

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Голяткіної Марини Олексіївни

на тему «Електрофізичні та магнітні властивості домішок і дефектів у вуглецевомістких аморфних та монокристалічних матеріалах»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 10 Природничі науки
за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

Актуальність теми дисертації.

Дефектна структура та домішкові центри значною мірою визначають фізичні властивості вуглецевомістких матеріалів, що дає можливість отримувати матеріали з заданими параметрами, такими як провідність, оптичні характеристики, тощо. Високі тепло- та електропровідність, зносостійкість сприяли широкому застосуванню вуглецевомістких матеріалів у пристроях, які працюють у складних експлуатаційних умовах: у корозійних середовищах, за високих температур та напруг тощо. Це перспективні матеріали для застосування в електроніці, біомедичних технологіях, енергетиці. Встановлення наявності магнітного впорядкування та зв'язку між спіновими властивостями й електронною провідністю необхідне для використання вуглецевомістких матеріалів у спінтроніці, квантових технологіях та сенсорах. Тому представлена дисертація є безумовно актуальна.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Вперше методом ЕПР в діапазоні частот Х-діапазону в широкому діапазоні температур від 5 К до 295 проведено систематичне дослідження впливу домішки германію на електронні та магнітні властивості безводневих алмазоподібних вуглецевих тонких плівок. Встановлено, що збільшення змісту германію веде до зменшення антиферромагнітної взаємодії локальних магнітних моментів. Показано, що внесок локалізованих електронів в магнітну сприйнятливність є значним для DLC плівок з 0 ат. % і 1 ат. % Ge, тоді як для DLC плівок з 2,5 ат. % Ge основний внесок дають нелокалізовані електрони. Локалізовані електрони пов'язані з sp^2 або sp вуглецевими центрами, а нелокалізовані відповідають електронам на sp^3 орбіталі.

2. Вперше проведено аналіз спектрів електрично-детектованого магнітного резонансу у $6H-SiC$ з високим вмістом азоту, що дало змогу виявити зв'язок

між концентрацією домішок та електронним транспортом. Виявлено підвищення обмінної взаємодії між парамагнітними центрами в умовах резонансу, що пов'язано з підсиленням стрибкової провідності.

3. Вперше встановлено природу спінового обміну між локалізованими та делокалізованими електронами у 4H-SiC, що дозволяє краще розуміти їх вплив на електропровідність матеріалу.

Ступінь обґрунтованості. Наукові положення та висновки, сформульовані в дисертаційній роботі, є обґрунтованими та підтверджуються результатами експериментальних досліджень і теоретичних розрахунків. Застосовані методи ЕПР та електрично-детектованого магнітного резонансу забезпечують високу точність у визначенні взаємозв'язку електрофізичних і магнітних властивостей матеріалів. Отримані дані узгоджуються з відомими літературними даними.

Достовірність отриманих у дисертаційній роботі наукових результатів підтверджується:

- ✓ коректною постановкою задачі, використанням відповідного математичного апарату і та порівнянням отриманих експериментальних даних з результатами існуючих теоретичних моделей;
- ✓ детальним аналізом наукових результатів отриманими у провідних наукових центрах за тематикою дослідження;
- ✓ узгодження експериментальних результатів, моделювання та розрахунків з матеріалами попередніх досліджень;
- ✓ апробацією наукових результатів на фахових міжнародних конференціях та семінарах.

З моєї точки зору, поставлене наукове завдання в дисертаційній роботі виконано повністю, і здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Голяtkіної М. О. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 104 «Фізика та астрономія» та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Фізика».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, яка підтверджує особистого внеску здобувача у фізику твердого тіла, наноматеріалів та магнітного резонансу.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Голяtkіної Марини Олексіївни є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату

та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Результати, викладені в дисертаційній роботі, чітко структуровані, що відповідає вимогам МОН України до дисертаційних робіт в галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія». Представлений матеріал логічно поєднаний та має всі ознаки завершеної наукової праці. Усі розділи мають внутрішню єдність та завершеність. Змістове наповнення підрозділів відповідає змісту відповідних розділів. Стиль викладення є формальним і науковим, хоча подекуди зустрічаються мовні конструкції, які можуть ускладнювати сприйняття матеріалу. Використана термінологія загалом відповідає загальноприйнятій, зокрема, у спектроскопії ЕПР, хоча є потреба в стандартизації деяких термінів, що використовуються. В цілому, дисертація написана досить гарно, що полегшує сприйняття досить нетривіальних наукових результатів, які отриманні в рамках цієї роботи.

Сформульовані в дисертації висновки добре корелюють із загальною метою та науковими завданнями. В цілому, дисертаційна робота є закінченою науковою працею, що містить низку нових наукових результатів.

Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків та списку літератури (257 найменувань). Загальний обсяг дисертації 176 сторінок.

У вступі відображений сучасний стан досліджень та проблем, які зараз існують в фізиці вуглецевомістких аморфних та монокристалічних матеріалів і, зокрема, щодо аналізу впливу домішок та дефектів на їх фізичні властивості. Зроблено висновок, що, попри інтенсивні дослідження, залишаються нез'ясованими такі питання як природа спінового обміну локалізованих і нелокалізованих електронів та зв'язок між магнітними й електричними характеристиками у гексагональних політипах монокристалів SiC з різним вмістом N, магнітні властивості домішкових станів і вплив дефектів на електронні процеси у DLC-плівках.

У першому розділі виконано огляд властивостей вуглецевомістких аморфних та монокристалічних матеріалів та методи їх вирощування. Розглянуто типи гібридизації атомів карбону, за рахунок яких можливе утворення різних алотропних форм вуглецю, та різницю в гібридизації поверхневих і глибоких шарів вуглецевих матеріалів. Зазначено суттєвий вплив гібридизації на властивості вуглецевих матеріалів.

Другий розділ присвячено огляду застосування методів спектроскопії ЕПР для дослідження вуглецевомістких матеріалів. Розглянуто теоретичні та експериментальні основи методу, зокрема детально описано основні

компоненти спектрометра ЕПР. Проаналізовано, які параметри парамагнітних систем можуть бути визначені з аналізу експериментальних параметрів спектра.

У третьому розділі представлено результати дослідження електрофізичних та магнітних властивостей монокристалів 4Н-SiC із різною концентрацією донорів азоту. За допомогою спектроскопії ЕПР в стаціонарному та імпульсному режимах визначені механізми спінового обміну між локалізованими та нелокалізованими електронами.

У четвертому розділі проведено ЕПР дослідження безводневих алмазоподібних вуглецевих плівок, легованих германієм, в широкому діапазоні температур. Проаналізовано температурні залежності спінової сприйнятливості, положення резонансного магнітного поля та ширини лінії спектру ЕПР.

П'ятий розділ присвячено вивченню зв'язку між магнітними та електричними властивостями донорів азоту в монокристалах 6Н-SiC з низьким питомим опором. З даною метою досліджено природу сигналу ЕДМР у монокристалах 6Н-SiC з високим вмістом азоту.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати дисертації висвітлені у 3 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 3 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та Scopus, з яких 3 статті у виданнях, віднесених до першого — третього квартилів (Q1 — Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank.

Також результати дисертації були апробовані на 4 наукових фахових конференціях.

Якість та кількість публікацій відповідають «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44.

Наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

В якості зауважень до дисертаційної роботи можна віднести наступне:

1. Зауваження до оглядової частини дисертації. Огляд літератури докладно описує добре відомі речі, які викладаються навіть в університетських курсах: алотропні форми вуглецю, типи гібридизації, фізичні властивості

карбіду кремнію, методи осадження плівок. Це потрібно, але могло би бути суттєво скорочене з посиланням на відповідні монографії та підручники. Отже, цей розділ замість проведення огляду досліджень, які передували дисертації, присвячений викладенню академічних результатів. Судячи з огляду літератури, складається враження, що автор не достатньо ознайомлений із сучасним станом проблеми. В певній мірі даний недолік компенсовано в оригінальних розділах. Окрім того, в оглядовій частині не висвітлено невирішені питання, тому місце здобувача у розв'язанні проблеми також не зрозуміло. Хоча, варто зазначити, що ці питання в певній мері висвітлені у вступі до дисертації в розділі «актуальність теми», однак, це варто було розвинути в огляді. Також оглядовій частині не вистачає стислого резюме стосовно необхідності проведення досліджень в даному напрямку.

2. Те ж саме, в деякій мірі, відноситься і до другого розділу. Більшість наведеної інформації про спектрометр ESR можна знайти на сайті Bruker BioSpin. Загальні положення та апаратні подробиці розписані занадто детально. В той же час, бракує інформації, чому саме такі параметри вимірювань були обрані. Також більш уваги слід було приділити методу електронно детектованого спінового резонансу, який є менш відомим. Головним чином, варто було проаналізувати переваги та недоліки цього методу, в яких матеріалах він може бути застосований і саме чому з фізичної точки зору, а не загальної констатації факту, тощо. Що стосується мікрохвильового безконтактного методу, то варто було б проаналізувати, які інші параметри впливають на добротність резонатора, крім провідності зразку, і чи не будуть вони впливати на достовірність отриманих результатів.
3. Розділ 3. Я не знайшов інформацію про розміри зразків. Тому важко зрозуміти, наскільки потрібно враховувати вплив провідності на форму ліній ЕПР. Варто було б також навести оцінку провідності, отриману з аналізу дайсонівського неоднорідного уширення лінії. Було б доцільно також провести вимірювання магнітної сприйнятливості за допомогою магнітометрії.
4. До розділу 4. Варто було б навести поведінку ефективного магнітного моменту, який би краще показав наявність антиферомагнітного обміну та значення температури Нееля. Крім того, краще б було показати дані підгонки з урахуванням температурно-незалежного внеску в сприйнятливість.
5. В останньому розділі мені бракує перевірки припущення про розігрів зразку. Це можливий механізм, але не єдиний. Хотілось би бачити більше доказів цього факту.

Висловлені зауваження не є визначальними, не зменшують наукову новизну та практичну значимість результатів, які отримані в дисертаційній роботі, і не впливають на загальну позитивну оцінку.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Голяtkіної Марини Олексіївни на тему «Електрофізичні та магнітні властивості домішок і дефектів у вуглецевомістких аморфних та монокристалічних матеріалах» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 10 Природничі науки. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Голяtkіна Марина Олексіївна заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент:

завідувач відділу теорії магнітних
явищ та магнітної динаміки
конденсованих середовищ
Інституту магнетизму імені
В.Г. Бар'яхтара НАН України
д.ф.-м.н., с.н.с.



Володимир ГОЛУБ

«29» травня 2025 року

Підпис Голуба В.О. засвідчую

Вчений секретар Інституту магнетизму ім. В.Г. Бар'яхтара
НАН України
к.ф.-м.н.



Ірина ШАРАЙ