

ВІДГУК
офіційного опонента на дисертацію
Яремчук Ірини Ярославівни

«Хвилеводний, плазмон-поляритонний і плазмонний резонансні ефекти в мікро- та наноструктурах для сенсорної електроніки»
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 01.04.07 - фізики твердого тіла

Актуальність теми дисертації. Швидкий прогрес у галузі виробництва наноструктур з розмірами десятки нанометрів зробив можливим підвищення ефективності оптично-електронних пристройів на основі наноструктур за рахунок їх геометрії та розмірів, а не оптимізації хімічного складу матеріалів. Але отримання наперед визначених характеристик таких наноструктур є неможливим без створення теорії резонансних явищ, які виникають в процесі взаємодії електромагнітної хвилі з запропонованими структурами та елементами на їх основі. Дослідження резонансної взаємодії електромагнітних хвиль оптичного діапазону з періодичними структурами і наночастинками благородних металів має практичну цінність. При резонансній взаємодії в наноструктурах виникає суттєве підсилення полів в порівнянні з амплітудою падаючої хвилі. Невелика зміна параметрів наноструктури чи оточуючого середовища порушує резонанс, який можна зафіксувати і використати в оптично-електронних пристроях та системах. Тому ця дисертаційна робота є актуальною.

Загальна характеристика роботи. Дисертацію присвячено вивченю резонансних явищ, які виникають в процесі взаємодії електромагнітної хвилі з наноструктурами в умовах оптичної дифракції та плазмонного, плазмон-поляритонного і хвилеводного резонансів. В роботі досліджено наноструктури, що містять тонкі плівки, наногратки, нанонаночастинки та нанокомпозитні матеріали, що включають металеві фрагменти, а їх функціональність визначається особливостями структурування матеріалу – архітектонікою, тобто природою металу, розмірами, формою і внутрішньою будовою окремих нановключень. В таких структурах можливі резонансні явища, що призведуть до значного підсилення або керованого перерозподілу електромагнітного поля.

Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел літератури (499 найменувань) та 2 додатків; містить 159 рисунків та 10 таблиць. Робота викладена на 297 сторінках основного тексту. Обсяг, що займають анотація, зміст, список використаних джерел літератури і додатки – 99 сторінок.

У **Вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційного дослідження, розглянуто зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформульовано мету і завдання дослідження, обґрунтовано наукову новизну, практичне значення здобутих результатів, показаний особистий внесок здобувача, наведено результати апробації дисертації та список публікацій.

Перший розділ роботи містить аналіз основних напрямків, переваг і досвіду застосування резонансних наноструктур в оптико-електронних системах.

У **другому розділі** дисертації запропоновані нові математичні моделі, що описують взаємодію електромагнітного випромінювання з наноструктурами. Вдосконалено метод зв'язаних хвиль та вивчено його можливості для аналізу взаємодії оптичних хвиль з наногратками на основі срібла та золота. Детально описана математична модель взаємодії лазерного випромінювання з металевими наночастинками та елементами на їх основі.

У **третьому розділі** наведені результати дослідження хвилеводно-резонансних характеристик призмових структур, властивостей призмових структур в умовах резонансу поверхневих плазмон-поляритонів, а також зроблено порівняльний аналіз резонансу поверхневих плазмон-поляритонів та хвилеводних мод. Для підтвердження результатів теоретичних досліджень проведені експериментальні дослідження. В результаті встановлені нові закономірності, що визначають зв'язок між параметрами призмової сенсорної системи та її чутливістю.

В **четвертому розділі** розглянуто умови виникнення хвилеводного, плазмон-поляритонного та плазмонного резонансів в граткових наноструктурах та фактори, які впливають на їх спектральні характеристики. Експериментально встановлено, що структура на основі гратки в умовах хвилеводного резонансу характеризується високим коефіцієнтом відбивання у вузьких спектральних смугах та може бути використана як високочутливий елемент сенсорної електроніки. Розвинуто знання про хвилеводно-резонансні одно-вимірні та двовимірні граткові структури.

У **п'ятому розділі** досліджено властивості металевих наночастинок в умовах локалізованого поверхневого плазмонного резонансу. Запропоновано аналітичне

представлення діелектричної проникності благородних міді, золота, срібла та алюмінію в широкому спектральному діапазоні.

В шостому розділі досліджено особливості взаємодії електромагнітного випромінювання з нанокомпозитними матеріалами. Показано, що ефективну діелектричну проникність для нанокомпозитного матеріалу на основі алмазоподібної вуглецевої плівки з диспергованими у ній наночастинками срібла найкраще описує теорія ефективного середовища Максвелла-Гарнетта. Виконано експериментальне дослідження оптичних властивостей алмазоподібної вуглецевої плівки з диспергованими у ній наночастинками срібла.

Сьомий розділ містить результати моделювання та оптимізації наноструктур як оптичних елементів для оптоелектронних систем. Показано можливість просвітлення граткою границі прозорий діелектрик – повітря. Оптимізовано геометричні параметри металізованої гратки та створено на її основі сенсорний елемент. Виконано оптимізацію прямокутних граткових структур на базі полікарбонат/срібло та срібло/срібло з метою отримання максимального підсилення гігантського комбінаційного розсіювання світла.

Наукова новизна дисертації. Наукова новизна одержаних результатів роботи полягає у наступному:

Автором вперше:

1. Вивчено спектр пропускання для хвиль ТЕ поляризації багатошарової структури діелектричний шар/металева гратка/діелектричний шар/підкладка та встановлено умови виникнення єдиного піку пропускання в спектральному діапазоні від 1 до 10 мкм зі спектральною шириною 200 нм. Така структура є ефективним широкосмуговим оптичним фільтром в інфрачервоній області спектру. Доведено, що аномально високе пропускання можливе на довжині хвилі, на якій реалізується два резонанси: хвилеводний резонанс у діелектричних шарах та резонанс у діелектричній щілині металевої гратки.

2. Встановлено, що при резонансі локалізованих поверхневих плазмонів в наноструктурах з масивом періодично розташованих металевих нанодротів спектральне розташування піків поглинання близьке до резонансних довжин хвиль металевих наночастинок. Резонансний пік у випадку срібних нанодротів розщеплюється на декілька піків на відміну від одного піку для золотих нанодротів. Ця відмінність є результатом інтерференції поля падаючої хвилі та розсіяного поля на сусідніх нанодротах за рахунок того, що уявна частина діелектричної проникності срібла суттєво менша за уявну частину

діелектричної проникності золота. Чутливі елементи сенсорів на таких структурах можуть реєструвати зміни показника заломлення навколошнього середовища.

3. На основі експериментальних даних запропоновано аналітичне представлення діелектричних проникностей металів (золото, срібло, мідь та алюміній) в широкому спектральному діапазоні. Було підтверджено, що зміною товщини оболонки металу на діелектричному чи напівпровідниковому ядрі можна налаштовувати спектральне розташування піку поверхневого плазмонного поглинання в інтервалі довжин хвиль видимої і близької інфрачервоної області спектру.

4. Встановлено, що для моделювання оптичних характеристик нанокомпозитного матеріалу на основі алмазоподібної вуглецевої плівки з диспергованими в неї наночастинками срібла серед відомих теорій (теорія Mi, теорія Бруггемана, теорія Максвелла-Гарнетта, та ін.) найбільш придатною є теорія ефективного середовища Максвелла-Гарнетта, оскільки вона добре узгоджується з експериментальними даними.

Автором удосконалено та розвинуто:

5 Метод зв'язаних хвиль шляхом нового представлення зв'язку між векторами електричних і магнітних полів за допомогою додаткових постійних коефіцієнтів та S-матриць, які пов'язують напруженості полів між сусідніми шарами гратки, що дозволяє в простій математичній формі визначити умови виникнення резонансних ефектів в періодичних наноструктурах сучасної оптоелектроніки.

6. Нові закономірності зв'язку між параметрами оптоелектронної призмової сенсорної системи та її чутливістю в умовах хвилеводного та плазмон-поляритонного резонансів. Показано, що високу чутливість зміни кута мінімального відбивання до зміни показника заломлення навколошнього середовища можна отримати в призмовій структурі без хвилеводного шару при реалізації поверхневого плазмон-поляритонного резонансу.

7. Оптимальні параметри металізованих граток як елементів сенсорів реєстрації зміни показника заломлення та структур для раманівської спектроскопії. Використання полікарбонатних прямокутних граток, покритих шаром золота, дозволяє отримати максимальне підсилення сигналів комбінаційного розсіяння світла у 10^4 разів.

8. Теорію хвилеводно-резонансних граткових структур, як елементів окремого класу оптико-електронних сенсорів з високим коефіцієнтом відбивання у вузьких спектральних смугах.

Зв'язок дисертації з, науковими програмами, напрямами, планами. Тема дисертації відповідає науковому напряму кафедри фотоніки Національного університету «Львівська політехніка» – «Дослідження взаємодії фотонних потоків з гетерогенними системами, розроблення лазерних технологій та фотонних систем». Дисертація виконана в межах науково-дослідних робіт: «Резонанс плазмонів та хвилеводних мод в наноструктурах та їх застосування» ДБ/ПЛАЗМА (№ державної реєстрації 0110U001118), «Мікролазери з розподіленим зворотнім зв'язком при виконанні умов Брегга другого порядку на основі хвилеводних структур» ДБ/Мікролазер (№ державної реєстрації 0113U003190), «Архітектоніка мікро- та наноструктур в умовах оптичної дифракції та плазмонного резонансу для потреб сучасної фотоніки» ДБ/ТЕКТОН (№ державної реєстрації 0115U000427), «Моделювання і експериментальна верифікація плазмонно-резонансних наноструктур для ефективного керування електромагнітним випромінюванням широкого спектрального діапазону» ДБ/МЕВ (№ державної реєстрації 0118U000267), «Резонансні процеси трансформації енергії електронного збудження плазмонними наноструктурами в задачах та пристроях фотоніки» ДБ/Фотоніка (№ державної реєстрації 0117U007176); в міжнародних проектах № М/118-2014 «Розробка і створення сенсорних елементів на базі дифракційних нанокомпозитних ґраток» (№ державної реєстрації 0114U005151) та № М/124-2015 «Розробка і створення сенсорних елементів на базі дифракційних нанокомпозитних ґраток» (№ державної реєстрації 0115U004876); науково-дослідної роботи гранта Президента України для підтримки наукових досліджень молодих учених «Нанооптичні фільтри на основі металевих елементів» Ф 36/411-2012 (№ державної реєстрації 0112U007332), гранта Національного університету «Львівська політехніка» для підтримки наукових досліджень молодих учених «Селективні оптичні фільтри на основі металевих елементів» № ГЛП-12/5 (№ державної реєстрації 0112U001202)

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій підтверджуються коректним використанням апробованого математичного апарату, методів моделювання, різними засобами виконання розрахунків; результатами проведених автором числових експериментів, відповідністю результатів розрахунків з експериментальними результатами, їх зв'язком з існуючими результатами, отриманими класичними методами, а також порівняльним аналізом результатів дисертаційних досліджень із даними літературних джерел, результатами апробацій.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновано точну систему рівнянь зв'язаних хвиль та алгоритм S-матриці до простої матричної форми, що дозволяє проектувати наноструктури з наперед визначеними спектральними характеристиками.

Результати дослідження резонансних явищ, таких як збудження резонансу хвилеводних мод в планарному хвилеводі з допомогою призми або ґратки, збудження резонансу плазмонів та плазмон-поляритонів з допомогою ґратки на плоскій поверхні дозволяють спроектувати оптико-електронні пристрої на основі наноструктур з суттєво покращеними характеристиками. Так зміна параметрів ґратки, навколошнього середовища та геометрії взаємодії оптичної хвилі з ґраткою призводить до порушення резонансу, тим самим до зміни коефіцієнта відбивання від ґратки, коефіцієнта пропускання та поглинання, що є основою для побудови високо-чутливих сенсорів.

Багатошарова структура діелектричний шар/металева ґратка/діелектричний шар/підкладка може бути використана як широкосмуговий оптичний фільтр в інфрачервоній області спектру.

Дослідження взаємодії оптичного випромінювання з масивом періодично розміщених металевих нанодротів дає можливість створювати на їх основі плазмонні наномасштабні лазерні джерела та оптико-електронні сенсори.

Результати роботи використано у науково-виробничому підприємстві «Електрон-Карат», при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт та у навчально-науковому процесі кафедри фотоніки Національного університету «Львівська політехніка».

Публікації та апробація результатів дисертаційного дослідження. Основні результати дисертації викладені в 65 наукових працях, зокрема у 9 статтях у наукових фахових виданнях України, у 15 статтях у наукових періодичних виданнях інших держав із напряму, з якого підготовлена дисертація, включених до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, 2 розділах у кни�ах та збірках наукових праць, виданих за кордоном, які включені в наукометричні бази Scopus та Web of Science, 18 статтях в матеріалах конференцій, які індексовані у наукометричних базах Scopus та Web of Science, 21 праці, що опубліковані в збірниках тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій.

В опублікованих працях в достатній мірі висвітлені наукові положення, основні висновки і рекомендації дисертаційної роботи. Результати дисертації були представлені

на багатьох міжнародних конференціях та наукових форумах, що підтверджує ознайомлення з ними широкої наукової аудиторії.

Оцінка мови, стилю та оформлення дисертації й автореферату.

В цілому дисертація написана нормативною українською мовою на добром стилістичному рівні. Застосована наукова термінологія є загальновживаною, стиль викладу результатів наукових досліджень, наукових положень, висновків та рекомендацій зрозумілий.

Зміст автореферату є ідентичним основним положенням дисертації та написаний з використанням сучасної наукової термінології. Оформлення дисертації та автореферату відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів Міністерства освіти та науки України, а саме вимогам пп. 9, 10, 12 положення про «Порядок присудження наукових ступенів».

Зауваження до дисертації.

1. Мета дисертаційного дослідження сформульована не досить конкретно «метою роботи є вивчення резонансних явищ та моделювання і оптимізація оптоелектронних пристроїв на їх основі» (с. 32). Також у вступі не достатньо конкретно сформульована наукова проблема. Вважаю, що наукова проблема полягає у протиріччі між швидким прогресом у галузі виробництва наноструктур з розмірами десятки нанометрів та відставанні теорії, яка описує процеси проходження оптичного випромінювання через такі структури. Таке відставання не дозволяє створити оптико-електронні пристрої на основі наноструктур з заздалегідь визначеними характеристиками. Тому метою роботи стає розробка нової теорії, яка точно описує процеси проходження оптичного випромінювання через наноструктури і тим самим дозволяє створювати оптико-електронні пристрої на основі цих структур з заздалегідь визначеними характеристиками

2. У першому розділі дисертації варто було б навести інформацію про сучасні технології виробництва наноструктур, включаючи технології електронної, іонної, лазерної, ультрафіолетової літографії та інші. Також треба було навести інформацію про характеристики, включаючи чутливість, пропускання, вартість та інші сучасних оптичних сенсорів та елементів оптико-електронних пристрійв на основі наноструктур, які виробляються та продаються провідними компаніями. Така інформація, по-перше, більше підкреслила актуальність роботи, по-друге – була відправною точкою для оцінювання

практичної цінності роботи через порівняння отриманих характеристик з характеристиками відомих аналогів.

3. На с. 100 – 100 розглядається «представлення діелектричної проникності у вигляді скінченного традиційного ряду Фур'є ... ». По суті мова іде про застосування вікна Ланчоса для мінімізації осциляцій у місцях різкого перепаду амплітуди функції. Це відома операція у цифровій обробці сигналів. Застосування вікна Ланчоса для теоретичного дослідження наноструктур є цікавим рішенням. Але це не можна пояснювати так, що «прямокутник деформувався у трапецію».

4. У розділі 2 запропонована «точна система рівнянь зв'язаних хвиль та алгоритму S-матриці представлених та адаптованих до простої матричної форми для використання на сучасній мові програмування ... Запропонований алгоритм був реалізований у стандартному математичному програмному забезпеченні» (с. 132 – 133). На жаль, у цьому розділі немає жодних відомостей про можливості, характеристики та розповсюдження цього програмного забезпечення.

5. Отримані апроксимації спектральних характеристик діелектричної проникності срібла, золота, міді та алюмінію у розділі 5 (с. 220 – 227) треба було представити у вигляді програмного забезпечення для розрахунку цих характеристик. Створення такого програмного забезпечення підвищило би практичну цінність роботи.

6. У розділі 7 чутливість та вартість оптичного сенсорного елемента на основі рельєфної металізованої ґратки (с. 295 – 297) треба було порівняти з чутливістю та вартістю найближчого аналога. Це дозволило б оцінити перспективи переходу запропоновані сенсорні елементи.

7. У розділі 7 запропонований метод просвітлення ґраткою границі повітря - прозорий діелектрик (с. 285 – 289) наводиться без порівняння з сучасними багатошаровими просвітлюючими покриттями для інфрачервоних оптичних систем. Порівняння спектральних характеристик пропускання, технології нанесення та вартості покріттів дозволило б конкретизувати області застосування запропонованого метода просвітлення ґраткою.

8. У розділі 7 було зазначено що, «повне просвітлення ґраткою можна отримати лише для окремої поляризації світла» (с. 289). На жаль, цьому важливому результату не приділено жодної уваги. Але саме створення поляризаційних елементів на основі нанограток є одним з перспективних напрямків у розвитку оптико-електронних приладів. До таких приладів відносяться поляризаційні камери та поляризаційні сенсори, які мають широку область застосування: від контролю на виробництві до військової

техніки, від систем дистанційного зондування до медичної техніки. Розроблена теорія дозволяє обчислити оптимальні параметри нанограток, які можна нанести безпосередньо на поверхню оптичного компонента або на поверхню фотоприймача.

9. Невідповідність кількості задач – 11 шт. (с. 33), кількості розділів дисертації – 7 шт. та кількості висновків – 10 шт. (с. 322 – 326). Традиційно кожний розділ дисертації присвячується вирішенню однієї з поставлених задач. А кожний висновок дисертації вказує наскільки успішно задача вирішена і який позитивний результат отримано.

10. Довгі та неконкретні висновки до розділів, які є стислим повторенням матеріалу відповідного розділу. Наприклад у висновках до розділу 6 (с. 283) записано «Показано можливості моделювання одного і того ж нанокомпозитного матеріалу різними ефективними теоріями в залежності від розмірів і концентрації наповнювань». Вважаю, що висновки повинні бути короткими та конкретними.

11. Надмірна кількість підрозділів – 99 шт. (с. 23 – 28) при кількості сторінок основного тексту – 297 с. Назва деяких підрозділів дуже довга – 3 строки тексту (пп. 1.2, 1.3, 2.3, 3.4, 5.3.11, 7.3.3). Це ускладнює сприйняття матеріалу дисертації. Назва розділу 1 є невдалою: «Аналіз фізичних аспектів моделювання та створення композитних мікро- та наноструктур для сучасних практичних застосувань». Краще цей розділ назвати «Сучасні композитні наноструктури».

12. Дисертація містить на окремих аркушах помилки форматування – початок підрозділу у кінці сторінки, надзвичайно довгі підписи до деяких малюнків (Рис. 2.13 та Рис. 2.14 – 5 строк, Рис. 2.17 – 7 строк) та декілька стилістичних помилок.

Більшість з недоліків стосуються форми викладення матеріалу та представлення отриманих результатів і тому не зменшують наукову та практичну цінність роботи. Наведені зауваження не впливають на ключові положення дисертації та не применшують її позитивну оцінку.

Висновки.

Дисертація Яремчук І. Я. «Хвилеводний, плазмон-поляритонний і плазмонний резонансні ефекти в мікро- та наноструктурах для сенсорної електроніки» є завершеною працею в якій вирішена актуальна науково-технічна проблема фізики твердого тіла – створення нової теорії, яка точно описує резонансні явища при взаємодії електромагнітного випромінювання із тверdotільними наноструктурами, що дозволило проектувати елементи оптико-електронних пристрій з суттєво підвищеними характеристиками.

Враховуючи актуальність теми, наукову новизну і практичну значимість роботи, вважаю, що дисертаційна робота відповідає вимогам, які пред'являється до докторських дисертацій, а її тема та зміст відповідають паспорту спеціальності 01.04.07 - фізики твердого тіла.

Дисертація відповідає вимогам МОН України, які висуваються до робіт поданих на здобуття наукового ступеня доктора наук, зокрема пп. 9, 10, 12 положення про «Порядок присудження наукових ступенів», а її автор Яремчук Ірина Ярославівна заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.04.07 - фізики твердого тіла.

Офіційний опонент

доктор технічних наук, доцент,

професор кафедри оптичних та оптико-електронних приладів

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Боровицький Володимир Миколайович

Підпис Боровицького В. М. підтверджую

Вчений секретар

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»



Мельниченко А. А.