ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію

Оленича Ігоря Богдановича

«Нерівноважні електронні процеси у наносистемах на основі кремнію»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків

Потреба вдосконалення матеріальних основ електронної техніки зумовлює інтенсивні дослідження напівпровідникових матеріалів у нанометровому масштабі. Це дає змогу не тільки підвищити швидкодію та ступінь інтеграції надмініатюрних систем обробки інформації, але й виявити нові фізичні явища або ефекти у базових матеріалах мікроелектроніки. Зокрема, актуальними є дослідження системи кремнієвих нанокристалів, які мають принципово нові властивості, зумовлені ефектом квантового обмеження та значним відношенням площі поверхні до об'єму.

З'ясування механізмів перенесення та релаксації заряду у неорганічних та органічно-неорганічних наносистемах на основі кремнію з урахуванням впливу електромагнітного випромінювання, іонізуючої радіації, температури та адсорбції газів є важливою науковою проблемою фізики напівпровідників і діелектриків, розв'язання якої розширює перспективу застосування наноматеріалів у різних галузях мікро- та наноелектроніки. Тому комплексне дослідження структурних, електричних, оптико-люмінесцентних і сенсорних характеристик кремнієвих наносистем та визначення механізмів нерівноважних електронних процесів у таких матеріалах є **актуальним** як з фундаментальної, так і практичної точок зору.

Дисертація Оленича І. Б. присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми дослідження фото-, термо- та адсорбційно-стимульованих електронних процесів у наносистемах на основі кремнію.

Дисертаційна робота пов'язана з науковими дослідженнями на кафедрі радіоелектронних і комп'ютерних систем Львівського національного університету імені Івана Франка і виконувалася у рамках держбюджетних НДР МОН України.

Основні наукові результати та їх новизну, наведені у дисертації, можна звести до наступного:

- дослідження фізико-хімічних і технологічних умов формування у середовищах різної природи, структурних особливостей, атомарного та молекулярного складу, фрактальних властивостей кремнієвих наносистем;

- вивчення оптичних та люмінесцентних властивостей систем на основі кремнієвих наноструктур та дослідження впливу компонентів на люмінесцентні, електричні, фотоелектричні та сенсорні властивості наносистем;

- з'ясування механізмів провідності в умовах адсорбції, перенесення носіїв заряду та вивчення можливостей ефективного керування функціональними властивостями кремнієвих наноструктур;

- розвиток фізичних моделей нерівноважних електронних процесів у системах на основі наноструктур кремнію;

- розробка ефективних методів створення кремнієвих наносистем та їх апробація у макетах сенсорних і оптоелектронних пристроїв, детекторів електромагнітного випромінювання у широкому спектральному діапазоні.

Постановка основних дисертаційних завдань, вдалий вибір об'єктів та методів дослідження дозволили авторові отримати вперше ряд принципово нових важливих конкретних **наукових результатів**, серед яких особливо варто відзначити наступні:

1. Розвинуто фізичні основи формування неорганічних і органічно-неорганічних наносистем на основі кремнію з прогнозованими структурними характеристиками і функціональними властивостями, виявлено вплив β- та γ-випромінювання на електронні процеси у цих наносистемах.

2. Встановлено, що анізотропія форми кремнієвих наноструктур зумовлює анізотропію поляризації видимої смуги ФЛ та ефективного показника заломлення системи орієнтованих нанокристалів ПК у епоксидній матриці, а також продемонстровано можливість керування спектром фотоемісії різними способами.

3. Запропоновано нові фізичні моделі утворення фоточутливих електричних бар'єрів та продемонстровано можливість керування електронними характеристиками кремнієвих наноструктур шляхом адсорбційного легування як з газової, так і рідкої фаз.

4. Встановлено механізми перенесення заряду у неорганічних та органічно-неорганічних наносистемах, та ідентифіковано природу електрично-активних дефектів, визначено енергію їх активації.

Отримані автором результати за ступенем наукової новизни, актуальністю, обсягом проведених досліджень, використаних методів (атомно-силової мікроскопії та скануючої електронної мікроскопії, інфрачервона Фур'є спектроскопія, оптико-люмінесцентні, еліпсометричний, термостимульованої провідності і деполяризації, імпедансна спектроскопія) та застосуванням відомих теоретичних підходів до інтерпретації отриманих експериментальних результатів, які забезпечують **достовірність та**

відтворюваність даних, переконливо засвідчують високий науковий рівень дисертації.

Практичне значення отриманих у дисертації результатів не викликає сумнівів. Зокрема, спосіб адсорбційного легування наноструктур ПК може бути використаний для контрольованої модифікації електричних характеристик напівпровідникових наноматеріалів, виявлена у широкому спектральному діапазоні фоточутливість – для створення багатошарових фотодетекторів електромагнітного випромінювання, а незворотні зміни електричних характеристик під дією β- та γ-випромінювання у пристроях контролю поглинутої дози радіації. Запропоновано новий принцип роботи газоадсорбційних сенсорних елементів. Формування активного електрохромного шару поліаніліну на поверхні відкриває можливість створення оптичних елементів з керованим спектром випромінювання.

Загалом, одержані у дисертаційній роботі результати поглиблюють наукову основу для створення функціональних пристроїв нового покоління. Новизна практичних розробок захищена 5 патентами України.

Автор вдало спланував структуру дисертаційної роботи, яка **складається** зі вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел і двох додатків. Загальний об’єм роботи становить 339 сторінок тексту, в тому числі 146 рисунків та 10 таблиць. Бібліографія нараховує 330 посилань.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, показано її зв’язок з науковими програмами, сформульовано мету та основні завдання роботи, визначено об’єкт і предмет дослідження, висвітлено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, визначено особистий внесок здобувача в процесі виконання роботи, відзначено кількість публікацій за матеріалами дисертації, наведені апробація результатів, структура та обсяг роботи.

Перший розділ присвячений огляду літератури за темою дисертації та аналізу електронних процесів у кремнієвих наноструктурах.

У **другому розділі** представлені методи отримання кремнієвих наноструктур, які базуються на концепціях виготовлення нанооб’єктів «знизу – вверх» і «зверху – вниз», а також наносистем на їх основі.

У **третьому розділі** представлено результати досліджень електронних процесів у наносистемах nc-Si – діелектрик.

Четвертий розділ присвячений дослідженню адсорбоелектричних ефектів у неквантово-розмірних наноструктурах ПК. Вивчено особливості ефекту поля у поруватих напівпровідниках з циліндричною формою пор.

У **п’ятому розділі** представлено результати досліджень електричних і фотоелектричних властивостей неорганічних наносистем на основі ПК.

Вивчено вплив модифікації поруватого шару наночастинками металів з різною роботою виходу на ВАХ структур ПК, а також їх спектральні, часові і температурні залежності фотовідклику.

Шостий розділ присвячений експериментальним дослідженням електронних процесів в органічно-неорганічних наносистемах на основі ПК.

У **сьомому розділі** представлено результати апробації наносистем на основі кремнію у сенсорних та оптоелектронних пристроях.

Дисертація за структурою і викладом відповідає вимогам ДАК МОН України.

Водночас слід звернути увагу на те, що дисертаційна робота не позбавлена й окремих **недоліків**, а саме:

1. Створення або модифікація наноматеріалів чи наносистем здійснювалося з використанням пластини кремнію електронного та діркового типів провідності, леговані фосфором і бором з питомим опором 4,5 і 10 Ом·см, відповідно. Чим зумовлений відбір саме цих матеріалів і за якими характеристиками (властивостями)?

2. Вимірювання інжекційних струмів може бути ефективним інструментом для дослідження локалізованих станів у діелектриках. Чи здійснювався аналіз ВАХ високоомних шарів поруватого кремнію в рамках теорії струму, обмеженого об’ємним зарядом?

3. Для вимірювання ІЧ спектрів пропускання плівок полімеру PEDOT:PSS і композитів на його основі, які містять нанокристали поруватого кремнію, автор використовував кремнієву підкладку. Проте для аналізу ІЧ спектрів композитних плівок доцільно використовувати інший тип підкладок (наприклад, KBr), що дозволить розділити у смугах поглинання внесок кремнієвих нанокристалів і підкладки.

4. Температура підкладки під час формування плівки SiO_x може суттєво впливати на агрегацію молекул. Чи вивчався вплив температури підкладки на структуру утвореної плівки? Зокрема, у випадку пористої структури плівки необхідно обрати відповідну модель ефективного середовища при визначені надлишкового вмісту кремнію.

5. При аналізі оптичних властивостей системи кремнієвих нанокристалів у рамках моделі ефективного середовища не враховано ступінь окислення поруватого кремнію і, як наслідок, наявність додаткової компоненти середовища – оксиду кремнію.

6. У дисертації мають місце окремі неточності. Зокрема, на сторінках 91, 93, 116 кристалічні масиви $[N(CH_3)_4]_2MeCl_4$ (Me = Mn, Zn, Cu) згадуються як сегнетоелектрики, хоча не всі кристали з неспівмірною фазою володіють сегнетоелектричними властивостями.

7. Цікавим могло б бути узагальнення автором у вигляді єдиної таблиці значень параметрів отриманих і досліджуваних матеріалів з існуючими аналогами.

Однак ці зауваження не ставлять під сумнів отримані основні наукові та практичні результати, висновки дисертаційної роботи і не знижують її загальну високу оцінку, а можуть бути рекомендаціями для майбутніх досліджень автора.

Основні положення дисертації доповідались на міжнародних та регіональних наукових конференціях та семінарах. Загалом, результати дисертації висвітлено у 73 наукових працях, серед яких 28 статей у виданнях, які індексуються міжнародними наукометричними базами даних Web of Science та/або Scopus, 6 статей у фахових наукових виданнях України.

В цілому, дисертаційна робота Оленича І. Б. є завершеним науковим дослідженням, присвяченим науково-прикладним проблемам фізики напівпровідників і діелектриків, яке включає комплексне теоретичне й експериментальне вивчення та встановлення закономірностей фото-, термо- та адсорбційно-стимульованих електронних процесів у наносистемах на основі кремнію, що розширює функціональні властивості наноматеріалів і перспективу їх застосування у сенсориці та оптоелектроніці.

Автореферат повністю відображає зміст дисертаційної роботи і розкриває основні її положення. Дисертація написана на належному науковому рівні, оформлена відповідно до вимог, зрозуміло викладена.

Дисертація «Нерівноважні електронні процеси у наносистемах на основі кремнію» як за обсягом проведених експериментальних досліджень, а також рівнем теоретичної інтерпретації результатів відповідає вимогам ДАК МОН України щодо дисертаційних робіт, представлених на здобуття наукового ступеня доктора наук, затвердженим Постановою Кабінету Міністрів України від № 567 від 24 липня 2013 року, а її автор, Оленич Ігор Богданович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків.

Офіційний опонент:
професор, завідувач кафедри експериментальної фізики
та інформаційно-вимірювальних технологій
Східноєвропейського національного університету
імені Лесі Українки,
доктор фізико-математичних наук, доцент С. А. Федосов

Підпис Федосова С.А.
ЗАСВІДЧУЮ
Вчений секретар університету Сеньченко Л. С.
«31» 08 2020 р.