули упругости CoF_2 / **Т.Н. Гайдамак**, Г.А. Звягина, К.Р. Жеков, И.В. Билыч, В.А. Десненко, Н.Ф. Харченко, В.Д. Филь // *Физика низких температур*. – 2014. Т. 40, № 6. с. 676–684.
4. Упругие и пьезоэлектрические модули ферроборатов Nd и Sm / **Т.Н. Гайдамак**, И.А. Гудим, Г.А. Звягина, И.В. Билыч, Н.Г. Бурма, К.Р. Жеков, В.Д. Филь // *Физика низких температур*. – 2015. Т. 41, № 8. с. 792– 797.
5. Magnetopiezoelectric effect and magnetocapacitance in $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ / **T.N. Gaydamak**, I.A. Gudim, G.A. Zvyagina, I.V. Bilych, N.G. Burma, K.R. Zhekov, V.D. Fil // *Phys. Rev. B*. – 2015. Vol. 92. 214428.
6. Магнитодиэлектрический и магнитопьезоэлектрические эффекты в $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ / И.В. Билыч, К.Р. Жеков, **Т.Н. Гайдамак**, И.А. Гудим, Г.А. Звягина, В.Д. Филь // *Физика низких температур*. – 2016. Т. 41. № 12. с. 792–797.
7. Elastic properties of FeSe / **T.N. Gaydamak**, K.R. Zhekov, I.V. Bilych, G.A. Zvyagina, V.D. Fil', E.S. Kozlyakova, D.A. Chareev // III International Conference for Young Scientists —“Low Temperature Physics”, May 14 – 18, 2012 : book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2012. – P. 66.
8. Акустические исследования монокристалла FeSe / **Т.Н. Гайдамак**, К.Р. Жеков, И.В. Билыч, Г.А. Звягина, В.Д. Филь, Е.С. Козлякова, Д.А. Чареев // *ЭВРИКА–2012*, Апрель 19–22, 2012: тезисы докладов. – Украина, Львов 2012. – Д50.
9. FeSe – piezomagnetic/ **T.N. Gaydamak**, G.A. Zvyagina, K.R. Zhekov, I.V. Bilych, D.A. Chareev // IV International Conference for Young Scientists—“Low Temperature Physics”, June 3 – 7, 2013 : book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2013. – P. 29.
10. Пьезомагнетизм и модули упругости CoF_2 / **Т.Н. Гайдамак**, Г.А. Звягина, К.Р. Жеков, И.В. Билыч, В.А. Десненко, Н.Ф. Харченко, В.Д. Филь // XI Международная научная конференция «Физические явления в твердых телах», 3 – 6 декабря 2013: тезисы доклада – Украина, Харьков 2013. – С. 125.
11. Acoustopiezomagnetic effect in CoF_2 / **T.N. Gaydamak**, G.A. Zvyagina, K.R. Zhekov, I.V. Bilych, V.A. Desnenko // V International Conference for Young Scientists «Low Temperature Physics», June 2 – 6 2014: book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2014. – P. 78.

12. Ultrasonic in Nd and Sm ferroborates. Magnetopiezoelectric effect / **T.N. Gaydamak**, G.A. Zvyagina, I.V. Bilych, K.R. Zhekov, I.A. Gudim // VI International Conference for Young Scientists «Low Temperature Physics», June 2 – 5 2015: book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2015. – P. 47.
13. Magnetopiezoelectric effect and magnetocapacitance in neodymium ferroborate / **T.N. Gaydamak**, I.A. Gudim, G.A. Zvyagina, I.V. Bilich, K.R. Zhekov, V.D. Fil // VII International Conference for Young Scientists «Low Temperature Physics», June 1 – 5 2016: book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2016. – P. 79.
14. Magnetopiezoelectric and magnetodielectric effects in $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ / **T.N. Gaydamak**, I.A. Gudim, G.A. Zvyagina, I.V. Bilich, K.R. Zhekov, V.D. Fil // International school & conference on nanoscience and quantum transport (nano QT–2016), October 8–14 2016.
15. Magnetopiezoelectric effect in Sm and Nd ferroborates / **T.N. Gaydamak**, G.A. Zvyagina, I.V. Bilych, K.R. Zhekov, I.A. Gudim // VIII International Conference for Professionals and Young Scientists «Low Temperature Physics», May 29 – June 2 2017 : book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2017. – P. 84.
16. Piezomagnetism in FeSe / **T.N. Gaydamak**, G.A. Zvyagina, K.R. Zhekov, I.V. Bilych, D.A. Chareev // International conference on strongly correlated electron systems (SCES–2017), July 17–21 2017: book of abstracts. – Czech Republic, Prague, 2017. – P. 36.
17. Magnetopiezoelectric effect in Sm and Nd ferroborates / **T.N. Gaydamak**, G.A. Zvyagina, I.V. Bilich, K.R. Zhekov, I.A. Gudim // V International Research and Practice Conference «Nanotechnology and nanomaterials», 23 – 26 August, 2017 : book of abstracts. – Chernivtsi, Ukraine, 2017. – P. 237.
18. Easy-plane ferroborates. Magnetopiezoelectric effects / **T.N. Gaydamak**, G.A. Zvyagina, I.V. Bilich, K.R. Zhekov, I.A. Gudim // “6th International Symposium in Optics and its Applications”, OPTICS–2018, 17–20 February, 2018 : book of abstracts. – Trento, Italy, 2018. – P. 47.

АНОТАЦІЯ

Гайдамак Т.М. Пружні характеристики FeSe, SmFe₃(BO₃)₄, NdFe₃(BO₃)₄ та акустоелектрична трансформація в них. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Фізико-технічний інститут низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України, Харків, 2019.

Дисертаційна робота присвячена встановленню особливостей низькотемпературної поведінки швидкостей і поглинання звуку, механізмів акустоелектромагнітної та акустоелектричної трансформацій в монокристалах FeSe, SmFe₃(BO₃)₄ та NdFe₃(BO₃)₄.

В монокристалах FeSe виміряні швидкості звуку та визначені компоненти тензору модулів пружності. Досліджено вплив структурного та надпровідного переходів на швидкість та поглинання звуку. В процесі акустоелектромагнітної трансформації, за відсутності постійного магнітного поля, виявлена інтенсивна генерація електромагнітного випромінювання, яка була інтерпретована як п'єзомагнетизм.

Правомочність методики акустоелектромагнітної трансформації для дослідження п'єзомагнетизму було підтверджено на монокристалі CoF₂. Результати експериментів співпали якісно і кількісно з відомими результатами прямих статичних вимірів.

В монокристалах SmFe₃(BO₃)₄ та NdFe₃(BO₃)₄ виміряно швидкості звуку, визначено компоненти тензорів пружних та п'єзоелектричних модулів. Відкрито гігантський магнітоп'єзоелектричний ефект – аномально велике зростання ефективного п'єзоелектричного модуля нижче температури Нееля та пригнічення цього зростання магнітним полем.

Ключові слова: п'єзомагнетизм, надпровідність, магнетизм, фероборати, швидкості звуку, пружні характеристики.

АННОТАЦИЯ

Гайдамак Т.Н. Упругие характеристики FeSe, SmFe₃(BO₃)₄, NdFe₃(BO₃)₄ и акустоэлектрическая трансформация в них. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07- физика твердого тела.- Физико-технический институт низких температур имени. Б. И. Веркина НАН Украины, Харьков, 2019.

Диссертационная работа посвящена установлению особенностей низкотемпературного поведения скорости и поглощения звука, механизмов акустоэлектромагнитной (АЭМТ) и акустоэлектрической (АЭТ) трансформаций в монокристаллах FeSe, SmFe₃(BO₃)₄ и NdFe₃(BO₃)₄.

Определены компоненты тензора модулей упругости монокристаллов FeSe, обнаружено значительное смягчение C_{11} и $(C_{11} - C_{12})$ мод при структурном

фазовом превращении. Изучено влияние сверхпроводящего перехода на скорость и затухание звука, оказавшееся значительным для C_{11} -моды.

Исследован процесс АЭМТ в монокристаллах FeSe. В отсутствие постоянного магнитного поля обнаружена интенсивная генерация электромагнитного излучения при воздействии ультразвука. Эффект был квалифицирован как пьезомагнетизм. Оценена величина пьезомагнитной константы. В сверхпроводнике эволюция АЭМТ сигнала определяется изменением лондоновской глубины проникновения $\lambda_L(T)$. Она оказалась достаточно большой, что связано с малой электронной плотностью.

Правомочность применения АЭМТ для исследования пьезомагнетизма была подтверждена в экспериментах на монокристалле CoF_2 . Интенсивность пьезомагнитного отклика оказалась близка к известному значению. Таким образом, в отсутствие магнитного поля АЭМТ-эксперимент фактически подтвердил результаты статических измерений. Он технически много проще использованного Боровиком-Романовым метода прямых статических измерений и хорошо подходит для изучения хрупких образцов субмиллиметровых размеров.

При наложении поля вдоль оси лёгкого намагничивания обнаружен новый канал возникновения пьезомагнитного отклика. Индуцируемый упругой деформацией магнитный момент ориентирован параллельно направлению смещения в поперечной акустической волне. Эффект существует как в антиферромагнитной фазе, так и при температурах, значительно превышающих температуру Нееля. В последнем случае амплитуда пьезомагнитного отклика экспоненциально спадает с повышением температуры, отражая, по-видимому, изменение числа антиферромагнитно скоррелированных спинов.

В парамагнитном состоянии измерены абсолютные скорости звука в монокристаллах $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ и $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$, восстановлены элементы тензоров упругих и пьезоэлектрических модулей. Упругая система характеризуется повышенной жёсткостью в базовой плоскости по отношению к деформациям растяжения – сжатия. Интенсивность пьезоэлектрических взаимодействий достаточно высокая, пьезоэлектрические модули на порядок превышают соответствующие величины для α -кварца.

Изучено влияние антиферромагнитного упорядочения на акустоэлектрические характеристики самариевого ферробората. Обнаружен гигантский магнитопьезоэлектрический эффект – аномально большой рост эффективного пьезомодуля ниже температуры Нееля и подавление этого роста магнитным полем. Это главный результат проведенных экспериментов. Эффект является следствием совместного влияния магнитоэлектрического и магнитоупругого взаимодействий на ориентационное состояние магнитной структуры антиферромагнетика.

Идейно магнитопьезоэлектрический эффект близок к известному ранее магнитодиелектрическому эффекту, для которого в настоящей работе получены дополнительные данные по его зависимости от ориентации и величины магнитного поля H . Выписаны феноменологические соотношения, позволяющие объяснить поведение в антиферромагнитной фазе эффективного пьезомодуля и

скорости звука. Показано, что при определённой геометрии эксперимента, даже в глубоко развитой спин-флоп фазе, внешние поля (упругое и электрическое) модулируют взаимную ориентацию векторов L и H . Измерения в спин-флоп состоянии показали, что для оптимальной геометрии эксперимента амплитуды всех эффектов при низкой температуре спадают, как H^2 . Измерения в этой геометрии позволили восстановить численные значения и температурные зависимости ряда феноменологических параметров, входящих в разложение термодинамического потенциала по компонентам параметра порядка.

Систематически исследованы пьезотклик и изменение диэлектрической проницаемости в монокристаллических образцах $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$. Несмотря на меньший масштаб, существенных качественных отличий от самариевого ферробората, в котором впервые наблюден магнитопьезоэлектрический эффект, не выявлено. Обнаружено, что параметр магнитоупругой связи ниже температуры Нееля изменяет знак. В присутствии магнитного поля температурное поведение пьезоотклика и изменения диэлектрической проницаемости демонстрируют скачкообразные изменения, связанные с переходом от геликоидальной к спин-флоп фазе. Переход носит признаки фазового превращения I рода. Оценено соотношение вкладов неодимовой и железной систем в наблюдаемые явления. Показано, что магнитная система железа играет роль балласта, тормозящего развитие эффектов. Магнитополевые зависимости скорости звука продемонстрировали существование нового спин-зависимого явления – прямую перенормировку параметра пьезоэлектрической связи в магнитоупорядоченном состоянии. Оценка максимально возможной величины магнитоэлектрической поляризации в обоих составах приводит к значению, несколько меньшему по сравнению с результатами прямых измерений.

Ключевые слова: пьезомагнетизм, сверхпроводимость, магнетизм, ферробораты, скорости звука, упругие характеристики.

ABSTRACT

Gaydamak T.N. Elastic characteristics of FeSe , $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ and acoustoelectric transformation in them. – Manuscript.

Thesis for the candidate's degree in physics and mathematics by speciality 01.04.07 –solid state physics. – B. I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, NAS of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The thesis is devoted to investigation of: sound velocities behavior at low temperatures, determination of the elastic modulus tensor components and research of the mechanisms of acoustoelectromagnetic and acoustoelectric transformations in FeSe , $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ and $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ single crystals.

For FeSe single crystals, sound velocities have been measured and all components of the elastic modulus tensor have been determined. The structural and superconducting phase transitions influence on sound velocities and attenuation has

been studied. The process of acoustoelectromagnetic transformation has been investigated. The intensive generation of electromagnetic radiation has been discovered and determined as piezomagnetism. The competency of the method has been confirmed on CoF_2 single crystal. The experiments results coincide qualitatively and quantitatively with the well known ones of the direct static measurements.

Sound velocities have been measured in of $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ and $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ singlecrystals, the tensor components of elastic and piezoelectric modulus have been determined. Giant magnetopiezoelectric effect has been revealed. The effect shows itself as the anomalously large growth of the effective piezomodulus below Neel temperature and its suppression by magnetic field.

Keywords: piezomagnetism, superconductivity, magnetism, feroborates, sound velocities, elastic properties.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0.9. Тир. 100 прим. Зам. № 665-18.
Підписано до друку 26.12.2018. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (057) 758-01-08, (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.

СТИЛЬ· ®
·ИЗДАТ
ТИПОГРАФИЯ
www.stil-izdat.com