

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Гайдамак Тетяни Миколаївни

«Пружні характеристики FeSe , $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$

та акустоелектрична трансформація в них»

подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Обговорювані в роботі Гайдамак Т.М. питання пов'язані з актуальними проблемами сучасної низькотемпературної фізики твердого тіла. Високотемпературні надпровідники, в тому числі й залізовмісні, очікують остаточної відповіді на питання про механізми надпровідного спарювання, і, зокрема, про роль в них взаємодії ґратка - магнітна підсистема. Мультифероїкі, до яких відноситься й сімейство рідкісноземельних фероборатів, дозволяють сподіватися на майбутнє їх застосування в пристроях запису-зберігання інформації. У зв'язку з цим експерименти, проведені в дисертації Гайдамак Т.М., та отримані в їх ході дані є цілком **актуальними**. Про правомочність такого твердження свідчить і публікація конкретних результатів дисертаційної роботи в високореєтингових наукових журналах (PRB, EPL, ФНТ).

Всі дослідження виконані в повній відповідності з офіційно затвердженими академічними програмами.

Передбачалося:

1) отримання довідкових даних про модулі пружності досліджуваних об'єктів; а також й п'езомодулів у випадку фероборатів.

2) вивчення механізмів зв'язку пружної підсистеми з електричною та магнітною структурами з використанням оригінального методу акустоелектромагнітної трансформації. Поставлені задачі вирішувалися шляхом високочастотних вимірів швидкості ультразвуку та аналізом електромагнітного відгуку, що виникає в зразках під дією високочастотних деформацій.

Дисертація побудована за традиційною схемою - короткий огляд літератури, опис експериментальної техніки та результативні розділи (три розділи).

Обговоримо більш детально зміст дисертації за розділами.

Перший розділ. Огляд через обмеженість обсягу дуже стислий, він лише вводить читача в коло вирішуваних завдань, і та дозволяє оцінити літературні напрацювання, що передують виконанню розв'язуваних в дисертації завдань.

Другий розділ. Наведено опис електроніки та криогенного обладнання. Всі вимірювання виконані на *унікальній* апаратурі, розробленій та виготовленій раніше в ФГІНТ НАНУ, в науковій групі, до якої належить дисертантка. Її параметри по точності вимірювань і можливості роботи зі зразками невеликих розмірів (менше ніж 1мм), наскільки я можу судити, є кращими для світової практики. Криогенна частина дозволяє проводити вимірювання в інтервалі температур від 1,7 К до кімнатних, хоча використана в роботі акустична сполучна речовина обмежувала можливий діапазон вимірювань температурою її затвердіння (~ 120 К). Діапазон магнітних полів до 5Тл не виглядає за сучасними мірками достатнім, проте для цілей, що вирішуються в роботі, цілком прийнятний.

На мій погляд, найбільш важливі і цікаві результати дисертації викладені в **третьому розділі**, присвяченому дослідженню пружних властивостей надпровідного FeSe. Тут дисертантці пощастило, оскільки в її розпорядженні опинилися, добре відомі в світі своєю якістю, зразки монокристалів FeSe. Результати цього розділу можна поділити на дві частини:

1) в першій частині проведені виміри швидкості звуку і розраховані компоненти тензора модулів пружності в широкому інтервалі температур включно температурного інтервалу існування надпровідної фази. Вивчено вплив тетра - орто структурного перетворення в FeSe на модулі пружності. Саме фазове перетворення йде через пом'якшення (C_{11} - C_{12}) моди, однак при цьому спостерігається і не характерне для структурних переходів сильне пом'якшення моди C_{11} . Тут треба виділити експериментальне спостереження гігантської аномалії швидкості поздовжніх коливань при температурі надпровідного упорядкування T_c . Цей ефект є цілком очікуваним зважаючи на рекордну залежність T_c від тиску, добре відому особливість саме FeSe. Несподіваною виявилася зміна поглинання C_{11} моди в надпровідній фазі, що підкоряється БКШ залежності і лінійно змінюється з частотою. Така поведінка має спостерігатися тільки в зразках з вільним пробігом електронів, що перевищує довжину звукової хвилі.

Тут треба підкреслити, що результати по пружним властивостям FeSe отримані вперше в світі, і, що приємно, саме в ФГІНТ НАНУ, незважаючи на світовий бум досліджень цього об'єкту. Це також свідчить про світовий рівень цього дослідження.

2) до другої частини слід віднести результати вивчення акустoeлектромагнітної трансформації (АЕМТ) в FeSe, проведеної на унікальному обладнанні. Щодо особливостей цієї методики, то тут треба нагадати, що звукові коливання завжди є полярними коливаннями. Тому поверхня зразка, в якому збуджені звукові хвилі буде випромінювати електромагнітні хвилі на звуковій частоті. В АЕМТ - експерименті досліджується полярність цього випромінювання. Несподіваним результатом виявилася реєстрація компоненти маг-

нітного поля, що збігається з напрямом поляризації звукової хвилі, що збуджується в зразку FeSe. Відповідна компонента електричного поля є перпендикулярною до електричного поля поперечного звуку. Ефект виникає нижче температури структурного тетра-орто переходу. В новітній трактовці, в результаті цього переходу, в FeSe з'являється електронна нематична фаза. В дисертації було розглянуто два механізми, що можуть привести до подібної поляризації поля випромінювання - аномальний Холл ефект та п'єзомагнетизм. Проведені оцінки інтенсивності сигналу встановили, що більш прийнятним є пояснення на базі динамічного п'єзомагнетизму. Тобто ефекту який обумовлений інтенсивними антиферромагнітними флуктуаціями, оскільки відомо, що в FeSe відсутній однорідний антиферромагнітний порядок.

Логіка дослідження привела до появи **четвертого розділу** в дисертації оскільки висновки третього розділу потребували відповіді, чи дійсно за допомогою методу АЕМТ можливо не тільки якісно, але і кількісно вимірювати п'єзомагнітний відгук антиферромагнітного кристалу. Для цього було проведено дослідження класичного п'єзомагнетика CoF_2 . Результат практично збігся з відомими даними Боровика-Романова, отриманими в статичних вимірах. Новим результатом цих експериментів стало виявлення п'єзомагнітного відгуку іншої природи, що спостерігається при накладенні магнітного поля при температурах, які значно перевищують температуру Нееля. Авторка пов'язує ефект з проявом ближнього порядку й зазначає схожу поведінку в парамагнітній сприйнятливості.

Низка цікавих та важливих результатів представлена в **п'ятому розділі** який присвячено акустичним дослідженням рідкісноземельних фероборатів Sm та Nd. Вперше виміряні швидкості звуку і розраховані модулі пружності. Точність вимірювань швидкості дозволила виділити невеликий, в загальному, внесок п'єзоелектричної взаємодії і оцінити величину п'єзоелектричного модуля. Виявилось, останній на порядок перевищує такий для класичного п'єзоелектрика кварцу, таким чином фероборати можуть бути рекомендовані для технічних застосувань.

Іншим оригінальним результатом розділу, який потрібно відмітити, є вперше виявлений ефект, названий авторами магнітоп'єзоелектричним. Він полягає в значному (більше ніж в два рази) зростанні п'єзомодуля в антиферромагнітному впорядкованому стані за рахунок спільної дії магнітопружної та магнітоелектричної взаємодій. Цікавим для можливих застосувань є віднайдена залежність величини комбінованого п'єзомодуля від магнітного поля. Вперше досліджені зміни діелектричної проникності від орієнтації магнітного поля в базовій площині за рахунок магнітоємного ефекту.

Новизна отриманих наукових результатів. Засвідчую, що всі положення та результати, які сформульовані автором дисертації в пункті «наукова новизна», є новими,

вперше отриманими та коректно сформульованими автором. Новітніми результатами вважаю дані про модулі пружності вивчених об'єктів, виявлення в FeSe явищ, кваліфікованих автором як п'єзомагнетизм, і магнітоп'єзоелектричний ефект в фероборатах.

Наукова і практична цінність отриманих результатів. Дані по пружним характеристикам FeSe та фероборатів безсумнівно будуть використані в якості довідкових при «обкатці» різних теоретичних підходів до опису властивостей вивчених матеріалів. Спостережені в FeSe ефекти, в тому числі й «п'єзомагнетизм», вже ініціювали ряд досліджень світової спільноти анізотропних властивостей електронної нематичної фази в цьому кристалі. Можна очікувати, що отримані результати дозволять наблизитися до більш обґрунтованого розуміння вкладу магнітних кореляцій в механізм надпровідності. Виявлення магнітоп'єзоелектричних ефектів дозволяє глибше зрозуміти взаємодію між різними підсистемами мультифероїків. Розроблений в дисертації експериментальний підхід до вивчення спін-залежних п'єзоелектричних ефектів безсумнівно буде використовуватися і в нових об'єктах.

Всі наведені експериментальні дані не викликають сумнівів у їх **достовірності**. Моя впевненість в цьому заснована на грамотному підході до виконання і трактування експериментів, точності використовуваних методів, відтворюваності та самоузгодженості результатів.

Дисертація написана ясною мовою та належним чином оформлена. Текст автореферату повністю відображає зміст дисертації.

Проте дисертація не позбавлена певних недоліків. З цього приводу наведу декілька **зауважень** до змісту дисертації та її оформлення:

1) акустичний контакт між зразком і лінією затримки забезпечується силіконовим маслом, яке твердне при 120 К. Завдяки цьому в зразку можуть з'являтися термопружні напруги, які, в принципі, також можуть ініціювати АФМ стан на поверхні FeSe. (Відомо, що АФМ стан в FeSe виникає при тиску 0.8 Гпа.) Поява такого стану принаймні в області інтерфейсу, може приводить до явищ, обговорюваних в третьому розділі. В дисертації відсутнє обговорення цього питання.

2) феноменологічний аналіз й обговорення отриманих результатів в п'ятому розділі припускають, що вектор антиферомагнетизму L розташовується в базовій площині. Однак відомо, що завдяки дуже слабкою базисної анізотропії L часто виходить з площини на великий кут. Але ця особливість в дисертації не розглянута.

3) в дисертації відсутня ілюстрація геометрії АЕМТ експерименту на кристалі CoF_2 , що ускладнює сприйняття поляризаційної діаграми на Рис. 4.2. Для кращого сприйняття матеріалу було би добре на початок кожного розділу з досліджуваними об'єктами додава-

ти їх мінімальну характеристику, а саме - просторову групу (парамагнітної фази), температуру впорядкування, тип магнітного впорядкування. Ці дані наведені, але розпорочені по тексту.

Ці зауваження не стосуються сутності дисертації Гайдамак Т.М., не ставлять під сумнів її основні положення і висновки, і не впливають на загальну високу оцінку роботи. Основні результати дисертаційної роботи викладено в 6 статтях у фахових високореєтингових наукових виданнях та оприлюднені на багатьох міжнародних конференціях.

За актуальністю теми, змістом і об'ємом, науковим рівнем і новизною, практичною спрямованістю дисертаційна робота Гайдамак Т.М. **“Пружні характеристики FeSe, SmFe₃(BO₃)₄, NdFe₃(BO₃)₄ та акустoeлектрична трансформація в них”** є завершеним науковим дослідженням в галузі фізики твердого тіла, що повністю відповідає всім вимогам МОН України до кандидатських дисертацій, зокрема пунктам 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», а її авторка Гайдамак Тетяна Миколаївна безумовно заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент:

Доктор фізико-математичних наук, професор,
лауреат Державної премії України з науки і техніки
завідувач відділу теорії динамічних властивостей складних систем
Донецького фізико-технічного інституту
ім. О. О. Галкіна НАН України (м. Київ)

Ю. Г. Пашкевич

Підпис Ю. Г. Пашкевича засвідчую:
Вчений секретар
Донецького фізико-технічного інституту
ім. О. О. Галкіна НАН України (м. Київ)
кандидат технічних наук



В. Ю. Дмитренко