ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Оленича Ігоря Богдановича**

"Нерівноважні електронні процеси у наносистемах на основі кремнію",

представлену на здобуття наукового ступеня

доктора фізико-математичних наук за спеціальністю

01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків.

Актуальність. Бурхливий розвиток наноелектроніки, який спостерігається упродовж останніх років, пов'язаний з реалізацією та практичним застосуванням квантово-механічних явищ у спеціально створених фізичних об'єктах. До таких об'єктів належать різного типу квантово-розмірні структури такі як надгратки, тонкошарові гетеропереходи, нанотрубки, фулерени, а також напівпровідникові поруваті наносистеми, серед яких домінуюче місце займає низькорозмірний поруватий кремній та гібридні структури на його основі. Завдяки досить простій та добре відтворювальній технології електрохімічного травлення можна отримувати поруватий кремній з різними структурними характеристиками та створювати на його основі різноманітні електронні пристрої, зокрема газові сенсори. Для цілеспрямованого покращення характеристик приладів, розроблених на базі поруватого кремнію, необхідне глибоке розуміння фізичних процесів, які відбуваються в цьому матеріалі та композитних структурах на його основі. Тому дисертаційна робота Оленича І.Б., яка присвячена дослідженню нерівноважних фото-, термо- та адсорбційно-стимульованих електронних процесів у наносистемах на основі поруватого кремнію, є безумовно актуальною як з точки зору фундаментальних аспектів фізики нанорозмірних структур, так і приладних застосувань цього матеріалу.

Дисертаційна робота Оленича І.Б. виконувалась у Львівському національному університеті імені Івана Франка в рамках низки держбюджетних науково-дослідних робіт, що також підтверджує актуальність теми дисертаційного дослідження.

Структура та зміст дисертації. Робота містить вступ, 7 розділів, висновки, список використаних джерел, 2 додатки і викладена на 339 сторінках тексту. У вступі зазначено мету та задачі досліджень, обґрунтовано їх актуальність, представлено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відзначено особистий внесок здобувача та апробацію результатів досліджень.

У першому розділі розглянуто фундаментальні явища у квантово-розмірних структурах, які визначають унікальні оптико-люмінесцентні властивості кремнієвих нанокристалів. Відзначено важливу роль поверхневих станів в електронних процесах у наноструктурах кремнію з органічною та неорганічною оболонками різної природи. Детально проаналізовано електричні та фотоелектричні властивості системи кремнієвих нанокристалів.

У другому розділі описано методи одержання кремнієвих наноструктур, а також неорганічних та органічно-неорганічних наносистем на їх основі. Досліджено структурні характеристики кремнієвих наносистем, їх фрактальні властивості. Досліджено та проаналізовано ІЧ спектри пропускання отриманих наноматеріалів.

Третій розділ висвітлює результати досліджень електронних процесів у наносистемах кремній – діелектрик. Вивчено вплив опромінення ізотопом радію, а також орієнтації кремнієвих нанокристалів на оптико-люмінесцентні властивості наносистем. Досліджено процеси перенесення та релаксації заряду, поляризаційні властивості таких матеріалів.

Четвертий розділ присвячений дослідженню адсорбційно-стимульованих явищ у поруватому кремнії. Вивчено особливості ефекту поля у напівпровідниках з циліндричною формою пор. Теоретично та експериментально продемонстровано, що зумовлений адсорбоелектричним ефектом перерозподіл носіїв заряду може спричинити інверсію типу провідності поруватого шару і, як наслідок, утворення фоточутливих електричних бар'єрів у структурах на основі поруватого кремнію.

П'ятий розділ присвячений вивченню електронних процесів у фотовольтаїчних структурах на основі поруватого кремнію. Встановлено, що

модифікація поруватого шару нанокластерами металів Ag, Co, Ni, Pd і графеновими частинками зумовлює збільшення електропровідності та фотоерс внаслідок утворення додаткових шляхів виведення фотогенерованих носіїв заряду з поруватого кремнію. Встановлені механізми провідності фрактальних структур на основі поруватого кремнію у діапазоні 12–300 К. Виявлено розширення спектра фоточутливості багатошарових структур поруватий кремній – ZnO у діапазоні 400–1100 нм.

У шостому розділі дисертаційної роботи представлено результати дослідження нерівноважних електронних процесів в органічно-неорганічних гібридних структурах і композитних плівках на основі поруватого кремнію. Вивчено фотовольтаїчний та електрохромний ефекти у сандвіч-структурах поруватий кремній – електропровідний полімер. Встановлено механізми перенесення та релаксації носіїв заряду у нанокомпозитних плівках.

У сьомому розділі викладено результати апробації досліджуваних наноматеріалів у пристроях сенсорної та оптоелектроніки. Зокрема, досліджено можливість застосування гібридних структур на основі поруватого кремнію для створення джерел видимого світла з керованою смугою фотолюмінесценції. Крім того, переконливо продемонстровано перспективність використання кремнієвих наносистем як чутливих елементів газоадсорбційних сенсорів чи багатоелементних систем аналізу газів. Виявлено незворотну зміну електричних характеристик композитних плівок на основі поруватого кремнію під впливом бета- та гамма випромінювання, що може бути підґрунтям створення недорогих дозиметричних пристроїв.

До найбільш вагомих результатів, що мають **наукову новизну** слід віднести:

- встановлено закономірності формування кремнієвих наносистем різного складу з прогнозованими структурними, фрактальними та функціональними властивостями;

- встановлено механізми впливу бета- та гамма опромінення на процеси формування кремнієвих нанокристалів у плівці SiO_x і фотолюмінесцентні та електричні властивості наносистем на основі поруватого кремнію;

- розроблено модель утворення фоточутливих електричних бар'єрів у структурах поруватого кремнію, зумовлених адсорбоелектричними явищами і, як наслідок, інверсією типу провідності поруватого шару;

- встановлено механізми перенесення заряду у фрактальних структурах на основі поруватого кремнію в температурному діапазоні 12–300 К;

- вивчено вплив найближчого оточення на енергетичний розподіл густини заповнення локалізованих станів, які беруть участь у процесах перенесення та релаксації носіїв заряду у кремнієвих наноструктурах;

- проаналізовано поляризаційні властивості гібридних структур на основі поруватого кремнію і кристалічних масивів $[N(CH_3)_4]_2MeCl_4$ (Me = Zn, Cu).

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає у тому, що:

- запропоновано методологію визначення ступеня поруватості матеріалів, яка ґрунтується на фрактальному аналізі їх мікроскопічних зображень;

- запропоновано спосіб контрольованої модифікації електронних характеристик кремнієвих наноструктур шляхом адсорбційного легування та новий принцип роботи газоадсорбційних фотовольтаїчних сенсорів;

- показано, що сукупний відклик адсорбуючих сенсорних елементів може бути використаний для створення газоаналізаторів;

- продемонстровано можливість керування спектром фотоемісії електрохромних структур на основі поруватого кремнію.

Для досягнення поставленої мети здобувач використав сучасні апробовані експериментальні методи досліджень, які в сукупності з аналізом одержаних результатів у рамках надійних феноменологічних теорій і сучасних уявлень фізики напівпровідників і діелектриків забезпечують **достовірність результатів та обґрунтованість наукових положень і висновків**.

Результати дисертаційної роботи достатньою мірою апробовані на наукових конференціях і відображені у провідних фахових виданнях, серед яких 28 статей у

періодичних виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних Web of Science та Scopus. Практичні результати роботи захищено 5 патентами України. Отримані автором результати переконливо засвідчують високий науковий рівень дисертації.

Водночас до дисертаційної роботи є наступні **зауваження**:

1. Для оцінки ступеня поруватості шляхом визначення фрактальної розмірності поруватого кремнію дисертант опирався на кореляцію фрактальної розмірності та поруватості металевих порошків, що, на мою думку, не зовсім коректно. Було б доцільно порівняти розраховані значення для низки зразків з результатами, отриманими іншими методами порометрії.

2. При дослідженні впливу радіаційного випромінювання на процеси перенесення та релаксації заряду у кремнієвих наноматеріалах у дисертації не зазначено важливу з практичного погляду характеристику - дозу поглинутої радіації. Крім того, радіаційне опромінення, як правило, зумовлює збільшення електричного опору спряжених полімерів внаслідок розриву полімерного ланцюга (див. наприклад, Karbovnyk I. et al. Nanoscale Research Letters, 2016, 11, 84). Рис. 7.31 демонструє зменшення опору нанокомпозиту PEDOT:PSS - ПК, проте дисертант не наводить переконливих аргументів щодо механізмів виявлених змін.

3. У випадку легування поруватого шару металами важливий вплив на електричні характеристики матеріалу можуть викликати перколяційні явища. Проте автор не врахував їх при аналізі електричних та фотоелектричних властивостей структур поруватого кремнію, модифікованого нанокластерами металів.

4. Під час моделювання ефекту поля у поруватих напівпровідниках виявлено мінімум провідності у випадку, коли інверсія типу провідності охоплює весь поруватий шар. Було б цікаво дізнатися, чи спостерігалася експериментально інверсія типу провідності наноструктур поруватого кремнію та граничні значення електропровідності, зумовлені адсорбоелектричним ефектом?

5. При аналізі фотолюмінесцентних властивостей поруватого кремнію, на мій погляд, було б доцільно більш детально описати механізми видимої фотоемісії, зокрема, у випадку збудження поляризованим світлом.

6. У сьомому розділі автор розглядає можливість застосування наносистем на основі поруватого кремнію для створення сенсорних пристроїв. На мою думку, варто було б більш детально подати технічні параметри отриманих сенсорів та їх переваги над існуючими аналогами.

Зазначені зауваження, однак, не мають принципового характеру і не впливають суттєво на основні результати і висновки дисертації та загальний достатньо високій її науковий рівень. Результати досліджень викладені чітко і послідовно, робота оформлена відповідно до існуючих вимог. **Автореферат** адекватно **відображає наукові результати і положення** дисертації.

Дисертація Оленича І.Б. "Нерівноважні електронні процеси у наносистемах на основі кремнію" є завершеною науковою працею, результати якої мають наукову новизну і практичну цінність та розв'язують актуальну науково-технічну проблему встановлення закономірностей фото-, термо- та адсорбційно-стимульованих електронних процесів у наноматеріалах на основі кремнію. Вважаю, що дисертаційна робота у повній мірі **відповідає** вимогам пп. 9, 10, 12 та 13 "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. №567, а її автор – Оленич Ігор Богданович, **заслуговує** присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків.

Директор Міжвідомчого науково-навчального
фізико-технічного центру МОН і НАН України
при Одеському національному університеті
імені І.І. Мечникова
доктор фізико-математичних наук, професор Лепіх Я.І.

Підпис офіційного опонента проф. Лепіха Я.І. засвідчую

Вчений секретар, к.х.н., доц. Курандо С.В.

7.09.20