

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Карбовника Івана Дмитровича “Механізми формування нанофаз та електронні процеси в шаруватих кристалічних та гібридних функціональних матеріалах”, подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків

Завдання пошуку та дослідження нових наноструктур з керованими функціональними властивостями набуває сьогодні особливої актуальності. У результаті розширення ряду потенційно придатних функціональних матеріалів неминуче виникає потреба глибшого розуміння процесів формування нанорозмірних фаз у цих матеріалах, які визначають ключові, з точки зору застосувань, властивості. У зв'язку з цим, дисертаційне дослідження Карбовника І.Д. “Механізми формування нанофаз та електронні процеси в шаруватих кристалічних та гібридних функціональних матеріалах”, яке присвячене з'ясуванню механізмів формування кристалічних, композитних і гібридних наноструктур та встановленню особливостей перебігу електронних процесів у таких структурах, є *актуальним* як з фундаментальної, так і з практичної точок зору.

Актуальність дисертації визначається і зв'язком її з цілою низкою науково-дослідних робіт та проектів, що виконувалися у Львівському національному університеті імені Івана Франка, повний перелік яких наведено на першій та другій сторінках автореферату. Особливої уваги заслуговує факт того, що частину досліджень автор дисертації виконав у рамках міжнародного гранту фонду цивільних досліджень CRDF Global.

Сформульована у дисертаційній роботі *мета* досягнута у результаті застосування ряду сучасних експериментальних та розрахункових методик, зокрема атомно-силової мікроскопії, скануючої електронної мікроскопії,

лінійно-поляризованої люмінесценції, інфрачервоної спектроскопії, спектроскопії комбінаційного розсіювання, імпедансної спектроскопії, стохастичного моделювання та низки інших підходів.

До найбільш вагомих *наукових результатів* роботи слід віднести:

- встановлення складу та оптико-люмінесцентних характеристик наноструктур, сформованих в об'ємі та на поверхні шаруватих кристалів йодистого кадмію;
- визначення закономірностей формування нанофаз у шаруватих кристалах CdI_2 за наявності домішок та в умовах відхилення від стехіометричного складу, у тому числі розробку моделі виникнення локальних центрів та утворення мікротрубок;
- одержання гібридних наноструктурованих плівкових шарів на основі високолюмінесцентних молекул та демонстрація можливостей керування експлуатаційними властивостями таких шарів;
- розробку алгоритму моделювання гібридних нанокомпозитів з інкорпорованими мережами вуглецевих нанотрубок, між якими існує тунельна провідність;
- комплексне дослідження змін електричного опору гібридних нанокомпозитів з температурою та частотою.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що автор запропонував методологію створення та застосування гібридних наноматеріалів та продемонстрував шляхи до розробки пристроїв електроніки з покращеними характеристиками, таких як органічні світлодіодні структури та наноструктуровані покриття, що екранують електромагнітне випромінювання. Крім того, автором представлено програмне забезпечення для моделювання гібридних нанокомпозитних матеріалів, що буде корисним для наукових груп, які працюють у галузі синтезу таких матеріалів.

Дисертаційну роботу Карбовника І.Д. можна умовно поділити на три частини, перша з яких присвячена дослідженню процесів наноструктурування

на атомно-гладких поверхнях шаруватих кристалів, друга стосується процесів осадження наноструктурованих шарів на діелектричні підкладки, а третя присвячена вивченню об'ємних наноформувань у гібридних композитах.

Структурно дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. У *першому* розділі автор робить огляд сучасного стану електроніки, пов'язаної із використанням фізичних явищ, які проявляються на нано- та субнанорозмірному рівнях структурної організації функціональних матеріалів. Акцентується необхідність вивчення механізмів впливу на процес групування наночастинок з метою одержання нових наноматеріалів із покращеними властивостями. Ґрунтовний аналіз методик дослідження наноструктурованих матеріалів та їхніх властивостей представлено у *другому* розділі. Тут розглянуто як традиційні методи, так і модифікації спектроскопічних досліджень, а також підходи до математичного аналізу одержаних експериментальних даних. У *третьому* розділі наведено аналіз морфологічних характеристик свіжосколотої поверхні вирощеного з розплаву кристала CdI_2 , встановлено механізм росту наноструктур на такій поверхні, вивчено вплив катіонної та аніонної підсистем, нестехіометрії та домішок на формування поверхневих наноструктур. Пояснена концентраційна залежність смуг поглинання і люмінесценції кристалів CdI_2 з відхиленням від формульного складу. Одним з важливих результатів, обговорених у цьому розділі, є дослідження явища формування мікротрубок та нанофаз на стінках мікротрубок у шаруватих кристалах, легованих неізоморфною домішкою. *Четвертий* розділ стосується одержання наноструктур за допомогою контрольованого термічно-вакуумного осадження на діелектричні поверхні. У цьому розділі наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень електронних явищ у гібридних структурах. Показано можливість формування структур з багатоколірною емісією та шляхи впливу на властивості одержаних структур,

зокрема шляхом зміни енергії збудження. Досліджено вплив електричного поля та нерезонансного випромінювання на формування наноструктурованої флуоресцентної плівки у процесі термічного вакуумного осадження дипольних молекул. У *п'ятому* розділі наведено результати досліджень гібридних функціональних нанокомпозитів, сформованих додаванням нанорозмірних елементів наповнення у діелектричну матрицю. Автором запропонована комплексна система числового моделювання мережі нанoeлементів у діелектричному середовищі, яка дозволяє параметризацію властивостей та візуалізацію результатів з урахуванням різних механізмів перенесення електричного заряду. Одержано композитні плівкові гібридні наноструктури «полімер – вуглецеві нанотрубки» та проведено комплексне дослідження змін електричного опору цих структур від температури, частоти прикладеної змінної напруги та дози поглинутого бета- та гамма-випромінювання.

Усі перелічені вище основні результати, отримані автором дисертації, характеризуються безперечною науковою новизною, їхня достовірність забезпечується використанням надійних сучасних експериментальних методик та кореляцією даних, отриманих різними методами, відтворюваністю одержаних результатів, застосуванням апробованих теоретичних підходів та сучасного програмного забезпечення. Тому обґрунтованість зроблених у дисертації висновків не викликає сумніву.

Водночас зауважимо, що дисертаційна робота І.Д. Карбовника не позбавлена й окремих *недоліків*, серед яких варто виділити такі:

1. При вивченні механізмів формування нанофаз у шаруватих кристалах йодистого кадмію автором наведені тільки низькотемпературні інфрачервоні спектри, одержані при 10 К (рис. 3.13). Логічним було би провести аналіз температурних змін виявлених смуг (наприклад, температурні зміни півширини), з якого можна було б отримати додаткове підтвердження природи цих смуг. Також, виникає запитання,

чи записувалися спектри в режимі нагрівання та охолодження і, якщо так, то які закономірності виявлені для цих випадків?

2. При одержанні багатокомпонентних шарів, що випромінюють квазібіле світло, автор лише епізодично згадує можливі відмінності у швидкостях осадження «синьої» та «зеленої» органічних молекул. Проте, такі відмінності можуть мати суттєвий вплив на перерозподіл спектральних компонент та, відповідно, на вигляд хроматичної діаграми, наведеної на рис. 4.16.
3. У розділі 4 дисертант аналізує фотоіндуковане впорядкування люмінесцентних молекул при осадженні наноструктурованих шарів. При цьому агрегація молекул на ділянці, опроміненій лазерним світлом в процесі осадженні, суттєво відрізняється від агрегації в неопроміненій області плівки. Однак, автор не аналізує можливий ефект зміни температури підкладки під дією випромінювання та потенційний вплив такої зміни на процес, показаний, зокрема, на рис. 4.24. Чи може нагрівання ділянки поверхні впливати на процес агрегації?
4. Робота не позбавлена синтаксичних помилок, описок та неточностей у позначеннях та скороченнях. Так, зокрема, автор вживає термін «*p-p* переходи» у п. 4.2, тоді як у п. 4.3 той же процес називає «*π-π* переходом». Окремі підписи до рисунків дещо неточно описують отримані дані, наприклад, у підписі до рис. 4.33 говориться про «флуоресцентне зображення», яке насправді більш коректно назвати «зображенням, отриманим за допомогою флуоресцентного мікроскопа».

Однак, ці зауваження жодним чином не зменшують наукової цінності даної роботи. В цілому дисертація являє собою закінчене наукове дослідження, в якому отримано нові, науково обґрунтовані результати в галузі фізики напівпровідників, конденсованих середовищ та нанофізики.

Текст автореферату повністю відповідає змісту дисертаційної роботи та адекватно передає основні наукові результати здобувача. Отримані автором результати опубліковано у 80 наукових працях, серед яких 26 статей у

рецензованих виданнях, індексованих у наукометричній базі даних Scopus, оприлюднено на ряді авторитетних всеукраїнських та міжнародних наукових форумів.

Враховуючи наведені вище аргументи, вважаю, що дисертаційна робота “Механізми формування наночастинок та електронні процеси в шаруватих кристалічних та гібридних функціональних матеріалах” цілком задовольняє вимоги департаменту атестації кадрів МОН України щодо докторських дисертацій, а її автор, Іван Дмитрович Карбовник, безперечно, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук,

професор, проректор з наукової роботи

Ужгородського національного університету

І.П. Студеняк

Підпис Студеняка Ігоря Петровича засвідчую:

Учений секретар Ужгородського

національного університету



О.О. Мельник