ВІДГУК
офіційного опонента

на дисертацію Івана Дмитровича Карбовника
“Механізми формування нанофаз та електронні процеси в шаруватих кристалічних і гібридних функціональних матеріалах”,

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

Актуальність теми дисертації.

Одним із перспективних напрямків розвитку сучасної електроніки є синтез наноструктур із керованими властивостями за, так званою, технологією «знизу – вгору». При формуванні нанорозмірних кластерів з атомів та їхній подальшій агрегації залишається багато невирішених проблем щодо розуміння закономірностей їх утворення і зв’язку структури із функціональними характеристиками. Зокрема, істотний вплив на властивості матеріалів та електронні процеси, які у них відбуваються, мають кількість, розмір і розподіл нанокластерів, які формуються в об’ємі чи на поверхні, а також вплив особливостей синтезу на процеси наноструктурування. Вирішенню певних сторін цієї, без сумніву, актуальної наукової проблеми присвячено дисертаційну роботу І.Д. Карбовника.

Наукова новизна. Серед найбільш вагомих наукових результатів роботи слід зазначити наступні.

- Механізми формування нанорозмірних фаз в кристалах CdI_2 та впливу відхилення від формульного складу та входження домішок на процеси, які визначають властивості цих фаз.
- Моделі формування центрів свічення, пов’язаних із присутністю нестехіометричних атомів кадмію.
- З’ясування можливості управління оптико-люмінесцентними параметрами плівкових наноструктур на основі органічних молекул за допомогою зовнішніх полів та модифікації підкладки.

- Комплексна модель гібридного нанокомпозиту, в якому перенесення заряду між елементами наповнення (вуглецевими нанотрубками) реалізується за рахунок тунельної електронної провідності, та оцінка порогу перколяції і величини загальної провідності мережі нанотрубок у такій системі.
- Зміни латерального електричного опору гібридних нанокомпозитів «PEDOT:PSS – одностінкові/багатостінкові вуглецеві нанотрубки» при зміні температури, частоти вимірювання та під дією радіації.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому та оформлення.

Дисертаційна робота складається із вступу, п’яти розділів, загальних висновків, списку цитованих літературних джерел та додатку.

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертації, сформульовано її мету, завдання, наукову новизну і практичне значення, розкрито особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** висвітлено сучасний стан та перспективи розвитку електроніки, які пов’язані із наноматеріалами та квантово-розмірними ефектами. Проведено системний огляд властивостей нанофаз у плівкових та кристалічних матеріалах. Показано, що взаємодії між окремими шарами у кристалах йодистого кадмію відіграють вагому роль при формувані домішкових центрів, нанокластерів та складніших структур на нано- та мікрорівнях.

Обговорено властивості гібридних матеріалів із нанорозмірними елементами наповнення, такими як нанотрубки чи наностержні. На основі літературних даних показано переваги електропровідних полімерних композитів з додаванням нанодисперсних вуглецевих наповнювачів перед традиційними матеріалами. Окреслено потребу у додаткових дослідженнях таких матеріалів.

У **другому розділі** описано експериментальні методи дослідження механізмів формування нанофаз у гібридних матеріалах та матеріалах із кристалічною структурою. Тут приділено увагу опису особливостей застосування сканувальної електронної мікроскопії, атомно-силової мікроскопії, традиційних методів оптичної спектроскопії та вимірюванням

фотолюмінесценції з лінійною поляризацією збуджуючого та випроміненого світла. Також, тут описано методику спектроскопії позитронної анігіляції і відповідний математичний апарат; описано методику електричних вимірювань наноструктур та алгоритми опрацювання результатів цих вимірювань.

У **третьому розділі** досліджено процеси утворення нанофаз на атомарно-гладких поверхнях та в об'ємі кристалів йодистого кадмію. Оскільки ширина забороненої зони CdI_2 дозволяє отримувати важливу інформацію про кристал оптичними методами, тут проаналізовано як результати досліджень морфології так і дані, отримані унаслідок опрацювання спектрів люмінесценції, які підтверджують запропоновані моделі електронних процесів.

Важливим результатом, також описаним у цьому розділі, є характеризація порожнистих мікротрубок з прямокутним перерізом, одержаних при легуванні шаруватих кристалів йодистого кадмію домішкою вісмуту. Показано, що формування таких структур пов'язане із нестійкістю шарів I-Cd-I з домішкою вісмуту відносно деформації згину.

Четвертий **розділ** присвячений, головним чином, одержанню наноструктурованих шарів за допомогою контрольованого термічно-вакуумного осадження та дослідженню закономірностей лінійно поляризованої люмінесценції у таких гібридних структурах.

Представлено розрахунок рівноважних геометрій складних молекул у найнижчому електронному стані, визначено дипольні моменти та оцінено взаємодію між молекулами при осадженні шарів.

Досліджено формування наноструктурованого люмінесцентного шару у процесі термічного вакуумного осадження полярних молекул під впливом поля та поляризованого лазерного випромінювання. Пояснено природу смуг випромінювання таких шарів, а на основі вимірювання спектрів поляризованої фотолюмінесценції отримано ступені поляризації для різних ділянок плівки.

Досліджено прототипи гібридних структур, у яких люмінесценція підкладки та осаджених шарів поєднується для отримання білого світла.

У **п’ятому розділі** представлено модель нанокомпзитів типу «діелектрик + електропровідні нанотрубки» та результати низки комп’ютерних експериментів, проведених на основі цієї моделі. Комп’ютерне моделювання підкріплене експериментальними дослідженнями певних типів нанокомпозитних структур, а саме встановленням впливу зовнішніх полів та високоенергетичного випромінювання на електричні процеси у цих системах.

Одержані наукові результати є **достовірними,** про що свідчить системність проведених досліджень з використанням сучасної апаратури і комплексне опрацювання одержаних результатів, а також їх відтворюваність.

Результати дисертації достатньою мірою апробовано на провідних фахових міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях, а також відображені у 80-ти наукових працях, серед яких 26 статей у наукових фахових виданнях з імпакт-фактором, у тому числі “Nanoscale Research Letters”, “Applied Nanoscience”, “Journal of Nanophotonics” та інших.

Результати дисертації мають суттєве **практичне значення**, оскільки вони можуть бути використані при розробці інноваційних пристроїв електроніки, таких як джерела світла, світлодіодні структури з поляризованим випромінюванням та екрануючі покриття. Виявлені особливості зміни спектрів фотолюмінесценції кристалів йодистого кадмію під час їхнього старіння слід враховувати під час практичного використання цих сполук, зокрема, у сцинтиляційних застосуваннях. Запропонований механізм електронних процесів, що пояснює зменшення інтенсивності свічення, дає змогу цілеспрямовано керувати параметрами, які зумовлюють чутливість кристалів до такого опромінення.

Розроблені програми для комп’ютерних симуляцій провідності гібридних нанокомпозитів можуть бути корисними при підготовці процедур синтезу таких матеріалів, в чому є зацікавленість різних груп дослідників.

Автореферат дисертації повністю відображає основний зміст дисертації та її основні положення.

Разом з цим, до дисертації можна висловити такі **зауваження**:

1. Аналіз кінетики люмінесценції шаруватих кристалів йодиду кадмію міг бути джерелом цінної інформації щодо впливу нанокластерів на динаміки формування нанофаз. Питання: чи проводився такий аналіз? Якщо так, то якими є його результати?

2. Температура підкладки може суттєво впливати на агрегацію молекул при формуванні плівок термічно-вакуумним методом осадження. Чи досліджувався цей ефект, і, якщо так, то якими є результати такого аналізу?

3. Температура випаровування і час осадження є важливими при формуванні тонких шарів органічних молекул. Виникає запитання, як для різних молекул визначалася порогова температура, при якій починається їх осадження?

4. В моделі провідності композиційної системи із вуглецевими нанотрубками не враховується взаємодія трубок із середовищем. Наскільки суттєвою може бути роль цього фактору для порівняння результатів моделювання із експериментальними даними?

5. Стилістичні та термінологічні хиби. Наприклад, на мою думку, стосовно фотолюмінесценції слід писати «…при зона-зонному збудженні», а не «…при зона-зонному опроміненні»; також, має бути «числове», а не «чисельне моделювання», тощо.

Однак, вказані зауваження не знижують загального високого рівня дисертаційної роботи І.Д. Карбовника.

Вважаю, що дисертаційна робота Івана Дмитровича Карбовника “Механізми формування нанофаз та електронні процеси в шаруватих кристалічних і гібридних функціональних матеріалах” є завершеним науковим дослідженням, у якому вирішено важливу наукову проблема щодо механізмів формування нанофаз у кристалічних шаруватих та гібридних функціональних матеріалах та їх зв’язку із фізичними властивостями і характеристиками таких матеріалів. За обсягом експериментальних даних, кількістю теоретичних узагальнень, фундаментальних і практичних результатів, актуальністю, науковою новизною, ступенем обґрунтованості наукових положень і висновків, повнотою їх викладення в опублікованих працях і ступенем

апробації, дисертаційна робота І.Д. Карбовника відповідає вимогам МОН України щодо докторських дисертацій, а її автор, поза сумнівом, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків.

Офіційний опонент,

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
завідувач науково-дослідної лабораторії
«Спектроскопія конденсованого стану речовини»
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка, С.Г. Неділько

Підпис С.Г. Неділька засвідчую:

Вчений секретар
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка Н.В. Караульна

Підпис засвідчую
Вчений секретар НДЧ
Караульна Н.В.
05.12.2019р.