

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Мельника Максима Петровича

ЕЛЕКТРОННА СТРУКТУРА ПЕРОВСЬКІТОПОДІБНИХ ОКСИДІВ

ВАНАДІЮ І НІКЕЛЮ З РІДКОЗЕМЕЛЬНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ,

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

1. Актуальність теми дисертації

Створення новітніх конструкційних матеріалів з широкими набором функціональних можливостей є основою розвитку таких актуальних наукоємних галузей, як приладобудування (компоненти систем обробки та передачі інформації), оборонна промисловість (матеріали для використання в екстремальних умовах), альтернативна енергетика (сонячні елементи, батареї високої ємності та потужності), біомедицина (системи діагностики та таргетної доставки ліків) тощо. Сполуки $LnMeO_3$ ($Me = V, Ni$; $Ln = Y, La, Nd, Sm, Gd$), які досліджуються в представленій дисертаційній роботі, можна повною мірою віднести до таких перспективних конструкційних матеріалів, оскільки для них характерна наявність магнітних та фероелектричних властивостей у поєднанні з металевою чи напівпровідниковою провідністю та корисними оптичними характеристиками. Завдяки цьому вказані матеріали знаходять застосування як сенсори, елементи пристроїв запису інформації та твердотільних акумуляторів, каталізатори для прискорення хімічних реакцій; використовуються вони і як матеріали для високотемпературних технологій.

В той же час, залишається нез'ясованим ряд питань щодо електронної структури сполук $LnMeO_3$ ($Me = V, Ni$; $Ln = Y, La, Nd, Sm, Gd$). Йдеться про характер розподілу електронної густини різної симетрії складових атомів вище та нижче рівня Фермі, що визначає тип електропровідності та магнітні характеристики оксидів. Однак, відомі теоретичні розрахунки для окремих сполук з вказаного вище ряду не надають достатньої інформації про їх електронну будову, оскільки не верифіковані достовірними експериментальними даними. Тому тема дисертаційної роботи Мельника М.П. є **актуальною**, оскільки передбачає комплексне дослідження електронної структури та магнітних властивостей оксидів $LnMeO_3$ через поєднання теоретичних розрахунків в рамках теорії функціоналу густини (DFT) з експериментальним дослідженням енергій валентних електронів та розподілів

електронної густини методами рентгеноелектронної та рентгенівської емісійної спектроскопії.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами темами

Дисертаційна робота Мельника М.П. виконувалася у відділі спектроскопії твердого тіла Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України. Дослідження, представлені в роботі, було виконано в рамках наукових тем з фінансуванням НАН України: «Електронна структура і властивості перехідних металів зі змінними структурними та розмірними характеристиками», 2006-2010 рр., номер державної реєстрації 0106U000549; «Електронна структура і фізичні властивості матеріалів пристроїв спінтроники, плівкових і ультрадисперсних наносистем на основі перехідних металів», 2011-2015 рр., номер державної реєстрації 0111U003149; «Електронна будова та фізичні властивості сплавів Гойслера і дисперсних структур на модифікованій поверхні конструкційних сталей», 2021-2025 рр., номер державної реєстрації 0121U109852. Крім того, окремі дослідження за темою дисертації виконувались за тематикою «Фізичні основи технології формування гетерогенних наноструктур для потреб спінтроники на основі напівметалевих феромагнетиків» в рамках Державної цільової науково-технічної програми «Нанотехнології та наноматеріали» 2010-2014 рр., номер державної реєстрації 0110U006284.

3. Новизна наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

В результаті виконання дисертаційного дослідження Мельником М.П. було отримано ряд наукових результатів, які встановлюють нові фізичні закономірності формування електронної структури сполук $LnMeO_3$ ($Me = V, Ni$; $Ln = Y, La, Nd, Sm, Gd$). Найбільш важливими серед них вважаю наступні:

- встановлено існування двох областей у валентній зоні оксидів $LnMeO_3$: біляфермієвської (від 0 eV до ≈ -8 eV) та більш глибокої зони (від -15 eV до -20 eV), а також визначено парціальні розподіли електронної густини різної симетрії в кожній із областей. Показано, що біляфермієвська область формується $Ln4f$ -, $Me3d,4s$ - та $O2p$ -електронами, а більш глибока область - гібридизованими станами $Ln 5p_{3/2,1/2}$ -, $Y 4p_{3/2,1/2}$ - та $O 2s$, причому структура електронних розподілів в обох областях є спінзалежною;

– виявлено існування заборонених зон, які розділяють електронні розподіли валентних і вакантних станів в енергетичному спектрі оксидів $LnVO_3$. Показано, що ширини заборонених зон для електронів зі спіном вгору (0,3 – 0,9 eV) майже на порядок менші, ніж для електронів зі спіном вниз і суттєво залежать від сорту Ln атомів, що зумовлює напівпровідникові властивості оксидів;

– показано, що в нікелатах $LnNiO_3$ ($Ln = Nd, Sm, Gd$), на відміну від ванадатів $LnVO_3$ ($Ln = La, Nd, Sm, Gd, Y$), заборонена зона енергій електронів існує тільки в зонній схемі для електронів зі спіном вниз і формується $O2p$ - та $Ni3d$ -станами, тоді як заборонена зона для електронів зі спіном вгору відсутня. Така особливість електронної структури визначає металевий характер провідності нікелатів;

– з'ясовано розподіл магнітних моментів на атомах Ln , Me , O , в міжатомному просторі та в елементарній комірці оксидів $LnMeO_3$. Виявлено, що основний магнітний момент комірки локалізований та атомах Ln (80 – 90%) за рахунок сильно поляризованих $4f$ -електронів, тоді як магнітний момент на атомах Me складає 12 – 18% і зумовлений в основному $3d$ - та p -електронами. Внесок магнітних моментів на атомах кисню не перевищує 1 – 3% і пов'язаний з p -станами кисню.

4. Практичне значення одержаних результатів

У дисертаційній роботі Мельника М.П. розвинуто метод комплексного визначення електронної будови складних оксидів на основі лантанодів та $3d$ -металів, який базується та теоретичних розрахунках в рамках методу DFT та верифікується комплексом експериментальних даних по енергіям валентних електронів та розподілам їх електронної густини, отриманих методами фотоелектронної та рентгенівської емісійної спектроскопії. Такий підхід може бути рекомендований до застосування при визначенні електронної структури та магнітних властивостей широкого кола споріднених сполук, наприклад, зі змінною стехіометрією, що складає основу для прогнозування фізичних характеристик новітніх матеріалів та розробки методів їх спрямованого синтезу. Зокрема, використання підходу, розвинутого в дисертаційній роботі, буде корисним при прогнозуванні як характеру та параметрів електропровідності, так

і магнітних характеристик складних оксидів для застосування в приладах сучасної електроніки та спінтроніки.

Одержані в роботі результати також можуть бути використані в навчальному процесі при викладанні дисциплін «Квантова механіка», «Квантова теорія твердого тіла» за освітньо-професійною програмою «Фізика» (бакалаврат) та дисципліни «Основи фотоелектронної та рентгенівської емісійної спектроскопії» за освітньо-науковою програмою «Фізика наносистем» (магістратура) на фізичному факультеті Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

5. Структура за зміст дисертації, її завершеність та відповідність встановленим вимогам

Дисертаційна робота Мельника М.П. складається зі вступу, 4 розділів, висновків та списку літератури, що включає 132 найменування. Робота загалом складає 149 сторінок, містить 63 рисунки, 19 таблиць.

У **вступі** автором обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету, об'єкт та предмет дослідження, визначено наукову новизну отриманих результатів та їх практичну цінність. Вказано задачі, які вирішувалися в ході виконання дисертаційної роботи та методи досліджень. Визначено особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію роботи та публікації автора.

Перший розділ дисертації присвячено викладенню відомих літературних даних щодо досліджень електронної структури оксидів рідкоземельних елементів з $3d$ -металами. Наведено представлені в літературі дані щодо кристалічної структури та умов стабільності вказаних оксидів, характеру температурних залежностей їх структурних параметрів та магнітних характеристик. На основі експериментальних досліджень різних авторів проаналізовано особливості рентгеноелектронних спектрів цих сполук, зокрема, парціальні розподіли електронної густини різної симетрії та вплив перерізів фотоіонізації різних підоболонки на інтенсивність спектрів. Розглянуто моделі формування енергетичних зон, вказані основні складнощі в проведенні послідовних зонних розрахунків з врахуванням ефектів кореляції та магнітного впорядкування. Критично виконаний аналіз літературних даних дозволив автору чітко сформулювати основні завдання власного дослідження.

У другому розділі розглянуто комплекс методичних питань, пов'язаних з виконанням теоретичних розрахунків зонної електронної структури сполук $LnMeO_3$ ($Me = V, Ni$; $Ln = Y, La, Nd, Sm, Gd$) та забезпеченням їх експериментальних рентгеноелектронних та рентгеноспектральних досліджень. Зокрема, детально розглянуто особливості методики рентгеноелектронної спектроскопії, розглянуто робочі характеристики окремих блоків рентгеноелектронного спектрометра SERIES 800XPS та фактори, що визначають роздільну здатність приладу. Проаналізовано інформаційні можливості рентгенівської спектроскопії емісійних смуг, пов'язаних з радіаційними переходами $3d, 4s - 2p_{3/2}$ та $2p - 1s$. Представлено технічні характеристики рентгенівського флуоресцентного спектрометра САРФ-1, розглянуто можливості використання приладу для рентгеноспектральних досліджень вказаних оксидів рідкоземельних металів.

Для виконання *ab initio* розрахунків електронної структури вказаних сполук $LnMeO_3$ автором використано метод функціоналу густини, оснований на теорії функціоналу густини (DFT). Проаналізовано основні принципи методу, розглянуто теореми Хохенберга-Кона та Кона-Шема. Вказано методи врахування обмінно-кореляційного потенціалу, зокрема, узагальнене градієнтне наближення GGA та GGA+U. Для виконання розрахунків залучено програмний пакет Wien2k. Наведено використані для розрахунків дані щодо кристалічної структури оксидів, вибору радіусів МТ-сфер та значень ефективного кулонівського та обмінного потенціалів. Представлений розгляд методичних характеристик рентгенівських експериментів та теоретичних розрахунків свідчить про високу кваліфікацію автора як фізика-дослідника.

Третій розділ присвячено результатам дослідження електронної структури оксидів ванадію $LnVO_3$ ($Ln = La, Nd, Sm, Gd, Y$). Для кожної зі вказаних сполук було отримано рентгеноелектронні спектри, розподіли інтенсивності в яких як функції енергії зв'язку електронів використовувалися для порівняння з теоретично розрахованими розподілами повних та парціальних (для електронів різної симетрії) електронних густин окремих атомів та їх верифікації.

Для кожного з оксидів обчислювалися парціальні електронні густини: для атомів La, Nd, Sm, Gd, Y це $5s, 4p, 4d, 4f$ (останні – окрім La); атомів V – $4s, 3p, 3d$; атомів O_1 та O_2 – $2s, 2p$, як для електронів зі спіном вгору, так і зі спіном

вниз. За цими даними визначалася функція розподілу повної електронної густини та дисперсійні залежності $E(\mathbf{k})$ вздовж прямих, що з'єднують точки високої симетрії в зоні Бріллюена. Встановлено, що для всіх розглянутих оксидів у спектрах електронних густин присутні заборонені зони, що розділяють валентні та вакантні електронні стани. Для електронів зі спіном вгору ширини забороненої зони змінюються від 0,3 eV (LaVO_3) до 0,92 eV (GdVO_3), для електронів зі спіном вниз від 3,7 eV до 4,2 eV відповідно. Окремо досліджувався оксид ванадію з ітрієм (YVO_3), для якого ширини забороненої зони склали 0,75 eV та 4,09 eV відповідно. Тобто, вся група оксидів має напівпровідникову провідність.

Розраховано магнітні моменти на атомах різного сорту, в міжатомному просторі та на елементарних комірках у цілому. Показано, що основний внесок в формування магнітних моментів на атомах рідкоземельних елементів вносять високополяризовані $4f$ -стани, тоді як основну роль в утворенні магнітних моментів ванадію відіграють його поляризовані $3d$ -електрони при практично нульових магнітних моментах кисню першого і другого роду. Внесок магнітних моментів атомів рідкоземельних елементів у загальний момент комірок виявився визначаючим – таким, що складає від 60% (NdVO_3) до 80% (GdVO_3).

Проаналізовано вплив рідкоземельних елементів на електронну структуру розглянутих ванадитів. Як вже відзначалося, виявлено зростання ширини забороненої зони для обох типів поляризації електронів з ростом порядкового номеру атомів рідкоземельних елементів. Аналогічна тенденція встановлена і для магнітних моментів комірок, які також зростають при збільшенні порядкового номеру атомів рідкоземельних елементів. При цьому частка магнітного моменту комірки, зумовлена $3d$ -електронами ванадію, залишається практично незмінною.

У четвертому розділі наведено результати дослідження електронної структури нікелатів LnNiO_3 ($\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd}$). Застосовано той же загальний підхід, що і при дослідженні ванадитів LnVO_3 ($\text{Ln} = \text{La}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd}, \text{Y}$). А саме, експериментальною основою для відрахунку шкали енергій електронів у валентній зоні та зоні провідності виступають дані рентгеноелектронної спектроскопії, а у випадку оксиду GdNiO_3 – ще й рентгенівської емісійної спектроскопії (ОК α – смуга). В подальшому для всіх вказаних вище сполук у формалізмі GGA+U виконувалися DFT-розрахунки парціальних електронних

густин $5s$, $4p$, $4d$, $4f$ (Nd, Sm, Gd); $4s$, $3p$, $3d$ (Ni); $2s$, $2p$ (O_1 та O_2) для електронів зі спіном вгору та вниз. Результатами обчислень є функції розподілу електронної густини різної симетрії та дисперсійні залежності $E(\mathbf{k})$ для різних напрямків хвильового вектора в зоні Бріллюена. Важливий результат цього розділу полягає в тому, що у всіх трьох оксидах $LnNiO_3$ ($Ln = Nd, Sm, Gd$) $Ni3d$ - та $O2p$ -електрони зі спіном вгору мають кінцеву густину на рівні Фермі. Отже, в дисертаційній роботі проказано, що вказані оксиди нікелю мають металевий характер провідності, на відміну оксидів ванадію. В той же час, розрахунки показують, що для електронів зі спіном вниз повинна існувати заборонена зона шириною 3,4 – 3,9 еВ. Таким чином, згідно з розрахунками автора, оксиди $LnNiO_3$ принципово відрізняються за провідністю від оксидів $LnVO_3$, виявляючи металеву провідність, на відміну від $LnVO_3$, для яких характерна напівпровідникова провідність.

За розрахованими просторовими розподілами електронної густини кожної симетрії атомів, що утворюють елементарну комірку, було визначено магнітні моменти на атомах, у міжатомному просторі та на елементарних комірках. Як і для сполук $LnVO_3$, внесок магнітних моментів атомів рідкоземельних елементів у загальний момент комірок є превалюючим і складає 80 – 90% від загального магнітного моменту. Показано, що магнітні моменти комірок оксидів $LnNiO_3$ зростають при збільшенні порядкового номеру атомів рідкоземельних елементів, а частка магнітного моменту комірки від $3d$ -електронів нікелю при цьому не змінюється.

Дисертаційна робота Мельника М.П. оформлена у відповідності до вимог, наведених у Наказі МОН України «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» від 12.01.2017 №40 і являє завершене наукове дослідження.

6. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації та їхня достовірність

Розгляд матеріалів дисертаційної роботи Мельника М.П. дозволяє зробити висновок, що результати теоретичних розрахунків електронної структури оксидів $LnMeO_3$ ($Me = V, Ni$; $Ln = Y, La, Nd, Sm, Gd$) та експериментальних досліджень фотоелектронних та рентгенівських емісійних спектрів цих сполук є достовірними, а висновки, зроблені на їх основі, добре обґрунтованими. Перш за все, це зумовлено комплексним характером

дисертаційної роботи, в якій теоретичні розрахунки електронної структури DFT-методом виконувалися з використанням добре апробованого програмного пакету Wien2k і доповнювалися експериментальними даними рентгеноелектронних та рентгенівських емісійних спектрів, отриманих автором. Залучення відомих своєю інформативністю методів рентгеноелектронної та рентгенівської спектроскопії дозволило визначати енергії валентних електронів і розподіли електронної густини різної симетрії у вказаних оксидах, а вже за цими даними виконувалася верифікація основних кількісних параметрів в парціальних та повних розподілах електронної густини, отриманих в результаті розрахунків. Необхідно також відзначити коректне методичне забезпечення експериментів, яке включає калібрування фотоелектронного спектрометра SERIES 800XPS та рентгенівського флуоресцентного спектрометра САРФ-1, врахування джерел можливих систематичних та випадкових похибок при отриманні та обробці спектрів.

При інтерпретації результатів дисертаційного дослідження залучалися відомі у літературі дані щодо вибору параметрів, які закладалися у схему розрахунку, та кристалографічних характеристик сполук, виконувалося порівняння отриманих результатів з даними досліджень інших авторів. В роботі уникнуто внутрішніх протиріч в основних твердженнях та висновках, матеріали окремих розділів є взаємодовнючими та логічно узгодженими.

7. Повнота відображення результатів дослідження в опублікованих наукових працях

За матеріалами дисертаційної роботи Мельника М.П. опубліковано 6 статей у фахових реферованих журналах, внесених до наукометричної бази Scopus та віднесених до 3-го і 4-го квартилів (Q3 і Q4). Матеріали дисертації пройшли належну апробацію, будучи представлені на 6 Міжнародних та Всеукраїнських наукових конференціях. Зміст дисертації повністю відповідає матеріалам, викладеним у вказаних статтях.

8. Дискусійні положення та зауваження щодо змісту і оформлення дисертації

При розгляді дисертаційної роботи Мельника М.П. необхідно висловити наступні зауваження:

1. В огляді літературних джерел щодо електронної структури серії оксидів $LnMeO_3$ ($Ln = Y, La, Nd, Sm, Gd$; $Me = V, Ni$) автор робить висновок, що «відсутня інформація про їхні енергетичні характеристики, спінові і зарядові стани атомів, невідомою залишилась природа міжатомних хімічних зв'язків, структура валентних зон і зон провідності, відсутні відомості про залежності цих характеристик від атомного складу сполук» (стор. 34). Таке твердження є певним перебільшенням, оскільки, принаймні, відомі роботи, в яких виконувалися DFT-розрахунки електронної структури таких оксидів, як $LnVO_3$ ($Ln = Pr, Nd, Sm$), $SmMO_3$ ($M = Fe, Co$) (наприклад, *Indian J. Phys.* – 2015. – V. 89. – P. 1133–1142; 2022. – V.96. – P. 2731–2745).

2. Для розглянутих оксидів $LnVO_3$ розрахунки виконувалися для орторомбічної елементарної комірки (Pbnm). В той же час, в діапазоні температур 80 – 200 К у всіх цих структурах відбуваються фазові переходи першого роду з утворенням моноклінної ґратки (P2₁/b11) при незначній зміні параметрів комірки a, b, c (меншій за 0,05 Å) та появою кута моноклінності $\approx 90,2^\circ$. Але при цьому характер залежностей магнітної сприйнятливості від температури для усіх вказаних оксидів в орторомбічній та моноклінній фазах суттєво різний. Було б доцільним провести DFT-розрахунки і для моноклінної фази та порівняти результати з вже отриманими даними для орторомбічної фази з метою з'ясування причин розбіжностей магнітних характеристик.

3. Одним із важливих результатів дисертаційної роботи є висновок про існування забороненої зони в розподілах електронної густини оксидів $LnVO_3$ як для електронів зі спіном вгору, так і спіном вниз. Наприклад, для $SmVO_3$ ширина забороненої зони для спінів електронів вгору складає 0,57 еВ, а для спінів вниз 3,79 еВ. За даними автора, наявність заборонених зон зумовлена значним розщепленням $V3d$ - та $Sm4f$ -станів кристалічним полем. Зокрема, $Sm4f$ -стани зі спіном вгору розщеплюються на два компоненти, один з яких розташований нижче рівня Фермі на 6,1 еВ, а другий на 1,2 еВ вище рівня Фермі. Таке розщеплення характерно і для $V3d$ на валентні Vd_{xy} -, d_z^2 -орбіталі та орбіталі Vd_{yz} -, d_z^2 смуги провідності. Однак, в роботі (*Indian J. Phys.* – 2015. – V. 89. – P. 1133–1142), в якій було виконано розрахунок зонної структури $SmVO_3$, $SmFeO_3$, $SmCoO_3$ методом DFT в наближеннях GGA та GGA+U, таке сильне розщеплення $V3d$ - та $Sm4f$ -станів не спостерігається – компонент $Sm4f$ зі спіном вгору розщеплений на два близькі компоненти (щілина менше за 0,3 еВ) і один з

компонентів перетинає рівень Фермі. Така ж картина і при розщепленні $V3d$. В результаті за даними цитованої вище роботи для вказаних кристалів заборонені зони у розподілах густини мають бути відсутні. У чому, на думку здобувача, може бути причина таких розбіжностей в оцінці величин розщеплення $V3d$ - та $Sm4f$ -станів кристалічним полем?

4. В роботі представлені рентгенівські флуоресцентні $OK\alpha$ -спектри рідкоземельних оксидів перехідних металів, отримані на спектрометрі САРФ - 1. Розподіл інтенсивності в спектрі наведений в шкалі енергій фотонів, хоча більш інформативним є представлення в єдиній енергетичній шкалі. Варто також зауважити, що робота тільки б виграла, якби були отримані $MeL\alpha$ – спектри, дані яких надали б експериментальну інформацію по розподілам густини $Me3d,4s$ -електронів.

5. Дисертаційна робота містить певну кількість стилістичних помилок та огріхів, а також друкарських помилок. Наприклад, вживаються вирази на кшталт «володіють інтересом», «володіють характеристиками» (стор. 17), «оксиди підвладні зміні провідності» (стор. 25), «вирішити рівняння» (стор. 51), «момент решітки є константним» (стор.100), «співпадіння» (стор. 59), «в дійсній роботі» (стор. 66) тощо.

Однак, зроблені зауваження не знижують цінності одержаних у дисертаційній роботі результатів, не ставлять під сумнів достовірність та обґрунтованість основних положень, що виносяться на захист, і не впливають на загальну позитивну оцінку роботи. Частину зауважень можна розглядати як побажання для подальших досліджень здобувача.

9. Загальний висновок щодо дисертаційної роботи та її відповідність установленим вимогам

Дисертаційна робота Мельника М.П. «Електронна структура перовськітоподібних оксидів ванадію і нікелю з рідкоземельними елементами» є завершеною науковою працею, в якій представлено розв’язок актуальної задачі фізики твердого тіла, а саме, встановлено фізичні закономірності формування електронної структури ряду оксидів зі структурою типу перовскіту $LnMeO_3$ ($Me = V, Ni; Ln = Y, La, Nd, Sm, Gd$). Визначено розподіли електронної густини різної симетрії складових атомів, отримано дисперсійні залежності для енергій

електронів валентної зони та зони провідності, встановлено магнітні характеристики вказаних систем.

Матеріали дисертації повністю відображені в статтях, які відповідають вимогам до публікацій, що презентують результати досліджень на здобуття наукового ступеня кандидата наук, а також пройшли належну апробацію на Міжнародних та Українських фахових наукових конференціях.

Таким чином, можна зробити висновок, що дисертація Мельника М.П. «Електронна структура перовськітоподібних оксидів ванадію і нікелю з рідкоземельними елементами», подана на здобуття наукового ступеню кандидата фізико-математичних наук, за актуальністю, ступенем наукової новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів відповідає спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла та вимогам «Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах)», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. № 261 (зі змінами і доповненнями, внесеними постановами Кабінету Міністрів України від 3 квітня 2019 року №283 та від 19 травня 2023 року №502), а її автор – Мельник Максим Петрович заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент,
професор кафедри загальної фізики
фізичного факультету Київського національного
університету імені Тараса Шевченка,
доктор фіз.-мат. наук, професор



Микола БОРОВИЙ

Підпис професора Миколи БОРОВОГО засвідчую

