

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Яремчук Ірини Ярославівни
“ Хвилеводний, плазмон-поляритонний і плазмонний резонансні ефекти в мікро- та наноструктурах для сенсорної електроніки ”,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

В останні роки інтенсивно розвивається новий напрям електроніки – наноплазмоніка, яка поєднує нанометрові розміри активних елементів та оптичні частоти їхнього функціонування. Фізичною основою наноплазмоніки служать резонансні явища, які виникають при взаємодії електромагнітного випромінювання з мікро – та наноструктурами, а елементною базою – металічні наночастинки (НЧ), періодичні структури, сформовані нанорозмірними елементами (фотонні кристали), та хвилеводні структури, які формуються на межі "метал - діелектрик".

Просторове обмеження руху носіїв, склад, розміри та форма зумовлюють унікальні властивості мікро- та наноструктур, які широко використовуються не тільки у сенсорній електроніці, але і у медицині, сонячній енергетиці, при створенні композитних матеріалів із унікальними властивостями, тощо.

Дисертаційна робота Яремчук І.Я. присвячена дослідженню резонансних явищ, які виникають в процесі взаємодії електромагнітної хвилі з мікро- та наноструктурами в умовах оптичної дифракції, плазмонного, плазмон - поляритонного та хвилеводного резонансів.

Актуальність роботи обумовлюється тим, що вона присвячена з'ясуванню важливої науково-технічної проблеми фізики твердого тіла - резонансних явищ, які виникають при взаємодії електромагнітного випромінювання з мікро – та наноструктурами, і зумовлюють виникнення властивостей, перспективних для практичного використання. Слід відмітити, що прогрес у цій галузі досліджень у значній мірі пов'язаний з математичним моделюванням, яке дозволяє оптимізувати параметри структур з максимальним проявом резонансу. Вдале поєднання моделювання з подальшим експериментальним підтвердженням результатів моделювання дозволило автору отримати ряд важливих результатів, на основі яких запропоновано нові пристрої сучасної сенсорної електроніки.

Дисертаційна робота Яремчук І.Д. виконувалася на кафедрі фотоніки Національного університету "Львівська політехніка" в рамках п'яти держбюджетних тем, двох міжнародних проектів, та трьох грантів:

«Резонанс плазмонів та хвилеводних мод в наноструктурах та їх застосування» (№ державної реєстрації (ДР) 0110Ш01118),

«Мікролазери з розподіленим зворотнім зв'язком при виконанні умов Брегга другого порядку на основі хвилеводних структур» (№ ДР 0113Ш03190),

«Архітектоніка мікро- та наноструктур в умовах оптичної дифракції та плазмонного резонансу для потреб сучасної фотоніки» (№ ДР 0115Ш00427),

«Моделювання і експериментальна верифікація плазмонно-резонансних наноструктур для ефективного керування електромагнітним випромінюванням широкого спектрального діапазону» (№ ДР 0118Ш00267);

«Резонансні процеси трансформації енергії електронного збудження плазмонними наноструктурами в задачах та пристроях фотоніки» (№ ДР 0117Ш07176);

Проект № М/118-2014 «Розробка і створення сенсорних елементів на базі дифракційних нанокompatитних ґраток», (№ ДР 0114Ш05151)

Проект № М/124-2015 «Розробка і створення сенсорних елементів на базі дифракційних нанокompatитних ґраток», (№ ДР 0115Ш04876),

Грант Президента України Ф 36/411-2012 «Нанооптичні фільтри на основі металевих елементів» (№ ДР 0112Ш07332);

Грант Національного університету «Львівська політехніка» № ГЛП-12/5 «Селективні оптичні фільтри на основі металевих елементів»,

Грант Національного університету «Львівська політехніка» (№ ДР 0112Х1001202).

Тематика дисертаційної роботи повністю співпадає з тематикою нового перспективного напрямку, який розвивається на кафедрі фотоніки Національного університету "Львівська політехніка".

Цілеспрямовані експериментальні дослідження та моделювання процесів взаємодії наноструктур з електромагнітним випромінюванням дозволили автору отримати ряд **нових наукових результатів**, серед яких виділю наступні:

1. Вперше показано, що виникнення аномально високого пропускання зі спектральною шириною 200 нм для хвиль ТЕ поляризації багат шарової структури "діелектричний шар – металева ґратка – діелектричний шар – підкладка" у діапазоні 1...10 мкм реалізується на довжинах хвиль, які відповідають хвилеводному резонансу у діелектричному шарі та резонансу у діелектричному проміжку між елементами металевої ґратки.

2. Вперше встановлено, що у масиві періодично розміщених металічних нанодротів спектральне положення максимуму поглинання локалізованих поверхневих плазмонів співпадає з максимумами резонансного поглинання металічних наночастинок. Розщеплення резонансного максимуму у випадку срібних нанодротів пов'язано з інтерференцією падаючої та розсіяною на сусідніх нанодротинах хвиль.

3. Запропонований аналітичний вираз для відносної діелектричної проникності структур "діелектричне (напівпровідникове) ядро – металева оболонка (Au, Ag, Cu, Al)" у спектральному діапазоні 0,2 ...2,0 мкм. Показано, що зміною товщини металічної оболонки можна керувати спектральним положенням максимуму поглинання ППР у видимій та ІЧ – областях.

4. Удосконалено метод зв'язаних хвиль шляхом представлення зв'язку між векторами електричних і магнітних полів сусідніх шарів за допомогою додаткових постійних коефіцієнтів і S-матриць, та функціональної залежності діелектричної проникності матеріалу періодичної структури у вигляді модифікованого комплексного ряду Фур'є.

5. Показано, що висока чутливість реєстрації зміни кута мінімального пропускання оптоелектронної призмової сенсорної системи в умовах хвилеводного та плазмон – поляритонного резонансів досягається у призмовій структурі без хвилеводного шару. Проаналізовано залежності чутливості від поляризації хвилі та показника заломлення матеріалу призми.

6. Встановлено оптимальні параметри та отримані нові дані про поведінку смуг відбивання хвилеводно - резонансних ґраток як елементів окремого класу сенсорної електроніки для реєстрації зміни показника заломлення та структур для раманівської спектроскопії.

Наукова новизна результатів та висновків, зроблених на їхній основі, полягає у тому, що в дисертаційній роботі вперше експериментально та методами моделювання вивчено процеси виникнення та визначено параметри резонансів у мікро – та наноструктурах при взаємодії з електромагнітним випромінюванням. У своїй сукупності ці результати розвивають новий напрям у фізиці твердого тіла, на основі якого стає можливим розроблення та виготовлення різноманітних приладів сучасної сенсорної електроніки.

Обґрунтованість та достовірність наукових висновків і результатів підтверджуються використанням апробованих методів експериментальних досліджень та математичного моделювання, відповідністю результатів моделювання з експериментальними даними, та їхнє співпадіння з існуючими в літературі результатами.

Основні висновки та положення, сформульовані в дисертації, витікають з отриманих експериментальних результатів та даних моделювання.

Основні результати дисертаційної роботи Яремчук І.Я. опубліковані у фахових журналах України (9 статей), у періодичних виданнях (17 статей) та матеріалах конференцій (18 праць), які індексуються у міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science, збірниках матеріалів та тез всеукраїнських і міжнародних конференцій (21 праця). Ці роботи є добре відомі спеціалістам даної галузі, про що свідчить їх цитування іншими дослідниками.

Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному.

1. Запропоновані у роботі:

- математичне формулювання точної системи рівнянь зв'язаних хвиль у матричній формі та алгоритм S-матриці;

- зображення функціональної залежності відносної діелектричної проникності металу модифікованим комплексним рядом Фур'є;

- аналітичні вирази для спектральних залежностей комплексної діелектричної проникності срібла (в області 0,3 – 2,0 мкм) та золота (в області 0,3 – 4,2 мкм),

можна використовувати при моделюванні спектральних характеристик наночастинок, мікро – та наноструктур і елементів на їхній основі, оскільки

суттєво спрощують створення програмного продукту та зменшують часовий ресурс при обчисленнях.

2. В роботі обґрунтовано, що:

- хвилеводну ґратку, виготовлену сухим травленням нанесеної на плавлений кварц алмазоподібної вуглецевої плівки, можна використовувати як сенсор для визначення показника заломлення навколишнього середовища;

- структуру у вигляді металічної ґратки, розміщеної між двома діелектричними шарами, запропоновано використовувати для конструювання селективного фільтра для ІЧ – області спектра;

- субмікронні структури (прямокутні полікарбонатні ґратки, металізовані та синусоїдальні ґратки на основі GaAs) можна використовувати у фотоніці при виготовленні оптичних елементів схем.

3. Корисними для практичного використання може бути технологія створення нанооб'єктів у вигляді “діелектричне (напівпровідникове) ядро – металічна оболонка”, які дозволяють керувати спектральним положенням максимуму поглинання поверхневого плазмона у видимій та ближній інфрачервоній області спектру, що суттєво розширює потенційні області застосування таких наноструктур.

Структура дисертаційної роботи. Дисертація складається із вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел (449 найменувань) та двох додатків. Розділи добре структуровані, в завершенні кожного з них містяться висновки.

У **вступі** обґрунтована актуальність теми, зв'язок роботи з науковими програмами, сформульована мета та основні задачі, які розв'язувалися при виконанні роботи. Висвітлено наукову новизну та практичну цінність, особистий внесок автора, публікації та апробацію матеріалів.

Перший розділ присвячений огляду літературних даних, які стосуються аналізу технічних аспектів моделювання та створення резонансних структур різної розмірності, їхнього практичного застосування. Розглянуто основні напрямки, переваги та застосування резонансних мікро – та наноструктур в оптико – електронних схемах, методи покращання характеристик твердотільних елементів електроніки.

Другий розділ містить опис математичних моделей дослідження взаємодії електромагнітного випромінювання з мікро – та наноструктурами. Удосконалено метод зв'язаних хвиль, що спрощує вивчення резонансних явищ у періодичних структурах.

У **третьому** розділі наведені результати досліджень резонансних явищ у призмових структурах. Вивчено особливості виникнення хвилеводного та плазмон – поляритонного резонансів у таких структурах, оптимізовано їхні структурні та оптичні характеристики, проаналізована чутливість від параметрів діелектричного шару.

Четвертий розділ присвячений дослідженню резонансних явищ у ґраткових мікро – та наноструктурах та обґрунтуванню їхнього застосування у пристроях сенсорної електроніки. Описується технологія отримання одновимірних ґраток, вивчаються спектральне положення максимумів відбивання від кута падіння для різної поляризації світла. Наводяться результати дослідження періодичних нанограток, сформованих нанодротоми квадратного перетину із золота та срібла.

У **п'ятому** розділі на основі експериментальних даних обґрунтовується аналітичний вираз для відносної діелектричної проникності плазмонних металів у видимій та ближній ІЧ – області.

У **шостому** розділі наводяться результати досліджень особливостей взаємодії електромагнітного випромінювання з нанокompозитним матеріалом, сформованим на основі алмазоподібної вуглецевої плівки та наночастинками срібла. Аналізуються експериментально виявлені закономірності зміни у спектрах цих матеріалів при відпалі. Змодельовано одновимірні та двовимірні періодичні структури на основі цього композиту.

У **сьомому** розділі наводяться результати моделювання та оптимізації субмікронних структур як оптичних елементів фотонних схем. Теоретично змодельовані кутові залежності металізованих прямокутних ґраток та оптимізовано їхні параметри

Матеріали дисертації викладені доступно, логічно та лаконічно. Робота добре проілюстрована. Дисертація та автореферат оформлені з використанням сучасних засобів комп'ютерної графіки.

Автореферат дисертації повністю **відображає її зміст.**

Поряд з тим, до дисертаційної роботи можна зробити **певні зауваження.**

1. Отримані на основі експериментальних даних аналітичні вирази спектральної залежності діелектричної проникності плазмонних металів доцільно було б більш повно співставити з модельними розрахунками в рамках теорії Друде – Зомерфельда. Крім того, бажано було б повніше проаналізувати розмірну залежність діелектричної проникності, оскільки для розмірів наночастинок, менших від довжини вільного пробігу носіїв (приблизно 70 нм для срібла), значний вклад у загасання вносить розсіяння носіїв на поверхні.

2. Зміни спектрів екстинції (поглинання + розсіяння) плівок АВП з диспергованим сріблом при відпалі в роботі пов'язуються зі змінами середнього розміру та форми нанокластерів срібла, під якими, як мені видається, авторка розуміє окремі наночастинок срібла. При цьому, однак, не враховується можливість формування НЧ срібла фрактальних кластерів, що є більш ймовірним процесом, ніж зміна форми окремої НЧ. В цьому контексті важливими видаються результати мікроскопічних досліджень таких композитів.

3. Значне підсилення КРС та люмінесценції молекул, локалізованих в околі НЧ, в роботі обґрунтовано пов'язується з впливом полів, локалізованих біля НЧ на лінійні сприйнятливості молекул. Однак, дисертантка не враховує інший механізм впливу, який пов'язаний з формуванням НЧ срібла фрактальних кластерів, у яких, як відомо, виникають так звані гарячі точки, у яких напруженість поля у $10^5 - 10^6$ раз перевищує середню по об'єму.

4. Не зрозуміло, чому пропускання структури, сформованої металевою ґраткою між двома діелектричними шарами, авторка розглядає як селективний **широкосмуговий** фільтр для ІЧ області, хоча насправді вона володіє вузькою смугою пропускання (рис.7 автореф.).

5. Якщо новий чисельний метод розв'язку хвильового рівняння ґрунтується **тільки** на перетворенні Фур'є з подальшим розв'язком алгебраїчного рівняння у частотній області і оберненим перетворенням Фур'є, то такий підхід є широко відомим. Тоді не ясно, з чим пов'язана новизна цього методу.

5. Є зауваження методологічного характеру, які стосуються подання матеріалу. В роботі зустрічаються невдало сформульовані вирази, напр., “вершина наночастинки еліпсоїдальної форми” (очевидно, йде мова про кривизну поверхні), “Фур’є перетворення в хвильовому рівнянні” , “розраховані спектри поглинання в залежності від довжини хвилі”, та ін.

Однак, зроблені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки роботи, її наукового та практичного значення.

Дисертаційна робота Яремчук І.Я. є **завершеною науковою працею**, яка виконана на високому науковому рівні, і має безпосереднє практичне значення.

Вважаю, що дисертаційна робота “Хвилеводний, плазмон-поляритонний і плазмонний резонансні ефекти в мікро- та наноструктурах для сенсорної електроніки” **повністю відповідає вимогам** Міністерства освіти і науки України, що ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук, зокрема пп. 9, 10, 12 положення про «Порядок присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України за № 567 від 24.07. 2013 р., а її автор – Яремчук Ірина Ярославівна, **заслуговує** присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент, доктор фіз.-мат. наук,
професор, завідувач кафедри радіофізики та
комп’ютерних технологій
Львівського національного університету
ім. І. Франка

Підпис І.М. Болести завіряю:
Вчений секретар Львівського національного
університету ім. І.Франка, доцент



І. М. Болеста

О.С. Грабовецька