ВІДГУК
офіційного опонента
на дисертаційну роботу Рудика Юрія Васильовича
"Оптико-спектральні, електричні та теплопровідні властивості наноструктурованих матеріалів для функціональної електроніки на основі оксиду цинку", представлену до захисту на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.10 – фізика напівпровідників та діелектриків

У зв'язку з неперервним розширенням кола об'єктів для застосування в приладах опто-, мікро- та наноелектроніки необхідним стає пошук нових матеріалів, параметри яких оптимально відповідали б своєму призначенню. Для розв'язку таких завдань необхідні детальні дослідження фізичних властивостей перспективних матеріалів, у тому числі й розвиток нових та вдосконалення відомих технологій їх отримання. Це стосується також і оксиду цинку (ZnO), який у наноструктурованому стані може бути перспективним для створення УФ-випромінювачів світла, спін-функціональних приладів та газових сенсорів. Потрібно відзначити, що для деяких з перелічених напрямів застосування стабільність, висока відтворюваність, дешевизна методів отримання та *p*-тип провідності оксиду цинку є визначальними умовами. Тому дисертаційна робота Ю.В. Рудика, яка присвячена вивченню оптико-спектральних, теплопровідних, електрофізичних і абсорбційних властивостей наноструктурованих матеріалів на основі ZnO, дослідженню особливостей їхньої структури. морфології поверхні, процесів рекомбінації і передачі енергії, розмірних ефектів, що безпосередньо впливають на характеристики робочих елементів приладів функціональної електроніки і нелінійної оптики, створених на їхній основі, є без сумніву актуальною.

Підтвердженням актуальності є також те, що дисертаційна робота виконувалась в рамках відомчих науково-дослідних робіт Науково-технічного і навчального центру низькотемпературних досліджень та фізичного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка.

Для вирішення поставленої мети у дисертаційній роботі розв'язувались такі задачі: модифікація існуючих технологій отримання наноструктурованих систем на основі оксиду цинку; встановлення оптимальних умов для вирощування тонких плівок оксиду цинку з оптимальними властивостями; вивчення морфології поверхні досліджуваних об'єктів методами растрової електронної мікроскопії; дослідження природи і найважливіших параметрів фото- та електролюмінесценції, впливу вакуумування на спектр фотолюмінесценції; дослідження ультрафіолетової лазерної емісії; вивчення природи і параметрів теплопровідності в мікро- і нанокомпозитах на основі оксиду цинку; створення прототипів світловипромінювальних та сенсорних пристроїв на основі наностуктурованого ZnO.

Дисертація містить вступ, шість розділів, висновки, список використаних джерел.

У першому розділі приведено відомості про структуру, фізичні властивості та технології отримання об'єктів дослідження, а також проаналізовано характеристики прототипів оптоелектронних та сенсорних пристроїв, створених на основі наноструктур оксиду цинку.

Другий розділ присвячено опису методів отримання об'єктів та методикам експериментальних досліджень структурних, поверхневих, оптико-спектральних, електрофізичних властивостей.

У третьому розділі наведено методику досліджень теплопровідності матеріалів, описано відомі механізми теплопровідності в напівпровідниках та нанокомпозитах, представлено результати дослідження теплопровідності мікро- і нанокомпозитів на основі оксиду цинку. Проаналізовано спектри поглинання та коефіцієнти теплопровідності досліджуваних матеріалів і на основі отриманих даних зроблено висновки про механізми теплопровідності.

У четвертому розділі дисертації представлено результати дослідження оптико-спектральних характеристик тонких плівок і наноструктур на основі оксиду цинку, проінтерпретовано спектри ультрафіолетового та видимого свічення наноструктур. Досліджено вплив вакуумування на фотолюмінесценцію і загасання фотовідгуку нанодротів та наностержнів ZnO.

П'ятий розділ містить опис принципу роботи та результатів дослідження характеристик створених у рамках роботи прототипів світловипромінювальних пристроїв. Представлено технологію створення світлодіодів, що випромінюють у видимій області спектру. Крім цього продемонстровано, яким чином реалізоване явище екситонної лазерної генерації на цілеспрямовано створених масивах мікропризм та нанодротів ZnO.

У шостому розділі приведено дані стосовно використання наноструктур ZnO в якості робочих елементів резистивних сенсорів. Крім цього представлено результати дослідження абсорбційних властивостей мікро- і наноструктур оксиду цинку та перспектив їхнього застосування як супергідрофобних матеріалів.

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 й 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. Освоєння автором складних технологій отримання наноструктурованих матеріалів на основі оксиду цинку, проведення ним досліджень при низьких температурах, а також візуалізація елементів наноструктур з використанням растрового електронного мікроскопа є свідченням його високого фахового рівня.

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

1. На основі невпорядкованих наноструктур оксиду цинку, отриманих шляхом електроосадження з водного розчину, створено прототип світлодіода з оптимізованими характеристиками на основі гомопереходу, який випромінює біле світло і може бути використаний як самостійне джерело світла.

2. Реалізовано випадкову лазерну генерацію в УФ області в новому типі матеріалів — масиві мікропризм ZnO, вирощених на кремнієвих підкладках з парової фази.

3. Досліджено вплив змін морфології поверхні при бомбардування іонами аргону або контрольованому ультрафіолетовому опроміненні на перехід від супергідрофобного до супергідрофільного стану у мікроструктурах ZnO.

У дисертації представлено й інші результати, але, на нашу думку, вищезазначених достатньо, щоб дати високу оцінку значимості роботи, в якій розв'язано важливі наукові задачі. 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.

Практична цінність дисертаційної роботи не викликає сумнівів, оскільки отримано цілий ряд важливих результатів та оформлено патент у відповідності до законодавства України. Запропоновано технології отримання наноструктур оксиду цинку із заданими розмірами і формою елементів (нанодроти, мікропризми) з досить хорошою відтворюваністю. Синтезовано наноструктури ZnO з *p*-типом провідності для застосування в резистивних сенсорах аміаку. Зауважимо, що перевагами розроблених газових сенсорів на основі наноструктур ZnO, порівняно з детекторами на основі нанопорошку ZnO, є технологічність, стійкість і міцність, а також можливість визначення достатньо низьких концентрації газу. Розроблено прототипи світлодіодів на основі наноструктур оксиду цинку без явного напряму орієнтування. Результати досліджень автора підтверджують наявність у зразків гомопереходу, що є свідченням значного прогресу в створенні не тільки матеріалу на основі ZnO з *p*-типом провідності, але й реальних пристроїв на його основі. Такий результат лежить в основі істотного збільшення коефіцієнта корисної дії світлодіодів без зміни величини робочих напруг. Отримані дисертантом дані підтверджують, що екситонна емісія може бути використана для реалізації ефективної лазерної генерації в ZnO внаслідок вищої енергії зв'язку екситона у порівнянні з іншими широкозонними напівпровідниками.

Результати роботи можна рекомендувати для використання в Інституті фізики НАН України (м. Київ) НАН України, НТК "Інститут монокристалів" НАН України (м. Харків), Інституті фізики напівпровідників імені В.Є. 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), Чернівецькому національному університеті ім. Ю.Федьковича.

Дисертаційна робота пройшла достатню апробацію на вітчизняних і міжнародних наукових конференціях та семінарах. Основні результати дисертації опубліковано у 6 фахових журналах: "Optical Materials" (1 стаття), "Physica Status Solidi" (1 стаття), "Physical Surface Engineering" (1 стаття), "Journal of Nano- and Electronic Physics" (1 стаття), "Journal of Surface Physics and Engineering" (2 статті), одному патенті та 8 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 й окремі її недоліки. У зв'язку з цим можна сформулювати такі зауваження:

1. У третьому розділі дисертаційної роботи представлено дані щодо теплопровідних властивостей композитних матеріалів на основі оксиду цинку. У таблиці 3.1 приведено значення коефіцієнтів теплопровідності для трьох композитів з різними розмірами зерен порошку оксиду цинку (50-60 мкм, 1.1 мкм та 3 нм, перші два з яких є промисловими) і зроблено висновок (п.1 висновків до розділу 3), що на основі проведених досліджень "виявлено квантовий розмірний ефект в таких композитах, який полягає у збільшенні величини коефіцієнта теплопровідності термопасти при переході від мікропорошків до нанопорошків". Однак, на нашу думку, такий висновок автору слід було обгрунтувати базуючись на більш численних експериментальних данних. Варто було б провести дослідження для більшої кількості експериментальних зразків композитів з різним середнім розміром нанокристалів ZnO й отримати належну статистику. Також бажано було б підтвердити оцінку середнього розміру отриманих методами "мокрої хімії" нанокристалів ZnO прямими методами та вказати на форму нанокристалів і навести розподіл нанокристалів за розмірами, а не тільки оцінювати середній розмір нанооб'єктів за даними спектру поглинання, як висловлюється автор, "шару нанокомпозита товщиною, меншою за 1 мкм" при кімнатній температурі і співвідношення (3.4).

На нашу думку, не варто було автору виділяти результати по теплопровідності у окремий розділ, тим більше, що у цьому розділі у трьох підрозділах описано отримання наноструктур оксиду цинку для створення термопасти, методику вимірювання теплопровідності і відомі механізми теплопровідності у напівпровідниках і лише півтора сторінок з дев'яти цього розділу присвячено отриманим результатам і їх обговоренню.

2. Для реалізації процесу перемикання з гідрофобного у гідрофільний стан наноструктурованих систем на основі оксиду цинку у роботі цілком обгрунтовано запропоновано використовувати іонне травлення поверхні зразків ZnO. Водночас, варто було б детальніше пояснити, чому для травлення використано саме іони аргону.

3. У рамках виконання дисертаційної роботи створено прототип світлодіода на основі гомопереходу в оксиді цинку з доволі привабливими характеристиками. Водночас, занадто мало уваги приділено аналізу стабільності роботи такого пристрою, а також відтворюваності результатів дослідження його найважливіших параметрів. Тут також треба відзначити, що з тексту дисертації (стр. 89, абзац 2 і 3) не зрозуміло, ким було отримано наноструктури ZnO з *p*-типом провідності шляхом електроосадження з водного розчину.

4. Деякі дефекти є й в оформленні дисертації та в авторефераті. У дисертації варто було зменшити кількість розділів, враховуючи зауваження, сформульоване у пункті 1 відгуку. На деяких рисунках не вказано одиниці величин, наприклад рис. 3.2, є помилки у підписах на осях (рис. 4.4). Перелік основних праць, опублікованих автором за темою

дисертації, як у її тексті, так і в авторефераті, доцільно було б подати в хронологічному порядку.

Наведені зауваження, однак, не ставлять під сумнів основні результати та висновки дисертаційної роботи, і тому не знижують її загальної високої оцінки. Дисертаційна робота Рудика Ю. В. є завершеним науковим дослідженням, що забезпечує розв'язання наукової задачі у галузі фізики напівпровідників і діелектриків – пошуку нових багатофункціональних матеріалів на основі наноструктурованого оксиду цинку для оптоелектронних та сенсорних пристроїв.

Враховуючи вищезгадане, вважаю, що дисертаційна робота "Оптико-спектральні, електричні та теплопровідні властивості наноструктурованих матеріалів для функціональної електроніки на основі оксиду цинку" за актуальністю, обсягом виконаних досліджень, науковим рівнем, новизною та практичним значенням, а також кількістю публікацій і апробацією основних результатів цілком задовольняє вимогам, затвердженим атестаційною колегією ДАК ВК МОН України, а її автор, Рудик Юрій Васильович, безумовно заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків.

Офіційний опонент,
завідувач відділу матеріалів функціональної електроніки Інституту електронної фізики НАН України, доктор фіз.-мат. наук О.В. Гомоннай

Підпис Олександра Васильовича Гомонная засвідчую:

Вчений секретар Інституту електронної фізики НАН України, кандидат хім. наук Л.Г.Романова

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ * ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОННОЇ ФІЗИКИ * Код № 05540008 * м. Ужгород