

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Цибульського Володимира Степановича
“Фото- і терmostимульовані процеси в сцинтиляційних матеріалах на основі сапфіру, вольфраматів і молібдатів”, представлену до захисту на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.10 – фізика напівпровідників та діелектриків

Актуальність дисертаційної роботи пов'язана з пошуком нових та систематизацією існуючих криогенних сцинтиляційних матеріалів, необхідних для пошуку рідкісних процесів, таких як подвійний бета-розпад, взаємодія з масивними слабозв'язаними частинками темної речовини, радіоактивного розпаду довгоживучих ядер. Реєстрація таких процесів є актуальною проблемою сучасної фізики елементарних частинок. Надзвичайно важливим у таких експериментах є те, що завдяки використанню сцинтиляційних кристалів є можливість ідентифікувати вид взаємодії частинки і відкинути випадкові події, спричинені радіаційним фоном. Кристали вольфраматів та молібдатів, завдяки достатньо високому світловому виходу люмінесценції при низьких температурах, ізотопному складу, добрим механічним властивостям, можуть бути використані для фіксації таких процесів. Передбачають, що саме ^{100}Mo є найбільш перспективним ізотопом для виявлення безнейтринного подвійного бета-розпаду ($0\nu 2\beta$), який є чутливим індикатором майоранівської маси нейтрино. Тому кристали з родини молібдатів привертають особливу увагу з огляду на їхнє використання у криогенних сцинтиляційних детекторах для реєстрації $0\nu 2\beta$ -розпаду. Зважаючи на те, що неактивовані кристали сапфіру є хорошим детектором, а кристали сапфіру, леговані титаном, використовують як лазерний матеріал та характеризуються свіченням у червоній ділянці спектра, доцільно припустити, що кристали сапфіру, леговані титаном, також можна використати для експериментального пошуку вищезазначених процесів.

Тому вважаємо, що дисертаційна робота Цибульського В.С. є актуальною як в науковому, так і в прикладному плані. Підтвердженням актуальності є чимала кількість близьких за тематикою науково-дослідних робіт, що виконувались у Науково-технічному і навчальному центрі низькотемпературних досліджень та фізичному факультеті Львівського національного університету імені Івана Франка, за якими автор працював як виконавець, і результати виконання яких, в значній мірі, відображені у його дисертаційній роботі.

Загальна характеристика роботи та основні результати. У дисертаційній роботі досліджено оптико-спектральні та термоактиваційні властивості молібдатів кальцію, цинку і сапфіру з різною концентрацією легуючої домішки іонів титану, структуру та люмінесцентні властивості подвійної системи $(1-x)\text{MgMoO}_4-x\text{MgWO}_4$, вплив високотемпературного відпалу кристалів молібдату кальцію в атмосфері кисню на їхні оптико-спектральні та термоактиваційні властивості.

Дисертація містить вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел із 144 позицій.

Перший розділ носить оглядовий характер і присвячений літературній розвідці відомостей про структуру, сцинтиляційні та оптико-спектральні дослідження. Основну увагу приділено люмінесцентним характеристикам кристалів з родини молібдатів, вольфраматів та сапфіру. Також описано основні принципи роботи та вимоги до матеріалів для криогенних фонон-сцинтиляційних детекторів.

У *другому розділі* описані методи отримання досліджуваних зразків, методика експериментального дослідження оптичних, термоактиваційних властивостей та часу

загасання люмінесценції. Коротко описані основні результати апробації методики дослідження термостимульованої деполяризації та провідності.

У *третьому розділі* викладено результати експериментальних досліджень молібдату кальцію та цинку термоактиваційними і оптичними методами та проаналізовано їхню кореляцію з даними інших авторів. Наведені результати дослідження температурної еволюції спектрів люмінесценції в широкому температурному діапазоні. Проаналізовано вплив високотемпературного відпалу кристалів молібдату кальцію в атмосфері потоку кисню на їхні оптико-спектральні та термоактиваційні властивості.

У *четвертому розділі* наведені результати дослідження впливу заміщення вольфраму молібденом на сцинтиляційні та структурні властивості порошкових зразків подвійної системи $(1-x)\text{MgMoO}_4-x\text{MgWO}_4$. Проаналізовано зв'язок структури досліджуваних зразків зі спектрами люмінесценції, досліджених за температури зрідженого гелію. Для вольфрамату магнію, який володіє найвищим серед досліджуваних порошкових зразків світловим виходом, представлено температурну залежність часів загасання.

П'ятий розділ присвячений вивченню впливу концентрації домішки йонів титану, внесеної в кристали сапфіру, на їхні спектри люмінесценції, збудження люмінесценції, абсорбції, термолюмінесцентні та сцинтиляційні властивості.

Результати та висновки дисертації, на нашу думку, є достатньо обґрунтовані. Це пов'язано зі значним обсягом проведених досліджень, а також різносторонністю використаних підходів, які взаємно доповнюють один одного. У формулюванні основних результатів та висновків автор не задовольняється тільки констатацією експериментальних результатів, але долучає певний феноменологічний аналіз і проведення кількісної або ж якісної оцінки. Достовірність результатів дисертації забезпечена використанням сучасних експериментальних і теоретичних підходів, надійної сучасної вимірювальної апаратури, узгодженням даних автора з результатами теоретичних розрахунків та даними відповідних експериментальних вимірювань, проведених в інших наукових лабораторіях. Проведення автором досліджень при температурах, близьких до абсолютного нуля, а також з використанням синхротронного випромінювання є свідченням його високого фахового рівня.

Оцінюючи результати роботи, насамперед відзначимо найголовніші з них, які визначають наукову новизну та практичну значимість:

1. Встановлено співвідношення світлових виходів люмінесценції досліджуваних кристалів молібдату кальцію та цинку і відомого сцинтилятора вольфрамату кальцію під дією рентгенівського збудження за температури 10 К. Продемонстровано, що кристали молібдатів кальцію та цинку є перспективними матеріалом для створення криогенного детектора, оскільки в їхню структуру можна впровадити ізотоп ^{100}Mo , необхідний для реєстрації безнейтринного подвійного бета-розпаду.
2. За даними люмінесцентних досліджень подвійної системи $\text{MgMoO}_4\text{-MgWO}_4$ встановлено, що смуги з максимумами при 520, 590 і 490 нм у спектрах рентгенолюмінесценції відповідають трьом фазам – $\beta\text{-MgMoO}_4$, $\alpha\text{-MgMoO}_4$, і вольфрамату MgWO_4 . Встановлено, що світловий вихід MgWO_4 за кімнатної температури складає $(90\pm 15)\%$ світлового виходу ZnWO_4 .
3. У результаті аналізу отриманих спектрів люмінесценції та збудження люмінесценції кристалів Al_2O_3 , легуваних іонами титану, запропонована модель $\text{Ti}^{4+}\text{-F-}$ центру, згідно з якою зміна інтенсивності смуги люмінесценції при 420 нм та зміни у спектрах збудження зі зміною концентрації домішки йонів титану,

зумовлені випромінювальним розпадом F-центрів, спричиненим захопленням електрона, втраченого йонами Ti^{3+} .

У дисертації представлено й інші результати, але, на нашу думку, вищезазначених достатньо, щоб дати високу оцінку значимості роботи, в якій розв'язано важливу наукову проблему. Отримані автором результати за ступенем наукової новизни, актуальністю, обсягом проведених досліджень, спектром використаних методів, які забезпечують достовірність та відтворюваність даних, переконливо засвідчують високий науковий рівень дисертації. Зазначимо, що отримані у дисертаційній роботі результати, в цілому, мають вагомим практичне значення для розроблення високоефективних детекторів іонізуючого випромінювання для різноманітних прикладних задач. Зокрема встановлено, що високотемпературний відпал кристалів молібдату кальцію в атмосфері кисню може бути використаний для підвищення світлового виходу люмінесценції. Показано, що оксидні кристали молібдатів кальцію, цинку, вольфрамату магнію та кристали сапфіру, леговані титаном, завдяки своїм сцинтиляційним характеристикам можуть бути використані, як чутливий матеріал криогенного фонон-сцинтиляційного детектора для реєстрації слабозв'язаних масивних частинок темної речовини, безнейтринного подвійного бета-розпаду, дослідження радіоактивного розпаду ядер з дуже тривалим часом життя.

Результати роботи можна рекомендувати для використання у відділі фізики лептонів Інституту ядерних досліджень НАН України (м. Київ), відділі тугоплавких сцинтиляційних матеріалів Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України (м. Харків), НТЦ "Харківський фізико-технічний інститут" НАН України, Інституті фізики НАН України (м. Київ), Інституті фізики напівпровідників імені В.С. Лашкарьова НАН України (м. Київ), Інституті електронної фізики НАН України (м. Ужгород), Львівському національному університеті імені Івана Франка, Ужгородському національному університеті, НВП "Карат" (м. Львів).

Дисертаційна робота пройшла хорошу апробацію на вітчизняних і міжнародних наукових конференціях та семінарах. Основні результати дисертації опубліковано в 8 фахових журналах "Journal of Applied Physics", "Journal of Physics: Condensed Matter", "IEEE Transactions on Nuclear Science", "IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record", "Solid State Phenomena", "Журнал фізичних досліджень та 11 матеріалах наукових конференцій.

Робота написана грамотно й оформлена належним чином. Текст дисертації добре проілюстрований графічним матеріалом. Автореферат повністю відповідає змістові дисертації й у лаконічній формі відображає усі основні результати, положення та висновки роботи.

Оцінюючи дисертаційну роботу загалом позитивно, слід відзначити і окремі її недоліки. У зв'язку з цим можна сформулювати такі зауваження:

1. Для визначення рівнів захоплення в кристалах використано метод оцінки енергії активації, зокрема, за даними інтегральної інтенсивності термостимульованої люмінесценції. Сучасна експериментальна техніка (монохроматори з CCD камерами) дозволяє реєструвати спектральні залежності термостимульованої люмінесценції, що дає можливість визначення енергетичних характеристик центрів свічення й отримання додаткової інформації про їх трансформацію у об'єктах в результаті дії зовнішніх факторів (температури, опромінення і т.д.), тому дисертанту варто було б провести дослідження такого плану. Автором було зроблено спробу отримання таких даних з використанням відрізнних і смугових світлофільтрів, однак, на нашу думку, такі експерименти не дають достатньої необхідної інформації. Крім цього, при дослідженнях термостимульованої люмінесценції важливим є дотримання певних

умов, зокрема, врахування втрат інтенсивностей піків термостимульованої люмінесценції за рахунок релаксації та забезпечення лінійності температурного режиму нагрівання об'єктів, а з тексту дисертації (підрозділ 2.3.1 та рис. 2.4) незрозуміло, яким чином це було досягнуто при проведенні експериментів.

2. У роботі досліджувалися сцинтиляційні властивості широкого набору порошкових зразків системи $(1-x)\text{MgMoO}_4-x\text{MgWO}_4$, однак температурну залежність часу загасання сцинтиляції вивчено і проаналізовано тільки для зразків MgWO_4 . На основі проведених досліджень неочевидними є перспективи застосувань інших сполук цього ряду як чутливих матеріалів для криогенних фонон-сцинтиляційних детекторів.

3. У спектрах рентгенолюмінесценції для зразків $\text{MgMoO}_4\text{-MgWO}_4$ автором виявлено характерну вузьку лінію при 640 нм, яку цілком обґрунтовано віднесено до свічення неконтрольованої домішки Pr^{3+} . Водночас, більш коректно було б уникнути появи цієї домішки на стадії вирощування кристала, аніж «вилучати» її прояв на стадії аналізу результатів.

Наведені зауваження, однак, не ставлять під сумнів основні результати та висновки дисертаційної роботи, і тому не знижують її загальної високої оцінки.

Дисертаційна робота Цибульського В.С. є завершеним науковим дослідженням, що забезпечує розв'язання наукової проблеми у галузі фізики напівпровідників і діелектриків – пошуку нових ефективних чутливих сцинтиляційних матеріалів для криогенних фонон-сцинтиляційних детекторів.

Враховуючи вищезгадане, вважаю, що дисертаційна робота **“Фото- і термостимульовані процеси в сцинтиляційних матеріалах на основі сапфіру, вольфраматів і молібдатів”** за актуальністю, обсягом виконаних досліджень, науковим рівнем, новизною та практичним значенням, а також публікацією і апробацією основних результатів цілком задовольняє вимогам затвердженими атестаційною колегією ДАК ВК МОН України, а її автор, Цибульський Володимир Степанович, заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків.

Офіційний опонент,
доктор фіз.-мат. наук, ст. наук. співробітник,
завідувач відділу матеріалів функціональної
електроніки Інституту електронної фізики
НАН України



О.В. Гомоннай

Підпис Олександра Васильовича Гомонная засвідчую:

Вчений секретар Інституту електронної фізики
НАН України, кандидат фіз.-мат. наук,
ст. наук. співробітник

31 жовтня 2016 р.




З.З. Торич