

**ВІДГУК
офіційного опонента**

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

Актуальність цієї дисертаційної роботи пов’язана з пошуком нових та оптимізацією властивостей уже існуючих кріогенних сцинтиляційних матеріалів. На їхній основі можна створити детектори для експериментального дослідження рідкісних подій, таких як взаємодія з небаріонною “темною речовиною”, подвійного бета-розділу ядер тощо. Такого роду низькотемпературні дослідження, вважають ефективними для визначення маси та характеристик нейтрино, з’ясування їхньої природи (частинка Дірака чи Майорана), перевірки закону збереження лептонного заряду та деяких інших ефектів, що знаходяться за рамками стандартної моделі елементарних частинок. Надзвичайно важливим у таких експериментах є те, що завдяки одночасній реєстрації фононів і сцинтиляцій, які виникають в досліджуваному матеріалі при зіткненні з частинками або з квантами високих енергій, є можливість ідентифікувати вид взаємодії частинки і відкинути випадкові події, спричинені радіаційним фоном. Реєстрація фононного сигналу досягається за рахунок охолодження досліджуваного матеріалу до температури, близької до абсолютноного нуля (кілька десятків міліkelвінів).

Традиційні сцинтиляційні матеріали на основі кристалів NaI:Tl, CsI:Tl, CsI:Na, Bi₄Ge₃O₁₂, YAlO₃:Ce та інші, непридатні для таких досліджень, оскільки за своєю природою мають неприйнятний рівень власної радіоактивності. Крім цього, світловий вихід люмінесценції активованих кристалів часто зменшується з пониженням температури, що також є вагомим недоліком. Тому пошук, визначення параметрів і оптимізація властивостей перспективних сцинтиляційних матеріалів для кріогенних детекторів є надзвичайно важливим завданням для реалізації масштабних експериментів з реєстрації рідкісних подій.

Дисертаційна робота В.С. Цибульського присвячена дослідженю температурних залежностей оптико-спектральних властивостей та природи дефектів структури з використанням методів люмінесценції, абсорбційної та термоактиваційної спектроскопії сцинтиляційних матеріалів – молібдатів кальцію і цинку; подвійної системи (1-x)MgMoO₄-xMgWO₄ та кристалів сапфіру з різною концентрацією легуючої домішки іонів титану.

Кристали молібдатів привертають особливу увагу з огляду на їхнє використання у кріогенних сцинтиляційних детекторах для реєстрації безнейтринного подвійного бета розпаду. Передбачають, що саме ізотоп ¹⁰⁰Mo є найбільш перспективним для виявлення безнейтринного подвійного бета-розділу. Внесення цього ізотопу в структуру сцинтиляційного кристалу забезпечує найвищу ефективність реєстрації зазначеного ефекту. Кристали вольфраматів є привабливим матеріалом для кріогенних детекторів завдяки високому світловому виходу люмінесценції як при кімнатній температурі, так і в околі абсолютноного нуля температури.

Неактивовані кристали сапфіру є хорошим фононним детектором, а кристали сапфіру, леговані титаном, використовують як лазерний матеріал, та характеризуються свіченням у червоній ділянці спектру. У зв'язку з цим обґрунтованим є припущення дисертанта про те, що кристали сапфіру, леговані титаном, також можна використати для експериментального пошуку рідкісних подій. Враховуючи все сказане вище, можна стверджувати, що тема цієї дисертаційної роботи є, без сумніву, **актуальною**.

В дисертаційній роботі використана низка ефективних для досягнення поставленої мети експериментальних методик – дослідження спектрів люмінесценції, збудження люмінесценції, абсорбційних спектрів, термостимульованої люмінесценції, термостимульованих струмів деполяризації і провідності та часу загасання люмінесценції.

Об'єктами дослідження слугували монокристали молібдатів кальцію, цинку, сапфіру з різною концентрацією легуючої домішки іонів титану та порошкові зразки подвійної системи $(1-x)\text{MgMoO}_4 - x\text{MgWO}_4$. Проаналізовано переваги та недоліки досліджуваних об'єктів для використання в кріогенних фонон-сцинтиляційних детекторах.

В результаті проведення цих експериментів отримані результати щодо оптико-спектральних та термоактиваційних властивостей молібдатів кальцію, цинку і сапфіру з різною концентрацією легуючої домішки іонів титану, зв'язку структури та люмінесцентних властивостей подвійної системи $(1-x)\text{MgMoO}_4 - x\text{MgWO}_4$. Також в роботі проведено дослідження впливу високотемпературного відпалу кристалів молібдату кальцію в атмосфері кисню на їхні оптико-спектральні та термоактиваційні властивості.

Вдалий вибір основних об'єктів та застосування сучасних ефективних методів експериментальних досліджень дозволили авторові отримати низку нових важливих наукових результатів, серед яких як найбільш вагомі можна виокремити такі.

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.

2. Встановлено, що світловий вихід MgWO_4 за кімнатної температури складає $(90 \pm 15)\%$ світлового виходу ZnWO_4 . Це передбачає можливість використання вольфрамату магнію як ефективного сцинтиляційного матеріалу.

3. Запропоновано модель Ti^{4+} -F-центру для пояснення механізму випромінювання смуги люмінесценції з максимумом в області 420 нм зі зміною концентрації домішки іонів титану в кристалах сапфіру, що має непересічне значення для подальшого застосування цього матеріалу в сцинтиляційних детекторах.

Наукова новизна результатів полягає в тому, що у дисертаційній роботі вперше досліджено вплив поступового заміщення катіонів молібдену вольфрамом на сцинтиляційні характеристики в системі $(1-x)\text{MgMoO}_4 - x\text{MgWO}_4$.

Виявлено зміну механізму випромінювання смуги люмінесценції кристалів $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}$ з максимумом в області 420 нм зі зміною концентрації домішки іонів титану.

Встановлено співвідношення світлового виходу люмінесценції між досліджуваними кристалами молібдату кальцію та цинку під дією рентгенівського збудження за температури 10 К,

Практичне значення роботи пов'язане з тим, що у ній продемонстровано можливість використання оксидних кристалів молібдатів кальцію і цинку, вольфрамату магнію та кристали сапфіру, леговані титаном, завдяки їхнім сцинтиляційним характеристикам, як чутливого матеріалу кріогенного фонон-сцинтиляційного детектора для реєстрації слабовзаємодіючих масивних частинок темної речовини, безнейтринного подвійного бета-розпаду, дослідження радіоактивного розпаду ядер з дуже тривалим часом життя.

Достовірність отриманих в роботі результатів забезпечується використанням широкого спектру сучасних експериментальних методик, включно з реалізацією експериментів з використанням синхротронного випромінювання та температур близьких до $T=4$ К, а також глибоким порівняльним аналізом отриманих результатів та літературних даних.

Водночас по даній дисертаційній роботі можна зробити деякі **зауваження**.

1. У дисертаційній роботі наводяться лише дані порівняльного аналізу відносного світлового виходу люмінесценції для різних кристалів. Варто було б привести абсолютне значення світлового виходу люмінесценції для кожного з досліджуваних кристалів.

2. Наявні деякі описки граматичного характеру.

Однак наведені зауваження не знижують загальної високої оцінки дисертаційної роботи. Слід відзначити, що її основні результати опубліковані в провідних фахових наукових виданнях, серед яких "Journal of Applied Physics", "Журнал фізичних досліджень", "Journal of Physics: Condensed Matter", "IEEE Transactions on Nuclear Science", "IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record", "Solid State Phenomena", а також доповідалися на численних вітчизняних і міжнародних наукових конференціях. Це дисертаційне дослідження виконувалось у рамках кількох наукових проектів, зокрема держбюджетних тем "Модифікація оптико-спектральних і електрофізичних властивостей наноструктурованих оксидних фосфорів і кристалічних фероїків", "Особливості структури і розмірні ефекти в монокристалічних, тонкоплівкових і наноструктурованих фероїках і оксидних фосфорах", "Багатофункціональні монокристалічні, композитні і наноструктуровані матеріали на основі широкозонних фосфорів і фероїків", а також наукового стажування автора на фізичному факультеті Оксфордського університету (Англія) та в лабораторії Superlumi (Hasylab, Гамбург, Німеччина).

В цілому дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, котре свідчить про високу кваліфікацію автора в галузі фізики напівпровідників і діелектриків. За загальною структурою, оформленням тексту та графічного матеріалу, мовою дисертаційна робота відповідає формальним вимогам ДАК ВК МОН України до кандидатських дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – "фізика напівпровідників і діелектриків".

Вважаю, що дисертаційна робота В.С. Цибульського "Фото- і термостимульовані процеси в сцинтиляційних матеріалах на основі сапфіру, вольфраматів і молібдатів" за актуальністю, новизною, науковою і практичною

цінністю, кількістю та рівнем наукових публікацій повністю відповідає вимогам ДАК ВК МОН України, а її автор заслуговує на присвоєння наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізики напівпровідників і діелектриків.

Офіційний опонент

д-р. фіз.-мат. наук, професор,
завідувач кафедри фізики та інженерної
механіки Львівського національного
агарного університету

С.В. Мягкота

Підпис Степана Васильовича Мягкоти засвідчує:

Головний вчений секретар Львівського
національного аграрного університету

С. А. Різель

