


НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЯРЕМЧУК ІРИНА ЯРОСЛАВІВНА



УДК 535.3; 535.42; 51-7

**ХВИЛЕВОДНИЙ, ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОННИЙ І ПЛАЗМОННИЙ
РЕЗОНАНСНІ ЕФЕКТИ В МІКРО- ТА НАНОСТРУКТУРАХ ДЛЯ
СЕНСОРНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ**

01.04.07 - фізика твердого тіла

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів - 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі фотоніки Національного університету "Львівська політехніка" Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Бобицький Ярослав Васильович,
Національний університет "Львівська політехніка",
завідувач кафедри фотоніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
Крючин Андрій Андрійович,
Інститут проблем реєстрації інформації НАН
України, заступник директора;

доктор технічних наук, доцент
Боровицький Володимир Миколайович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», професор кафедри оптичних та
оптико-електронних приладів;

доктор фізико-математичних наук, професор
Болеста Іван Михайлович,
Львівський національний університет імені Івана
Франка, завідувач кафедри радіофізики та
комп'ютерних технологій

Захист відбудеться „29” листопада 2018 р. о 14.30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.13 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий „27” жовтня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 35.052.13
доктор фізико-математичних наук, професор



Заячук Д.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток сучасних оптико-електронних та фотонних технологій приладобудування неухильно ведуть до необхідності створення, дослідження та використання мікро/нанорозмірних об'єктів, нанокмпозитних структур. На резонансних явищах взаємодії електромагнітного випромінювання з такими елементами ґрунтується робота низки сучасних оптоелектронних приладів, а саме різноманітних фільтрів, антен, сенсорів, сонячних елементів та інше. Ефекти резонансу також виступають як потужний енергетичний та інформаційний чинник у новітніх нанофотонних технологіях, а перспектива керування електромагнітним випромінюванням у взаємодії з наноструктурами є одним з пріоритетів сучасної прикладної фізики. Особливу роль вказана проблема відіграє в фізиці твердого тіла, де розглядаються проблеми сумісного використання оптичних та електронних методів оброблення, передавання, зберігання та трансформації енергії. Використання резонансних мікро- та наноструктур дозволяє вийти на новий рівень характеристик оптичних та електронних елементів сенсорних, фотовольтаїчних, фотокаталітичних, біофотонних та інших систем.

Сьогодні рівень технології дозволяє створювати мікро- та наноструктури з керованими оптичними властивостями і характерними розмірами порядку декількох десятків та менше нанометрів. Структури на основі нанокмпозитних матеріалів демонструють екстраординарні властивості оптичного відбивання та поглинання за рахунок просторової модифікації нановключень. Особливий інтерес представляють локалізовані плазмони і плазмон-поляритони з точки зору їх можливого застосування для різного роду інтегральних давачів. Фізичним підґрунтям тут є фактори збудження плазмон-поляритонів і резонансна частота локалізованих плазмонів у реальному середовищі, де електромагнітне поле збудженого плазмона перебуває у функціональній залежності з його оточенням.

Застосування таких структур дозволяє керувати характеристиками оптичного випромінювання в наномасштабах. Підвищення ефективності керування досягається, головним чином, за рахунок мікро/наноструктурування, а не добором хімічного складу матеріалів. Цілеспрямоване керування параметрами таких систем є неможливим без вивчення фізики резонансних явищ, які виникають в процесі взаємодії електромагнітної хвилі з мікро- та нанооб'єктами та структурами на їх основі. Ключову роль тут відіграють дослідження та розроблення теорії взаємодії лазерного випромінювання з мікро/наноструктурами і архітектоніка фотонних елементів, що визначає їх оптичні властивості. Однак, на даний час не існує єдиної теорії, що описує відомі резонансні явища в широкому діапазоні спектру для практичного використання в інженерії таких елементів, немає аналітичних співвідношень, які б відображали залежність частоти резонансу від геометрії та інших параметрів структур.

Отже, основна гіпотеза роботи полягає у існуванні просторових конструкцій мікро- та наноструктур, що містять тонкі плівки, наногратки,

мікро/наночастинки та нанокompозитні матеріали, структури, 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. Математичне моделювання таких явищ, для пошуку параметрів реальних структур з максимальним проявом резонансу електромагнітного поля з наступним експериментальним підтвердженням стане підґрунтям для розроблення та виготовлення елементів сучасної фотоніки та електроніки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана на кафедрі фотоніки Національного університету «Львівська політехніка». Тема дисертації відповідає науковому напрямку кафедри «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 розподіленням зворотнім зв'язком при виконанні умов Бреґґа 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), в яких автор дисертації була виконавцем; в міжнародних проектах № М/118-2014 «Розробка і створення сенсорних елементів на базі дифракційних нанокompозитних ґраток», (№ державної реєстрації 0114U005151) та № М/124-2015 «Розробка і створення сенсорних елементів на базі дифракційних нанокompозитних ґраток», (№ державної реєстрації 0115U004876), в яких автор дисертації була відповідальним виконавцем, та науково-дослідної роботи «Резонансні процеси трансформації енергії електронного збудження плазмонними наноструктурами в задачах та пристроях фотоніки» ДБ/Фотоніка (№ державної реєстрації 0117U007176); гранта Президента України для підтримки наукових досліджень молодих учених Ф 36/411-2012 «Нанооптичні фільтри на основі металевих елементів» (№ державної реєстрації 0112U007332); гранта Національного університету «Львівська політехніка» для підтримки наукових досліджень молодих учених № ГЛП-12/5 «Селективні оптичні фільтри на основі металевих елементів», грант Національного університету «Львівська політехніка» (№ державної реєстрації 0112U001202), в яких автор дисертації була науковим керівником.

Мета і завдання досліджень. *Метою роботи є вивчення резонансних явищ, які виникають в процесі взаємодії електромагнітної хвилі з мікро- та наноструктурами в умовах оптичної дифракції та плазмонного, плазмон-*

поляритонного і хвилеводного резонансів та моделювання і оптимізація оптоелектронних елементів на їх основі.

Для реалізації цієї мети в роботі необхідно було вирішити *такі завдання*:

- аналіз фізичних аспектів моделювання та створення композитних мікро- та наноструктур для сучасних практичних застосувань;
- розроблення математичної моделі взаємодії електромагнітної хвилі з періодичними мікро- та наноструктурами, наночастинками та елементами на їх основі;
- визначення умов виникнення резонансних ефектів в композитних мікро- та наноструктурах;
- вивчення особливостей хвилеводного та плазмон-поляритонного резонансів у призмових структурах з метою створення сенсорних елементів на їх основі;
- дослідження особливостей розподілу електромагнітного поля металевими мікроструктурами в умовах ТЕ і ТМ поляризацій;
- дослідження резонансних характеристик масиву металевих нанодротів, розміщених на діелектричній підкладці;
- дослідження спектральних характеристик оптичного відгуку металевих, наночастинок та їх ансамблів;
- вивчення особливостей взаємодії електромагнітного випромінювання з вибраними нанокompозитними матеріалами;
- встановлення характеру впливу металевих нановключень з врахуванням їх розміру, форми та концентрації на оптичні та електронні властивості нанокompозитних структур;
- моделювання та визначення оптимальних параметрів субмікронних структур, сенсорів, що працюють на основі плазмон-поляритонного резонансу;
- моделювання та визначення оптимальних параметрів субмікронних структур для спектроскопії комбінаційного розсіяння світла за рахунок виникнення резонансу плазмонів і, відповідно, значного підсилення поля.

Об'єкт дослідження – взаємодія електромагнітного випромінювання з мікро- та наноструктурами в умовах хвилеводного, плазмон-поляритонного та плазмонного резонансів.

Предметом дослідження є просторова структура (архітектоніка) і оптичні властивості композитних мікро- та наноструктур, що містять металеві фрагменти, та фізичні моделі, які їх описують.

Методи дослідження – моделювання та оптимізація досліджуваних періодичних та багат шарових мікро- та наноструктур проводились за допомогою асимптотично точного методу зв'язаних хвиль, точного матричного методу та методу скінченних елементів. Теорія розсіювання Мі, теорія електропровідності металів Друде, теорії ефективного середовища Максвелла-Гарнетта та метод дипольної еквівалентності були використані для дослідження оптичних характеристик металевих наночастинок та композитних матеріалів. Експериментальні дані одержані з використанням стандартних методик та сучасних методів досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертації розв'язано низку завдань, які у сукупності вирішили науково-технічну проблему фізики твердого тіла, а саме встановлено роль специфічних резонансних явищ взаємодії електромагнітного випромінювання із твердотільними мікро- та наноструктурами, проведено комплексні дослідження, що включають моделювання таких взаємодій з мікро/наноструктурами та їх експериментальну верифікацію, що стало основою для розроблення та виготовлення окремих елементів сучасної сенсорної електроніки.

Новими є такі наукові результати:

1. Вперше вивчено спектр пропускання для хвиль ТЕ поляризації багат шарової структури діелектричний шар/металева ґратка/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 широко смуговим 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 ґратки.

2. Вперше 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. Встановлено, що тангенціальні складові напруженості поля на срібних нанодротах в декілька разів більші, ніж поля на нанодротах із золота. Такі структури можуть використовуватися як чутливі елементи сенсорів реєстрації зміни показника заломлення навколишнього середовища.

3. Вперше на основі експериментальних даних запропоновано аналітичне представлення діелектричних проникностей металів (золото, срібло, мідь та алюміній) в широкому спектральному діапазоні, за допомогою яких додатково підтверджено, що зміною товщини оболонки металу на діелектричному чи напівпровідниковому ядрі можна налаштувати спектральне розташування піку поверхневого плазмонного поглинання в інтервалі довжин хвиль видимої і ближньої інфрачервоної області спектру. Оцінено вплив відносної діелектричної проникності навколишнього середовища на оптичні резонансні характеристики таких наноструктур.

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

узгоджується з експериментальними даними. Встановлено визначальний вплив об'ємної концентрації срібла та діелектричної проникності матриці на спектральне положення піку плазмонного поглинання. Показано, що температура відпалу такого нанокompозиту призводить до утворення додаткової смуги поглинання за рахунок дипольної та квадрупольної природи колективних плазмонних мод металевих нановключень, що утворилися в результаті термічної модифікації, а двосмуговий плазмонний резонанс може бути використаний також для виготовлення сенсорних елементів.

5. Удосконалено 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 ґратки, а також, завдяки новому представленню функціональної залежності діелектричної проникності матеріалу періодичної структури у вигляді модифікованого комплексного ряду Фур'є, що дозволяє в простій математичній формі визначити умови виникнення резонансних ефектів в періодичних мікро-та наноструктурах сучасної оптоелектроніки.

6. Встановлені 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 навколишнього середовища можна отримати в призмовій структурі без хвилеводного шару при реалізації поверхневого плазмон-поляритонного резонансу. Чутливість зростає при зменшенні показника заломлення матеріалу призми, причому цей висновок стосується обох типів поляризації. Чутливість, яка визначається за зміною кута мінімального відбивання в залежності від показника заломлення, є вищою для хвиль TE поляризації, ніж для TM поляризації, і вона зростає при наближенні кута мінімального відбивання до кута повного внутрішнього відбивання.

7. Встановлено оптимальні параметри металізованих ґраток як елементів сенсорів реєстрації зміни показника заломлення та структур для раманівської спектроскопії. Показано, що сенсорні елементи на основі ґраток з арсеніду галію, покритих тонким шаром золота, є більш чутливими до зміни показника заломлення рідкого середовища у порівнянні з газовим середовищем. Використання полікарбонатних прямокутних ґраток, покритих шаром золота, дозволяє отримати максимальне підсилення сигналів комбінаційного розсіяння світла у 10^4 разів.

8. Розвинуто знання про хвилеводно-резонансні ґраткові структури як елементи окремого класу сенсорної електроніки, яке полягає у тому, що спектри відбивання характеризуються високим коефіцієнтом відбивання у вузьких спектральних смугах, причому при нормальному падінні наявний один пік і два піки при падінні променя під кутом. Встановлено особливі закономірності спектральної чутливості: зміщення другого піку в спектрі відбивання менш чутливе до зміни певних структурних параметрів і більш чутливе до зміни показника заломлення навколишнього середовища.

Практичне значення одержаних результатів є наступним. Детально представлено математичне формулювання точної системи рівнянь зв'язаних хвиль та алгоритму S-матриці, які адаптовані до простої матричної форми для використання у сучасних мовах програмування чи стандартному математичному програмному забезпеченні, дозволяє легко проводити моделювання спектральних характеристик мікро- та наноструктур та елементів на їх основі, що спрощує апаратний та зменшує часовий ресурси. Запропоноване нове представлення функціональної залежності діелектричної проникності матеріалу періодичної структури в точному методі зв'язаних хвиль приводить до зменшення осциляцій в залежностях коефіцієнтів відбивання та пропускання від кількості використаних зв'язаних хвиль, а також покращується збіжність комп'ютерного розрахунку. Розуміння та вивчення фізики 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 дає можливість запропонувати і створити різноманітні твердотільні елементи сенсорної електроніки на основі мікро- і наноструктур. Найбільш вірогідним є застосування нанограток, в яких можливий широкосмуговий резонанс локалізованих поверхневих плазмонів при взаємодії з електромагнітним полем. Тут можливе підсилення поля в декілька сотень разів, що можна ефективно використати в системах підсилення комбінаційного розсіяння світла, які мають важливі застосування в біологічних науках. Зміна параметрів ґратки, навколишнього 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 різноманітних сенсорів. Багатошарова структура діелектричний шар/металева ґратка/діелектричний шар/підкладка може бути успішно 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; застосовувати їх в задачах фотокаталізу у біотехнологіях та медицині, перетворенні сонячної енергії, а також в галузі сенсорної електроніки.

Значна увага в роботі приділена реалізації та дослідженню нанооб'єктів у вигляді наночастинок, нанооболонки та нанокомпозитних матеріалів, що дає можливість керувати положенням піку поглинання поверхневого плазмона чи плазмон-поляритона у видимій та ближній інфрачервоній області спектру. Слід зазначити, що відпал нанокомпозитного матеріалу спричиняє появу додаткового плазмонного піку і це явище може бути корисним у різних застосуваннях. Зокрема, це може призвести до підсилення комбінаційного розсіяння світла. Двосмуговий плазмонний резонанс може бути використаний також для виготовлення хімічних сенсорів, а звуження ширини плазмонних піків призводить до збільшення роздільної здатності сенсора.

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».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно, здійснено вибір наукового напрямку досліджень, запропоновано мету та завдання роботи, вибрано об'єкт і предмет досліджень, здійснено пошук, аналіз та систематизацію літературних даних щодо основних напрямків, переваг і досвіду застосування резонансних мікро-та наноструктур в задачах аналізу і синтезу оптико-електронних систем. У працях, опублікованих у співавторстві, авторові належать: у роботах [330, 331, 337, 341] – вдосконалення асимптотично точного методу зв'язаних хвиль шляхом нового представлення зв'язку між векторами електричних і магнітних полів за допомогою додаткових постійних коефіцієнтів та S-матриць; у роботах [347, 348] – моделювання спектральних характеристик ґраткових структур за допомогою модифікованого асимптотично точного методу зв'язаних хвиль; у роботах [359, 367–369] – проведення числового моделювання багатопарових хвилеводних структур; у роботах [381, 382, 386–389, 391, 394] – дослідження хвилеводно-резонансних характеристик та резонансу поверхневих плазмон-поляритонів у призмових структурах; у роботах [397, 398] – дослідження впливу температури на оптичний відгук призмового сенсора; у роботі [406] – моделювання спектральних характеристик хвилеводної ґратки як сенсорного елемента; у роботах [355, 413 – 416, 418] – дослідження аномально високого пропускання ґратковими структурами; у роботах [417 – 420] – моделювання спектральних характеристик металевих нанодротів, періодично розміщених на діелектричній підкладці; у роботах [436, 437, 439, 441, 442, 446 – 448] – моделювання спектральних характеристик металевих наночастинок та нанооболонки; у роботах [452, 454, 455, 457 – 463, 470, 475] – моделювання ефективної діелектричної проникності нанокомпозитних матеріалів та їх спектральних характеристик в залежності від розміру, форми та концентрації нановключень; у роботах [476, 479] – моделювання одновимірних та двовимірних періодичних структур на основі нанокомпозитного матеріалу; у роботі [483] – моделювання спектрів відбивання прямокутних ґраток; у роботах [488, 490, 492] – оптимізація геометричних параметрів сенсорних елементів на основі металізованих ґраток; у роботах [496–498] – моделювання спектральних характеристик ґраткових структур.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на вітчизняних і міжнародних наукових конференціях, семінарах та школах, з них особисто здобувачкою у формі усних та стендових доповідей: NATO International School of Atomic and Molecular Spectroscopy, Course “Bio-photonics Spectroscopy, Imaging, Sensing and Manipulation” (Erice, Sicily, Italy: 2-17.07.2009), 14th International Conference School Advanced Materials and Technologies (Palanga, Lithuania: 27-31.08.2012), Summer School 2012 on Nano-Photonic (Bad Herrenalb, Germany: 10-13.09.2012), International Conference EMRS (Strasbourg, France: 27-31.05.2013), NATO International School of Atomic and Molecular Spectroscopy, Course “Nano-structures for optics and photonics” (Erice, Sicily, Italy: 4-19.07.2013), 15th

International Conference-school “Advanced Materials and Technologies” (Palanga, Lithuania: 27-31.08.2013), International Conference NanotechItaly’2013 (Venice, Italy: 27-29.11. 2013), 4th International Conference on Nanotechnology and Biosensors(ICNB 2013) (Paris, France: 19-22.12. 2013), Conference organized by Research Council of Lithuania under the project “Postdoctoral Fellowship implementation in Lithuania” (Vilnius, Lithuania: 26-28.02.2014), International Conference “Nanotechnology and Nanomaterials –2014” NANO-2014 (Lviv, Ukraine: 27-30.08.2014), NATO International School of Atomic and Molecular Spectroscopy, Course “Nano–optics: principles enabling basic research and applications”(Erice, Sicily, Italy: 4-19.07.2015), International Conference “Nanotechnology and Nanomaterials –2015” NANO-2015 (Lviv, Ukraine: 26-29.08.2015), XIIth International Conference “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science” (TCSET’2016)(Lviv-Slavsko, Ukraine: 23 – 27.02.2016), 13th International Conference on Laser and Fiber Optical Networks Modeling LFNМ*2016 (Odessa, Ukraine: 13–15.08.2016), 7th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers CAOL*2016 (Odessa, Ukraine: 12–15.08.2016), International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials (NANO 2016 (Lviv, Ukraine: 24-27.08.2016), IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology ELNANO-2017 (Kyiv, Ukraine: 18-20.04.2017), IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), (Kyiv, Ukraine: 29.05-02.04.2017), International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials NANO 2017 (Chernivtsi, Ukraine: 23-26.08. 2017), IX-а Українсько-польська науково-практична конференція «Електроніка та інформаційні технології», ЕЛІТ-2017 (Львів-Чинадієво:28–31.08.2017), 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET’2018)(Lviv-Slavsko, Ukraine: 20- 24.02.2018)

Публікації. 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 напрямку, з якого підготовлена дисертація, включених до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, 2 розділах у книгах та збірках наукових праць, виданих за кордоном, які включено 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.

Структура та обсяг дисертації. 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми, її зв’язок з науковими програмами, сформульована мета і визначені завдання досліджень, показано

наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувачки та наведено дані про апробацію результатів дисертаційних досліджень і публікації за матеріалами дисертації, подано короткий опис структури і обсягу дисертації.

У **першому розділі** зроблено аналіз науково-технічної літератури, яка стосується аналізу фізичних аспектів моделювання та створення композитних мікро- та наноструктур для сучасних практичних застосувань.

Описано і проаналізовано основні напрямки, переваги і досвід застосування резонансних мікро-та наноструктур в задачах аналізу і синтезу оптико-електронних систем; сучасний стан методів досліджень та проблем вдосконалення наявних і створення нових ефективних засобів фотоніки та сенсорної електроніки, а також можливі напрямки та методи покращення експлуатаційних характеристик твердотільних елементів.

Показано, що виходячи за межі макроскопічних ефектів плазмонної дії, пов'язаних лише з підсиленням електромагнітного поля, основне завдання полягає в тому, щоб зрозуміти, визначити кількісні показники та отримати контроль над фундаментальними фізико-хімічними процесами, що виникають в резонансних умовах. Оскільки контролювання резонансних процесів в наноструктурах є необхідним для розроблення основ архітектури і синтезу спеціальних плазмонних елементів в різноманітних сучасних застосуваннях нанофотоніки, оптоелектроніки, каталізу, фотохімії, біофотоніки та енергетики.

Проведено огляд основних напрямків, переваг і досвіду застосування резонансних мікро- та наноструктур в задачах аналізу і синтезу оптико-електронних систем. Показано, що в призмових структурах, як елементах сенсорних систем, високу чутливість можна отримати, оптимізуючи їх оптичні та геометричні параметри. Встановлено, що ґраткові структури, в яких виникають резонансні явища у вузькому спектральному діапазоні, демонструють екстраординарні характеристики і можуть служити основою для розробки оптичних фільтрів нового типу, а також різноманітних сенсорів фізичних величин. Розглянуто технологічні підходи застосування металевих наночастинок та нанокомпозитних матеріалів, оскільки підсилення ближнього поля навколо металевих наноструктур, індуковане опроміненням у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах, дозволяє використовувати їх у різних прикладних задачах оптоелектроніки.

Розглянуто сучасний стан методів дослідження та проблем вдосконалення наявних і створення нових ефективних пристроїв сенсорної електроніки. Показано, що задача розроблення теоретичних моделей взаємодії електромагнітного випромінювання та методики комп'ютерного моделювання ґраткових, призмових та хвилеводних структур, наночастинок та нанооболонки, композитних матеріалів, а також створення числових алгоритмів і конкретних програм розрахунку їх різноманітних фізичних параметрів, залишається актуальною. Це стосується, в першу чергу, адаптації вже розроблених чисельних методів розв'язку задач з метою дослідження, вдосконалення та розроблення нових пристроїв електроніки та фотоніки.

В **другому розділі** подано математичні моделі дослідження взаємодії

електромагнітного випромінювання з мікро- та наноструктурами. Математичне формулювання точної системи рівнянь зв'язаних хвиль та алгоритму S-матриці детально представлені та адаптовані до простої матричної форми для використання на сучасній мові програмування. Для цього було отримано набір матричних зв'язків:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{G}_1(0) \\ \mathbf{F}_1(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{11}^{(m)} & \mathbf{R}_{12}^{(m)} \\ \mathbf{R}_{21}^{(m)} & \mathbf{R}_{22}^{(m)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{C}_1^{(1)} \\ \mathbf{C}_2^{(m)} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{G}_m(d_m) \\ \mathbf{F}_m(d_m) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_{11}^{(m)} & \mathbf{T}_{12}^{(m)} \\ \mathbf{T}_{21}^{(m)} & \mathbf{T}_{22}^{(m)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{C}_1^{(1)} \\ \mathbf{C}_2^{(m)} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де \mathbf{G}_j і \mathbf{F}_j – це вектори електричного та магнітного полів, $\mathbf{R}_{ij}^{(m)}$ та $\mathbf{T}_{ij}^{(m)}$ – це субматриці, що характеризують ґратку в межах товщини d_m , де діелектрична стала не залежить від координати z , $\mathbf{C}_1^{(1)}$, $\mathbf{C}_2^{(m)}$ є невідомими константами, які визначаються разом з амплітудами відбивання та пропускання, прирівнюючи тангенціальні складові електричного і магнітного полів на двох границях ($z = 0$ і $z = d$).

Таке представлення забезпечило стабільний алгоритм для обчислення пропускання та відбивання періодичних структур.

Чисельні результати, отримані з використанням вдосконаленого методу, порівнювалися з результатами, наведеними в літературних джерелах, та були використані для моделювання реальної структури (див. рис. 1). Теоретично розраховане пропускання та відбивання за допомогою запропонованого методу демонструють 95,69 % та 78,91 % збіжності (коефіцієнт детермінації R^2) з експериментальними даними, тоді як комерційне програмне забезпечення дає 95,63 % для GSolver і 95,62 % і 78,90% для PCGrate.

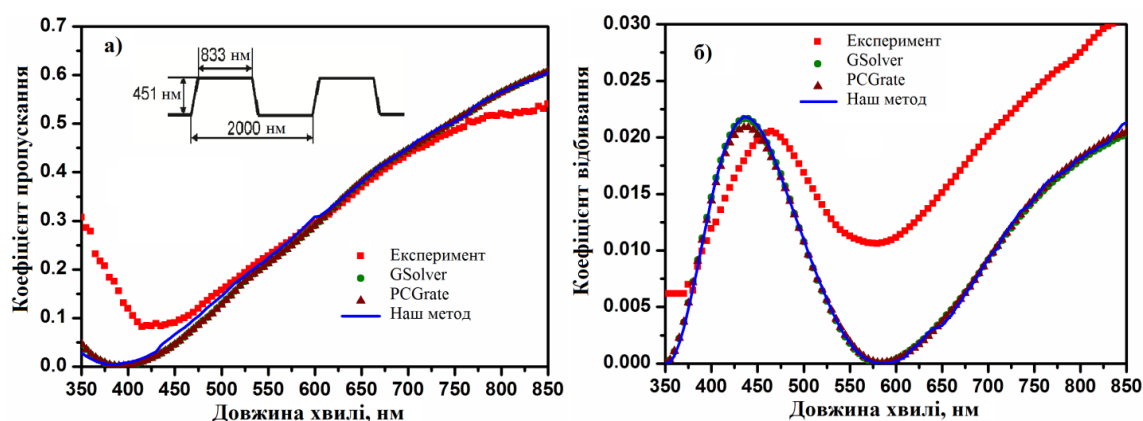


Рис. 1. Експериментальні та теоретично розраховані спектри пропускання (а) та відбивання (б) для ґратки трапецеподібного рельєфу (див. вставку).

Оцінка точності асимптотично точного методу зв'язаних хвиль показала, що для металевих ґраток з вузькими щілинами (прямокутний рельєф) у випадку дифракції хвиль ТЕ поляризації за наявності резонансу залежність пропускання від кількості використаних зв'язаних хвиль монотонно прямує до певного

значення з похибкою $O(1/N^3)$, а для хвиль ТМ поляризації – з похибкою, яка осцилює відносно асимптотичного значення в межах $\pm O(1/N^2)$. У випадку діелектричної рельєфної ґратки похибка для обох поляризацій монотонно зменшується за виразом $O(1/N^3)$.

Запропоновано нове представлення функціональної залежності діелектричної проникності матеріалу періодичної структури у вигляді модифікованого комплексного ряду Фур'є (див. рис. 2). Для періодичної структури металева ґратка на діелектричній підкладці (металеві нанодропи на діелектричній підкладці) при факторі заповнення $F=0.5$ за умови збудження резонансу поверхневих локалізованих плазмонів при новому представленні діелектричної проникності в ряд Фур'є є суттєве зменшення осциляцій коефіцієнтів пропускання, відбивання та поглинання. Крім цього ці осциляції зменшуються з ростом кількості зв'язаних хвиль N (див. рис. 3). Для традиційного представлення діелектричної проникності в ряд Фур'є осциляції поглинання суттєво більші і повільно збільшуються з ростом N . Резонансні явища в діелектричних ґратках супроводжуються резонансом хвилеводних мод. Тому важливо знати постійні поширення хвилеводних мод, за величиною яких можна наближено визначити довжину хвилі, на якій виникає резонанс.

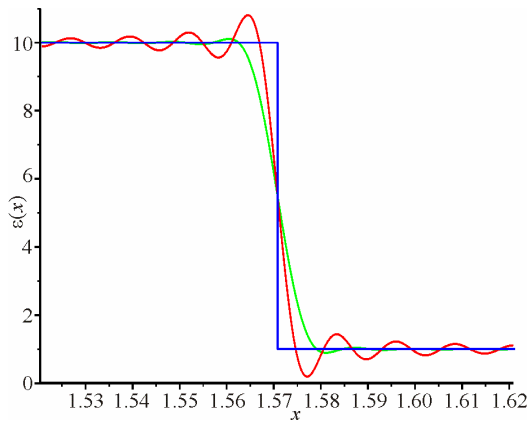


Рис. 2. Зображення функціональної залежності діелектричної проникності частини прямокутної ґратки, її представлення у вигляді традиційного ряду Фур'є (червоний колір) та у вигляді модифікованого ряду Фур'є (зелений колір) при таких параметрах: $A=2\pi$, $F=0.5$, $N=501$, $\varepsilon_{21}=1.0$, $\varepsilon_{22}=10$

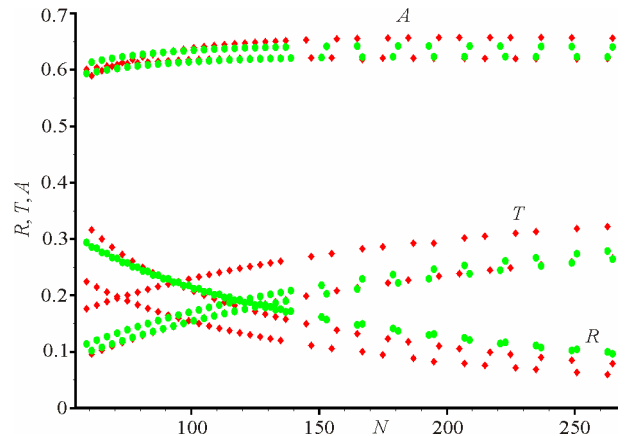


Рис. 3. Залежність відбивання (R), пропускання (T), поглинання $A=1-R-T$ від кількості використаних зв'язаних хвиль. Червоний колір – елементи матриць Гепліца розраховуються у вигляді традиційного ряду Фур'є, зелений колір – у вигляді модифікованого ряду Фур'є

Досліджено новий чисельний метод розв'язку хвильового рівняння для багатосарового планарного хвилеводу. Метод ґрунтується на використанні Фур'є перетворення в хвильовому рівнянні та його розв'язку в частотній області за допомогою чисельного методу. Проблема визначення постійних поширення хвилеводних мод у градієнтних планарних хвилеводах є аналогічною до розв'язку одновимірного стаціонарного рівняння Шредингера для визначення дискретних рівнів енергії та відповідних хвильових функцій квантоворозмірних періодичних структур типу квантових ям.

В завершенні цього розділу наведено математичні моделі взаємодії лазерного випромінювання з наночастинками металів та нанокомпозитними матеріалами.

У **третьому розділі** проведено дослідження резонансних явищ в призмових структурах. Показано, що призмову структуру, яка містить два діелектричні шари з різними показниками заломлення, можна розглядати як планарний хвилевід. У випадку такої призмової структури інтенсивне збуджуюче випромінювання з малою довжиною хвилі буде поглинатися в досліджуваному середовищі, внаслідок чого його показник заломлення стане комплексною величиною з додатною уявною частиною. Тут буде виникати люмінесценція з одночасним підсиленням, причому певна довжина хвилі буде в призмі поширюватися під певним кутом.

У призмовій структурі, що містить металевий та діелектричний шари, у разі ретельно підібраних параметрів виникає резонанс хвилеводних мод, причому для обох поляризацій, або резонанс плазмон-поляритонів для хвиль ТМ поляризації. Знову ж таки, при ретельно підібраних параметрах структури при резонансах плазмон-поляритонів чи хвилеводних мод можна досягнути коефіцієнта відбивання лазерного пучка від металевої плівки близького до нуля (див. рис. 4).

При зменшенні товщини діелектричного шару мінімуми коефіцієнта відбивання за рахунок резонансу хвилеводних мод будуть зміщуватись вліво на кутовій залежності, а кількість мінімумів коефіцієнта відбивання зменшуватися, аж поки зовсім не зникнуть. Причому, це характерно для обох поляризацій. Проте, мінімум відбивання для хвиль ТМ поляризації, що виникає завдяки резонансу поверхневих плазмон-поляритонів, не зникає при зменшенні товщини діелектричного шару.

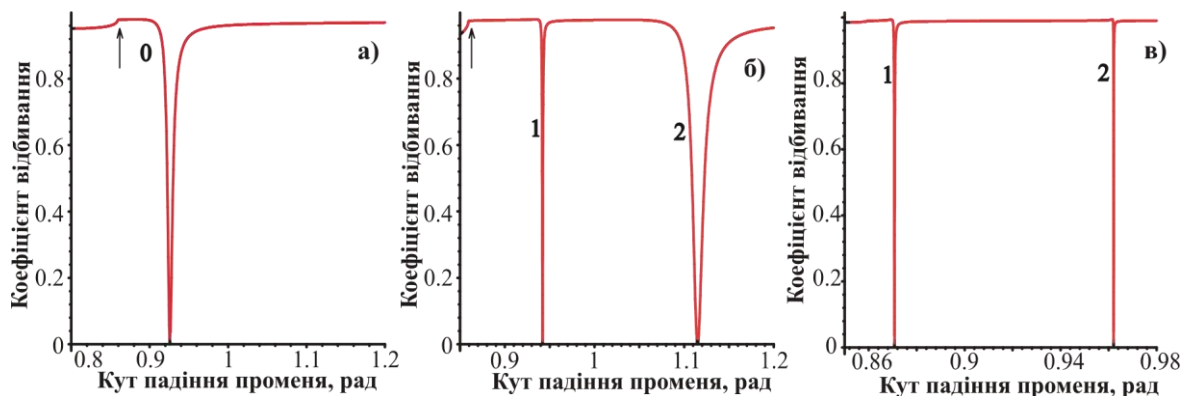


Рис. 4. Залежності коефіцієнта відбивання від кута падіння пучка на металеву плівку: а) ТМ поляризація, товщина діелектрика рівна нулю, б) ТМ поляризація, товщина діелектрика 0,8 мкм, в) ТЕ поляризація, товщина діелектрика 0,8 мкм

Чутливість для плазмон-поляритонного резонансу за відсутності діелектричного шару (рис. 4а) складає 1,12 рад. Але чутливість за рахунок плазмон-поляритонного резонансу при наявності діелектричного шару товщиною 0,8 мкм різко зменшується і практично рівна нулю (мінімум 2 рис. 4б). Це можна пояснити тим, що при плазмон-поляритонному резонансі електромагнітне поле швидко зменшується при відході від металевої плівки.

Тому поле в навколишньому середовищі буде дуже низьким при наявності діелектричного хвилеводу, і тим самим зміна показника заломлення навколишнього середовища практично не впливає на поширення електромагнітного поля в призмівій структурі за наявності діелектричного шару. Мінімум 1 на рис. 4б формується за рахунок хвилеводного резонансу в діелектричному шарі. В цьому випадку електромагнітне поле є приблизно однаковим в поперечному перерізі хвилеводу і починає швидко зменшуватися в навколишньому середовищі при відході від межі діелектрик – рідина. Тому слід очікувати певної чутливості кута мінімального відбивання до зміни показника заломлення досліджуваного середовища. Для даного випадку чутливість складає 0,1 рад, тобто на порядок менша ніж при плазмон-поляритонному резонансі. Це знову можна пояснити тим, що поле на межі діелектрик – рідина у випадку хвилеводного резонансу є меншим ніж поле на межі метал – рідина у випадку плазмон – поляритонного резонансу. Для хвиль TE поляризації у призмівій структурі різкого мінімуму коефіцієнта відбивання від металевій плівки можна досягнути при резонансі хвилеводної моди (мод), який може виникнути лише при наявності між металевією плівкою та досліджуваною рідиною діелектричного шару, причому товщиною більше певної величини. Чутливість для другого мінімуму (рис. 4в) складає 0,0423 рад, а для першого мінімуму – 0,32 рад. Така велика відмінність у величині чутливості для двох мінімумів пояснюється тим, що перший мінімум розміщується ближче до кута повного внутрішнього відбивання ніж другий мінімум. Крім того встановлено, що чутливість зростає при зменшенні показника заломлення матеріалу призми, причому цей висновок стосується обох типів поляризації, та є вищою для хвиль TE поляризації ніж для TM поляризації.

Теоретично та експериментально досліджено характеристики чутливого елемента сенсора зміни показника заломлення, що працює на явищі поверхневого плазмон-поляритонного резонансу. Проведено дослідження впливу різних параметрів на положення кута поверхневого плазмонного резонансу та на значення коефіцієнта відбивання в мінімумі. Показано, що такого типу сенсори є більш чутливими до зміни показника заломлення рідкого середовища ніж газового.

Проведено детальний аналіз температурної залежності чутливості сенсора, що працює на явищі поверхневого плазмон-поляритонного резонансу. Показано, що температура впливає на зміну кута резонансу та зміну форми резонансних кривих. Фізичні причини таких явищ були представлені в термінах зміни властивостей складових матеріалів сенсора, зокрема тонкої плівки металу та призми, причому вплив температури на тонку металеву плівку має вирішальну роль у результуючій кривій відбивання.

Четвертий розділ присвячений вивченню резонансних явищ в ґраткових мікро- та наноструктурах та їх застосування в сучасних приладах сенсорної електроніки.

У цій частині роботи увагу зосереджено на структурі, яка складається з одновимірної ґратки, виготовленої сухим травленням в алмазоподібній вуглецевій плівці на підкладці з плавненого кварцу. Така структура має два

резонансні піки в спектрах відбивання при падінні світлового променя під кутом (див. рис. 5). Результати моделювання вказують на те, що для нормального падіння світлової хвилі очікується одиничний пік відбивання на довжині хвилі 637 нм, тоді як для кута падіння 10° очікуються два резонансні піки на довжинах хвиль 573 нм і 703 нм, при 15° – на 544 нм і 737 нм та при 20° – на 516 нм і 771 нм. Результати експерименту показують, що при нормальному падінні один пік знаходиться на довжині хвилі 656 нм, при куті падіння променя 10° отримано два резонансні піки – 594 нм і 716 нм, при 15° – два резонансні піки на 565 нм та 748 нм, а при 20° – два резонансні піки на 537 нм і 781 нм. Відстань між піками при різних кутах падіння (наприклад, відстань між положенням першого піка у спектрі відбивання, вимірюваного при кутах падіння 10° і 15° , 15° та 20° та ін) співпадає для теоретичних та експериментальних результатів. Вона збільшується зі збільшенням кута падіння для обох (розрахованих та експериментальних) випадків.

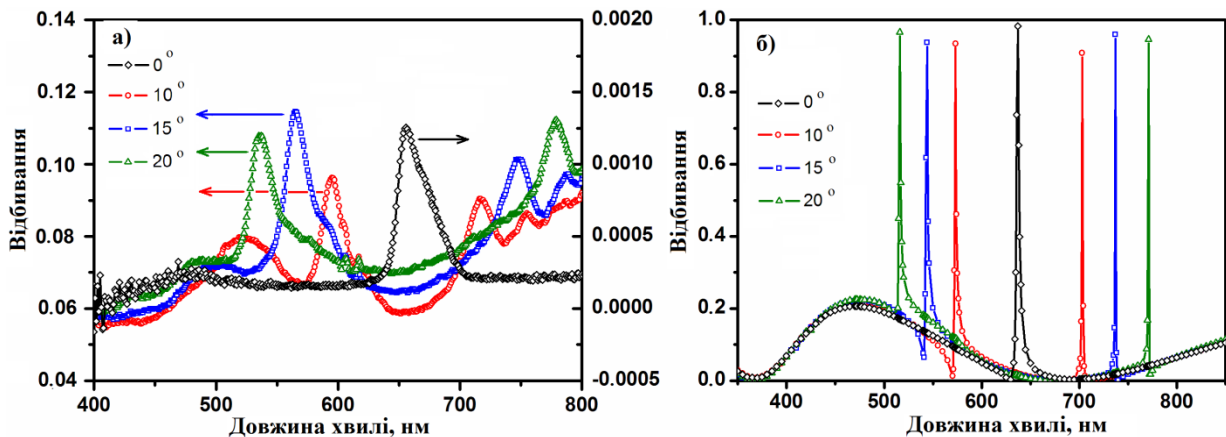


Рис. 5. Спектри відбивання при різних кутах падіння променя: а) експериментальні результати; б) чисельні результати

Для того, щоб дослідити можливість використання запропонованої хвилеводної ґратки в якості сенсора, розраховано залежність коефіцієнта відбивання від довжини хвилі при різних показниках заломлення навколишнього середовища (див. рис. 6а) та залежність положення піків відбивання від показника заломлення навколишнього середовища (див. рис. 6б). Слід зазначити, що другий пік більш чутливий до зміни оптичних констант навколишнього середовища, ніж перший, як показано на рис. 6б. Крім того, зміщення другого піку в спектрі відбивання менш чутливе до зміни певних структурних параметрів і є більш чутливим до зміни показника заломлення досліджуваного середовища.

Досліджено спектральні характеристики одновимірних дифракційних ґраток в умовах ТЕ і ТМ поляризацій та структур на їх основі. Показано, що резонансне пропускання для ТМ поляризації досягається за рахунок хвилеводного ефекту і збудження плазмон-поляритонів на металевих поверхнях за рахунок металевої ґратки, що робить невелике збурення в площині металу. Коефіцієнт пропускання зменшується, коли збільшується поглинання в ґратці в результаті плазмонного резонансу.

Хвильоводний ефект для ТМ поляризації в середині щілини можливий для будь-якої ширини вузької щілини і він може забезпечити аномально високий коефіцієнт пропускання. Резонансне пропускання для ТЕ поляризації відбувається тільки за рахунок хвильоводного ефекту та існує мінімальна ширина щілини, де можливі хвильоводний ефект і високе пропускання ґратки.

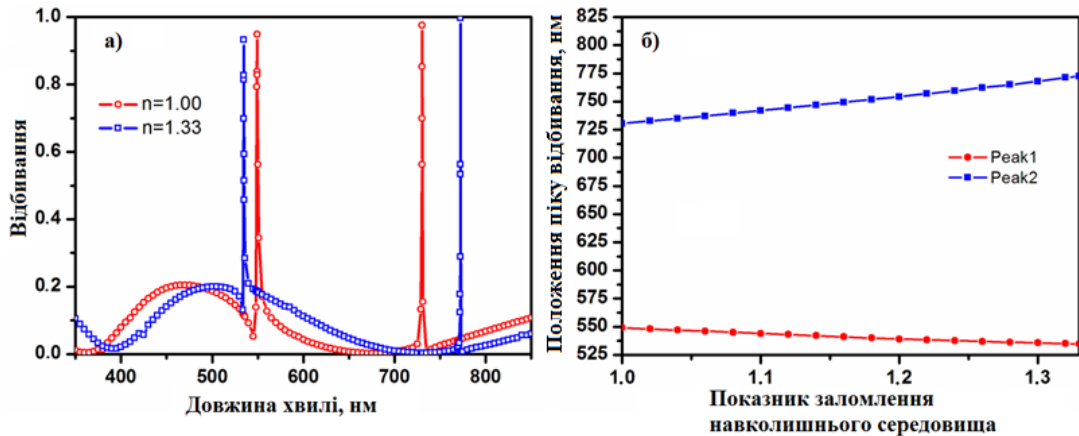


Рис. 6. Приклади зсуву положення піків відбивання внаслідок зміни показника заломлення навколишнього середовища (а). Залежність положення піків відбивання від показника заломлення навколишнього середовища (б). Кут падіння хвилі становить 14°

Пропускання металевої ґратки, розміщеної між двома шарами діелектрика, є високим для певної довжини хвилі, зокрема, для ТЕ поляризації. Період і товщина металевої ґратки, товщина діелектричних шарів, показники заломлення ґратки і діелектричних шарів є основними параметрами, які контролюють положення піків і амплітуд пропускання. Ця структура може бути використана для конструювання селективного ширококутового фільтра для інфрачервоної області спектра (див. рис. 7).

Аномально високе пропускання реалізується на довжині хвилі, яка відповідає двом резонансам: хвильоводному резонансу в діелектричних шарах та резонансу в діелектричній щілині металевої ґратки. Два хвильоводи (вони ж резонатори) зв'язані між собою через щілину, і величина коефіцієнта зв'язку визначається висотою щілини (товщиною ґратки). Високе пропускання тут досягається за рахунок того, що з допомогою ґратки над щілиною у діелектричному шарі формується інтенсивне поле, яке призводить до просочування енергії поля через щілину. Для хвиль ТМ поляризації такий механізм досягнення високого пропускання неможливо реалізувати, оскільки навіть для щілини, ширина якої набагато менша довжини хвилі, постійна поширення має малу уявну частину. Тому

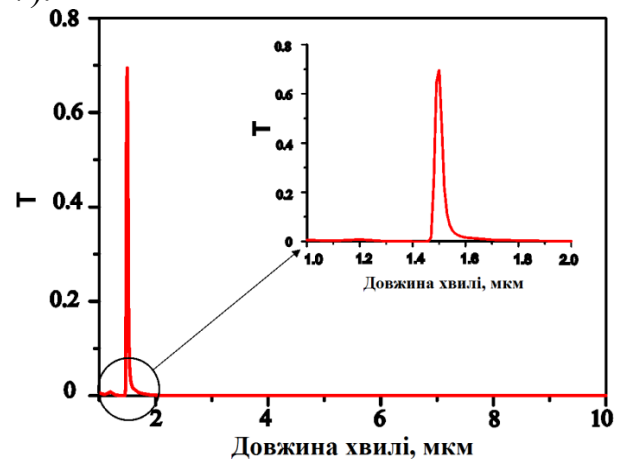


Рис. 7 Спектр пропускання металевої ґратки, розміщеної між двома шарами діелектрика з товщиною шару діелектриків $0,1204$ мкм і товщиною ґратки $0,2$ мкм

наявність діелектричних шарів лише зменшує коефіцієнт пропускання періодичної структури за рахунок поширення хвилі в діелектричних шарах як у хвилеводі, що призводить до додаткових втрат електромагнітної енергії при взаємодії поля з металевою поверхнею.

Досліджено наногратки з періодично розташованих нанодротів квадратного перерізу $50 \times 50 \text{ нм}^2$ зі срібла та золота на діелектричній підкладці, щоб бачити якісні та кількісні відмінності для цих двох металів. На рис. 8 наведені спектральні залежності коефіцієнтів відбивання, пропускання та поглинання ґраток із золота та срібла в спектральних діапазонах 290...700 нм та 290...500 нм відповідно. Для золота маємо один широкий резонанс з максимумом 0.465 в спектрі поглинання на довжині хвилі 530 нм, а для срібла, через малу уявну частину діелектричної проникності, “широкий” резонанс розщеплюється на декілька вузьких піків поглинання, один з яких рівний 0.78 на довжині хвилі 379 нм.

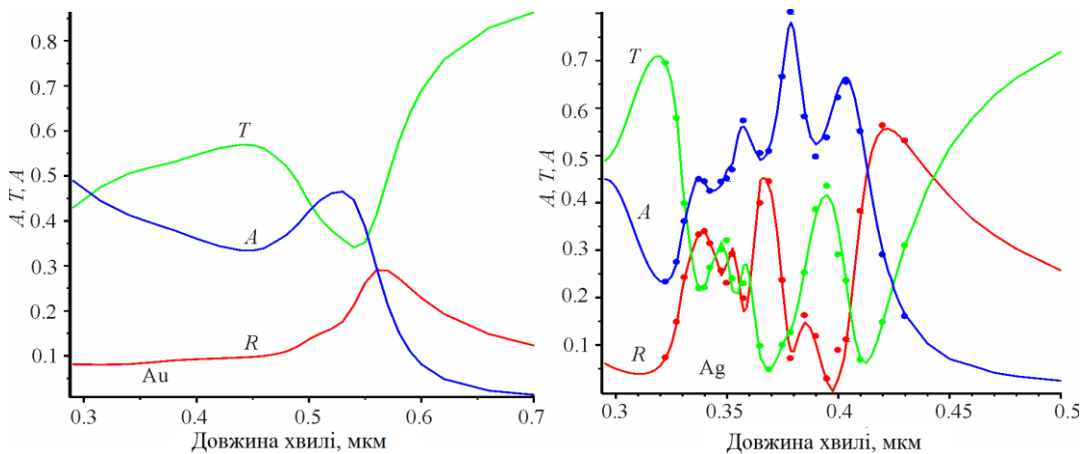


Рис. 8. Спектральні залежності коефіцієнтів відбивання (червоний колір), пропускання (зелений колір) та поглинання (синій колір) ґраток із золота та срібла при параметрах ґраток $d=50 \text{ нм}$, $\epsilon_1 = \epsilon_{21} = 1$, $\epsilon_3 = 2.25$, $L = 0.1 \text{ мкм}$

Таке розщеплення “широкого” резонансу для нанограток зі срібла на декілька вузьких піків можна пояснити тим, що розсіяння на нанодротах зі срібла є значно сильнішим ніж розсіяння на нанодротах із золота, що узгоджується з тим, що диференціальний переріз розсіяння оптичної хвилі на сферичних наночастинках зі срібла є більшим ніж переріз на частинках із золота. Резонанс плазмонів для ґраток із золота та срібла проявляється по різному завдяки тому, що уявна частина показника заломлення срібла є суттєво менша за уявну частину показника заломлення золота в спектральних областях прояву резонансу. Крім того встановлено, що максимальна напруженість поля для срібла є більшою ніж для золота майже у вісім разів. Максимальне поле формується на межі метал-діелектрик на поверхні підкладки ($z=d$) у вузькій координатній області.

У **п'ятому розділі** на основі експериментальних вимірювань діелектричної проникності в діапазоні 0,3...2 мкм для срібла та золота, 0,3...4,2 мкм для міді і 0,1...2 мкм для алюмінію знайдені аналітичні вирази для їх опису. Причому, весь спектральний діапазон (за виключенням уявної частини діелектричної проникності срібла) розбивався на декілька інтервалів. Для кожного інтервалу

довжин хвиль підбирались відповідні функції, переважно у вигляді поліномів. Відбір функції на кожному інтервалі здійснювався функцією Хевісайда. Для прикладу, дійсну частину спектральної залежності діелектричної проникності золота на всьому діапазоні можна відобразити за допомогою чотирьох функцій у вигляді поліномів:

$$\begin{aligned} r_1(\lambda) &= -0.485 - 400(\lambda - 0.34)^2, \\ r_2(\lambda) &= -1.0955 - 5(\lambda - 0.42) - 4.9(\lambda - 0.42)^2, \\ r_3(\lambda) &= -1.3461 - 1300(\lambda - 0.47)^2, \\ r_4(\lambda) &= -2.5161 - 67(\lambda - 0.5) - 35(\lambda - 0.5)^2 - 4.9(\lambda - 0.5)^4 + 0.7(\lambda - 0.5)^6. \end{aligned} \quad (3)$$

Як наслідок, дійсну частину діелектричної проникності золота можна записати з використанням функції Хевісайда таким чином:

$$\Re(\varepsilon) = r_1(\lambda)[H(\lambda - 0.29) - H(\lambda - 0.37)] + r_2(\lambda)[H(\lambda - 0.37) - H(\lambda - 0.47)] + r_3(\lambda)[H(\lambda - 0.47) - H(\lambda - 0.5)] + r_4(\lambda)[H(\lambda - 0.5) - H(\lambda - 0.2066)]. \quad (4)$$

Для опису уявної частини діелектричної проникності золота достатньо використати такі дві функції:

$$\begin{aligned} g_1(\lambda) &= 5.99 - 1.2(\lambda - 0.36) + 170(\lambda - 0.36)^2 - 23000(\lambda - 0.36)^4, \\ g_2(\lambda) &= 0.27 + 1.4(\lambda - 0.46) + 0.5(\lambda - 0.46)^2 + 1.6(\lambda - 0.46)^3 + 5 \exp(-16(\lambda - 0.46)). \end{aligned} \quad (5)$$

Тоді спектральну залежність уявної частини діелектричної проникності золота можна записати так:

$$\Im(\varepsilon) = g_1(\lambda)[H(\lambda - 0.29) - H(\lambda - 0.46)] + g_2(\lambda)[H(\lambda - 0.46) - H(\lambda - 0.2066)]. \quad (6)$$

Спектральні залежності діелектричної проникності золота відображені на рис. 9.

Слід також зауважити, що аналітична функція на усьому спектральному діапазоні є неперервною. Таке аналітичне представлення дуже зручно використовувати при різноманітних розрахунках у широкому спектральному діапазоні взаємодії електромагнітного випромінювання з наночастинками відповідних металів чи з періодичними структурами, у складі яких є ці метали.

Проведено дослідження спектральних характеристик окремих металевих наночастинок в умовах плазмонного резонансу. Встановлено, що для наночастинок сферичної форми зі збільшенням радіусу спектр випромінювання переміщується в область більших довжин хвиль. При різних значеннях довжини хвилі, які відповідають довжинам хвиль плазмонного резонансу для сферичних наночастинок радіусом 5 нм, 15 нм, 30 нм, значення перерізу поглинання зменшується зі збільшенням радіусу наночастинок, натомість значення перерізу розсіяння стає більшим і для великих радіусів перевищує поглинання. Показано, що сфероїдні наночастинок з повздожньою деформацією забезпечують кращу чутливість до зміни показника заломлення

навколишнього середовища в порівнянні з наночастинками інших форм. Електричне поле є підсиленим на вершинах наночастинки і в результаті збільшення співвідношення сторін частинки призводить до збільшення чутливості поверхневого плазмонного резонансу сферичних наночастинок з повздожньою деформацією до показника заломлення навколишнього середовища.

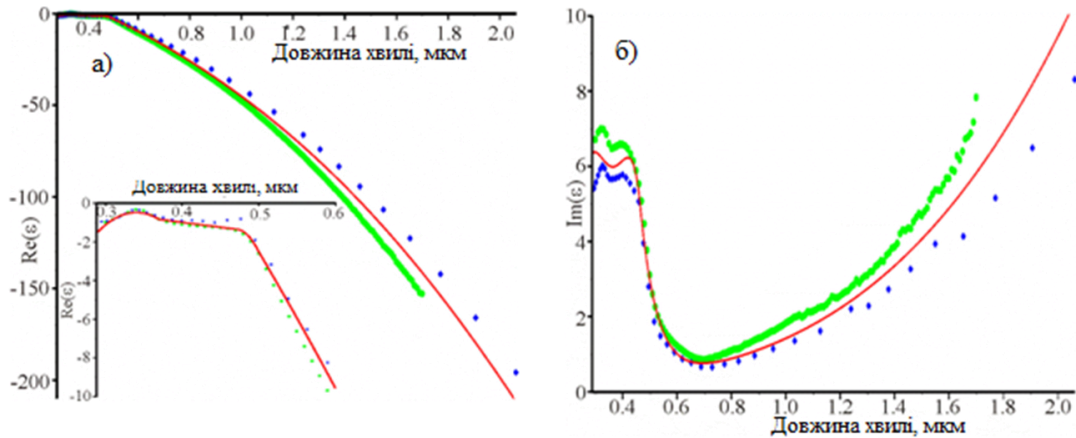


Рис. 9 Спектральні залежності дійсної (а) та уявної частин (б) діелектричної проникності золота: зелені кільця – дані роботи К. М. McPeak, et al (2015), сині ромби – дані роботи S. Babar, et al (2015), червоні криві – за отриманими аналітичними виразами (4) і (6).

Показано, що зміною товщини оболонки металу на діелектричному чи напівпровідниковому ядрі можна налаштувати спектральне розташування піку поверхневого плазмонного поглинання в інтервалі довжин хвиль видимої і ближньої інфрачервоної області спектру (див. рис. 10). Коли радіус оболонки збільшується, збільшується також величина перерізу поглинання при плазмонному резонансі (рис. 10б). Цей ефект пояснюється постійним співвідношенням розмірів ядра-оболонки, що означає, що радіус ядра зменшується при збільшенні товщини оболонки.

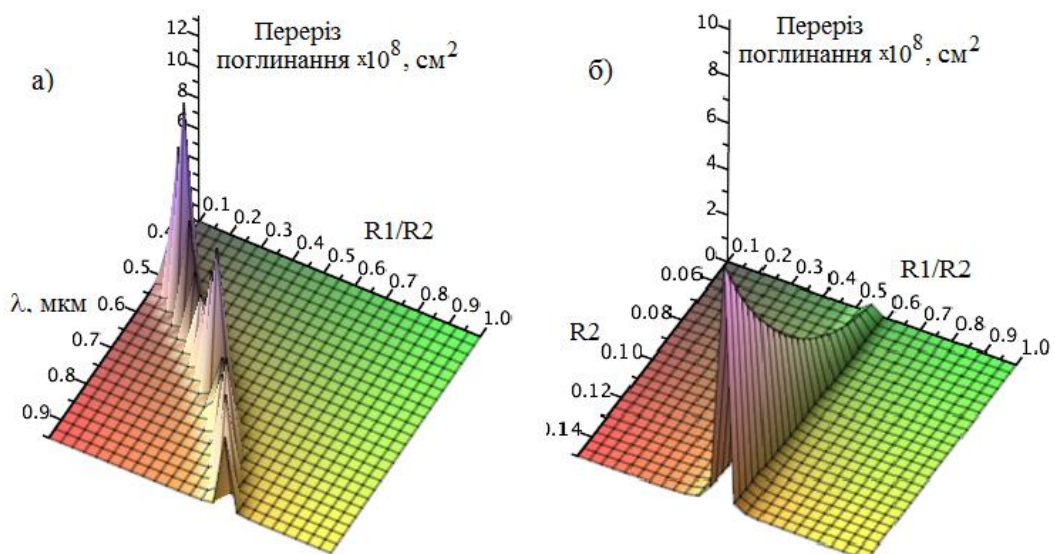


Рис. 10. Залежність перерізу поглинання наноболонок TiO_2-Ag від довжини хвилі та співвідношення між радіусами ядра ($R1$) та оболонки ($R2$) за сталого радіусу оболонки ($R2$) (а) та від загального радіусу та співвідношення між радіусами ядра ($R1$) та оболонки ($R2$) за сталої довжини хвилі 800 нм (б).

Встановлено, що, змінюючи абсолютну товщину оболонки срібла на діелектричному чи напівпровідниковому ядрі можна налаштувати пік поверхневого плазмонного поглинання в інтервалі довжин хвиль від видимого до ближнього інфрачервоного спектрів. Положення довжини хвилі поверхневого плазмонного резонансу зсувається в довгохвильову область спектра при збільшенні показника заломлення навколишнього середовища: від 400 нм для наночастинок срібла до 940 нм для наноболонки діоксид титану-срібло. Крім того, наноболонки є більш чутливими до зміни показника заломлення навколишнього середовища на відміну від наночастинок, а отже така їх властивість може бути корисною у різноманітних сенсорних застосуваннях.

В шостому розділі досліджено особливості взаємодії електромагнітного випромінювання з нанокompозитними матеріалами. Показано, що ефективну діелектричну проникність для нанокompозитного матеріалу на основі алмазоподібної вуглецевої плівки (АВП) з диспергованими в неї наночастинами срібла добре описує теорія ефективного середовища Максвелла-Гарнетта (див. рис. 11). Наші результати показали, що спектральне положення піку поглинання є більш залежним від діелектричної проникності алмазоподібної вуглецевої плівки, ніж від радіусу наночастинок (для досліджуваного діапазону радіусів). Цей аналіз був здійснений для наночастинок з радіусами менше 25 нм. Для частинок з більшими радіусами зміщення піку плазмонного поглинання в довгохвильову область є набагато більшим. Використовуючи ефективні діелектричні константи нанокompозитного матеріалу (алмазоподібна вуглецева плівка з диспергованими в неї наночастинами срібла) було розраховано спектри поглинання такого матеріалу в залежності від довжини хвилі для декількох різних факторів заповнення матеріалу срібними наночастинами. Результати розрахунку представлено на рис. 12. Піки поглинання, які відносяться до плазмонного резонансу, зсуваються в область більших довжин хвиль зі збільшенням фактору заповнення срібла.

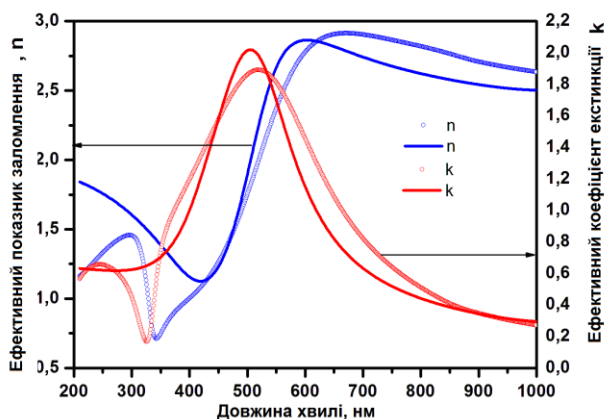


Рис. 11. Залежність ефективного показника заломлення нанокompозитного матеріалу від довжини хвилі (кільця - експериментальні результати, лінія – розраховані результати)

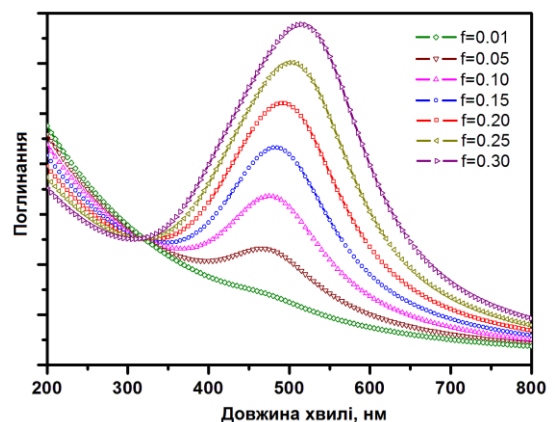


Рис. 12 Спектри поглинання алмазоподібної плівки з диспергованими в неї наночастинами срібла при різних їх факторах заповнення.

Особливості ближньопольової взаємодії між наночастинками в нанокompatитних матеріалах досліджено за допомогою перенормованої ефективної теорії Максвелла-Гарнетта, яка враховує дипольну взаємодію між наночастинками.

Оскільки експериментально отримані наночастинки не мають ідеальної сферичної форми, то в результаті такої несферичності ефективні властивості нанокompatитної плівки будуть різними. Рис. 13 демонструє ефект впливу форми наночастинок на ефективні оптичні властивості нанокompatитної плівки (фактор заповнення становить 0,22; середній радіус наночастинок 10 нм). Збільшення несиметричності e призводить до деформації кривих (див. рис. 13).

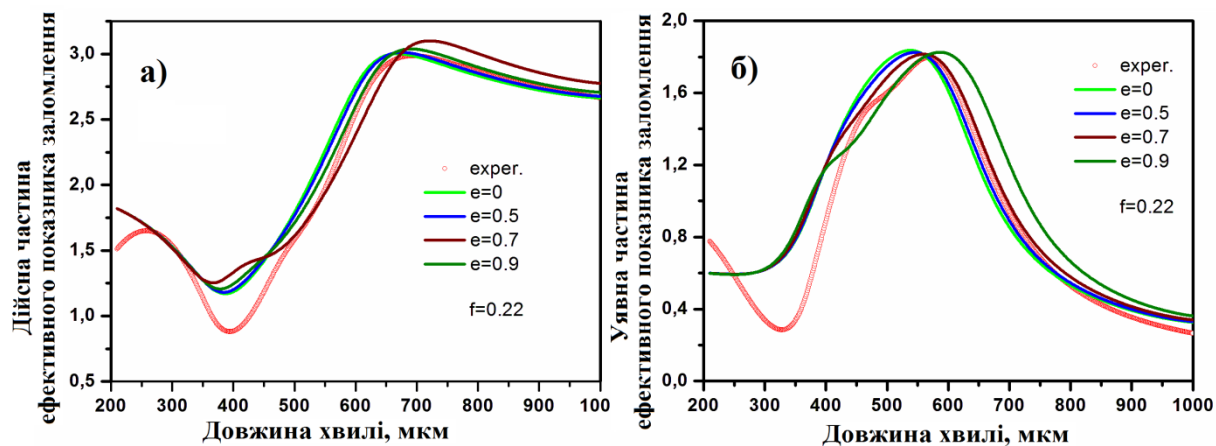


Рис. 13. Залежність ефективного показника заломлення нанокompatитного матеріалу, що містить 0,22% срібла, від довжини хвилі

Порівняння експериментальних результатів з результатами розрахунку для деяких величин несиметричності наночастинок дозволяє вибрати теоретичну криву, яка буде добре узгоджуватися з експериментальними даними. Таким чином спектр поглинання такого нанокompatиту розраховано з врахуванням диполь-дипольної взаємодії між наночастинками та їх несиметричності e . Експериментальні та теоретичні спектри поглинання наведені на рис. 14.

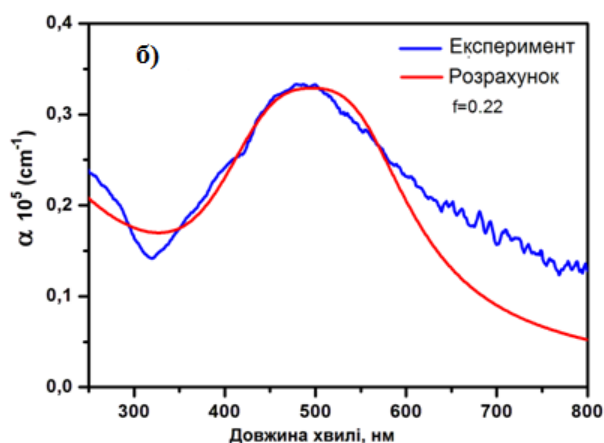


Рис. 14. Спектри поглинання нанокompatитної плівки з фактором заповнення нановключень 0.22

Слабка кореляція експериментальних кривих з теоретичними може бути пояснена декількома причинами: по-перше, ми припускаємо, що всі наночастинки мають деформовану форму; по-друге, ми використовували усереднений радіус; і, нарешті, як було показано вище, пік поверхневого плазмона дуже чутливий до матеріалу матриці. Спектри оптичного поглинання алмазоподібної вуглецевої плівки з диспергованими в неї наночастинками срібла після відпалу при різних температурах представлені на рис. 15. Видно, що після відпалу плазмонні піки зміщені та чітко виділяються додаткові піки.

Слід також зазначити, що відпал при температурі 140 і 200° С призвів до появи другого піку поглинання на довжині хвилі близько 350 нм. Збільшення температури відпалу до 300 та 400° С призвело до червоного зміщення основного поверхневого плазмонного резонансного піку.

Усі ці закономірності, що спостерігаються, можна пояснити змінами середнього розміру нанокластерів срібла. Форма цих нанокластерів відіграє вирішальну роль у спектрах поглинання, оскільки ми визначаємо плазмонний пік в спектрах поглинання, що збуджується в кластері певного розміру. Відомо, що для сферодної металеві наночастинки плазмонна зона розщеплюється на дві смуги, що відповідають коливанню вільних електронів вздовж (дипольний плазмон) і перпендикулярно (квадрупольний плазмон) до більшої осі сфероїда.

Щоб підтвердити припущення про те, що сформовані після відпалу нанокластери несферичної форми відіграють основну роль у поглинанні, ми розрахували спектри поглинання нанокомпозитних плівок після відпалу при температурах 140, 200, 300 і 400°С, і результати розрахунків наведені на рис. 16.

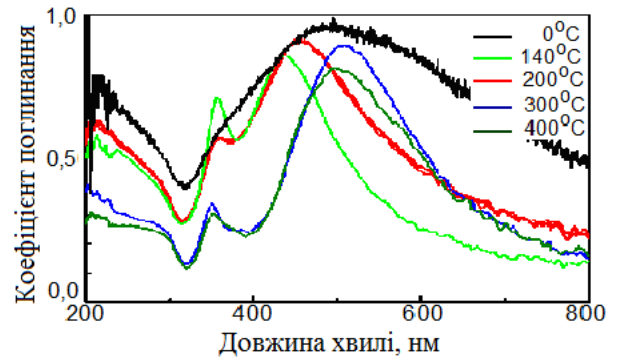


Рис. 15. Вплив температури відпалу на спектр поглинання АВП-Аг плівок

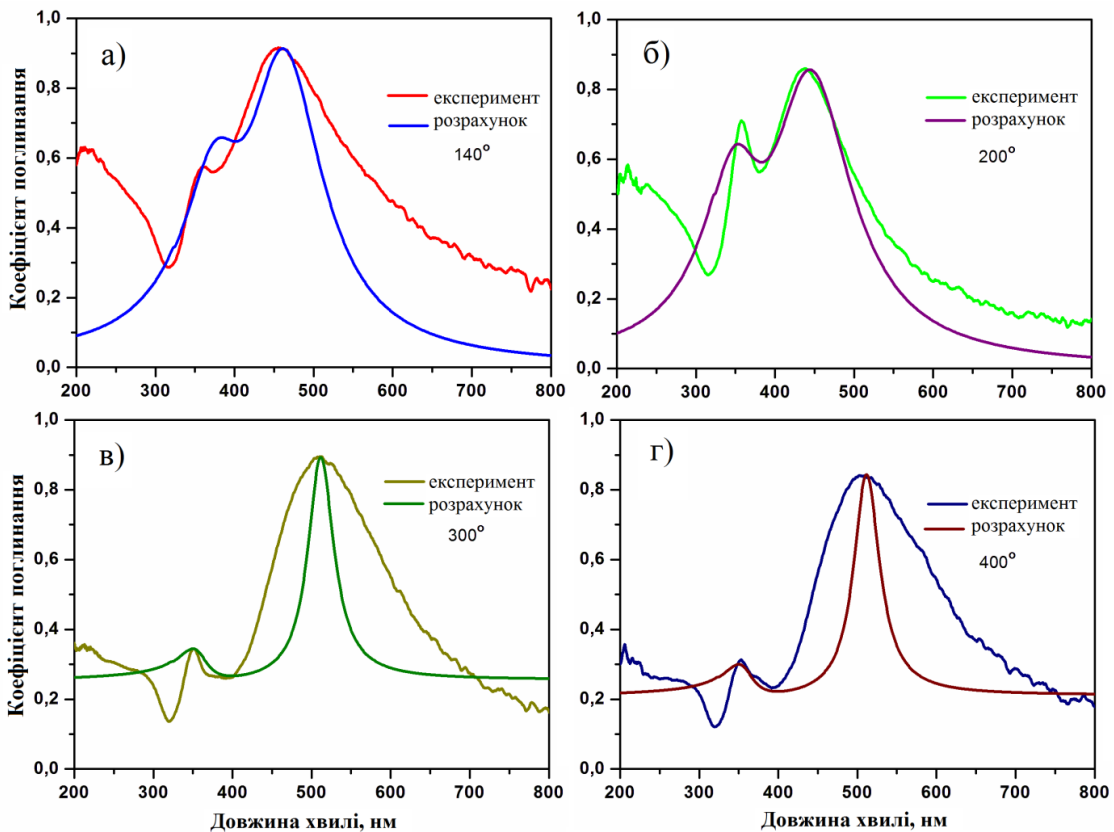


Рис. 16. Експериментальні і розрахункові спектри оптичного поглинання АВП плівки з диспергованими в неї наночастинками срібла після відпалу при 140, 200, 300 і 400°С

Маючи розмір нанокластерів і експериментальні значення показника заломлення АВП, ми встановили несферичність сформованих нанокластерів після відпалу при різних температурах. Таким чином, ми одержали оптимальне узгодження експериментальних і розрахункових даних для відпалу при 140°C , (рис. 16а), 200°C (рис. 16б), 300 і 400°C (рис. 16в і рис. 16г відповідно).

Результати показують, що зі збільшенням температури відпалу нанокластери стають все більш і більш асиметричними. Велика розбіжність між розрахунковими та експериментальними кривими поглинання, що представлені на рис. 16в і рис. 16г, може бути пояснена домінуючою роллю великих нанокластерів в спектрі поглинання. За нашими розрахунками, нанокластери, отримані після відпалу при 300°C і 400°C мають однакову несиметричність, однак, показники заломлення АВП дещо відрізняються, що результується двома добре вираженими піками поглинання.

Проведено моделювання субхвильових одновимірних та двовимірних періодичних структур на основі нанокомпозиту для застосування їх в якості сенсорних елементів. Підвищення чутливості в одновимірній періодичній структурі може бути досягнуте шляхом збільшення концентрації срібла в нанокомпозиті. Чутливим до зміни показника заломлення навколишнього середовища є пік відбивання, що розташований ближче до довгохвильової області спектру. Розраховано ефективну діелектричну проникність та спектри поглинання двовимірних періодичних структур на основі композитного матеріалу (масив наноотворів). Показано, що положення піку поглинання практично не залежить від зміни геометричних параметрів (період, діаметр наноотворів), тим не менше, поглинання зменшується зі збільшенням концентрації наноотворів в зразках.

Сьомий розділ присвячений моделюванню та оптимізації субмікронних структур як оптичних елементів для фотонних систем.

Здійснено теоретичне моделювання кутових характеристик металізованих прямокутних ґраток (полікарбонатні ґратки, покриті шаром золота) та оптимізацію їх геометричних параметрів для застосування в сенсорній електроніці (див. рис. 17 та 18).

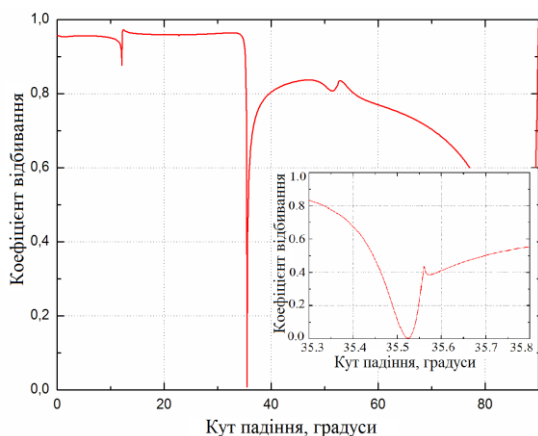


Рис. 17. Залежність коефіцієнта відбивання від кута падіння на металізовану ґратку ($d=55$ нм, $\Lambda=0,8$ мкм)

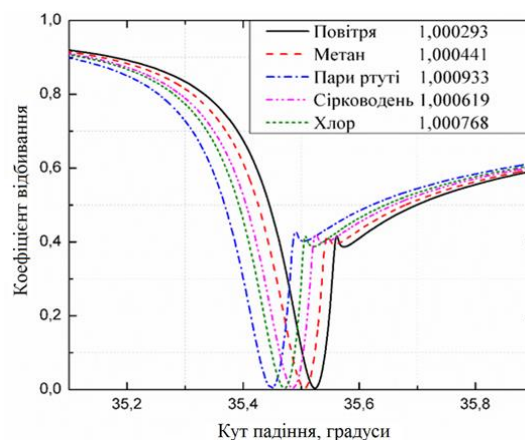


Рис. 18. Залежність коефіцієнта відбивання від кута падіння на металізовану ґратку для різних показників заломлення навколишнього середовища

Прямокутні полікарбонатні ґратки виготовлені за стандартною технологією райдужних голограм на тонкій плівці полікарбонату методом тиснення з фіксованою глибиною ґратки 0,3 мкм та різним періодом в межах від 0,4 мкм до 10 мкм. На поверхню ґраток методом термічного розпилення у вакуумі нанесено тонкий шар золота. Золото використовувалося як металеве покриття, оскільки сенсори на основі ґраток із золота, що працюють на явищі поверхневого плазмонного резонансу, показують високу чутливість до зміни показника заломлення навколишнього середовища при кутовому детектуванні.

Змодельовано та виготовлено рельєфну металізовану ґратку на основі арсеніду галію (GaAs), покрити тонкою плівкою золота для застосування в якості високочутливого сенсорного елемента. Результати дослідження впливу товщини золота на оптичні характеристики сенсора показали, що оптимальна товщина шару золота становить близько 45-50 нм для періоду ґратки 1200 нм, товщини ґратки 120 нм за довжини хвилі збудження 633 нм. Для ґраткової структури з даними параметрами отримано кутову залежність коефіцієнта відбивання в порядку нульової дифракції для різних показників заломлення досліджуваних середовищ, як газових (рис. 19а) так і рідких (рис. 19б). Показник заломлення змінювався від 1,000 до 1,030 для газових середовищ і від 1,32 до 1,37 з кроком 0,01 для рідких середовищ.

Синусоїдальні дифракційні ґратки були виготовлені методом фотостимульованого травлення GaAs, тонкий шар золота наносився на поверхню ґратки шляхом термічного розпилення у вакуумі.

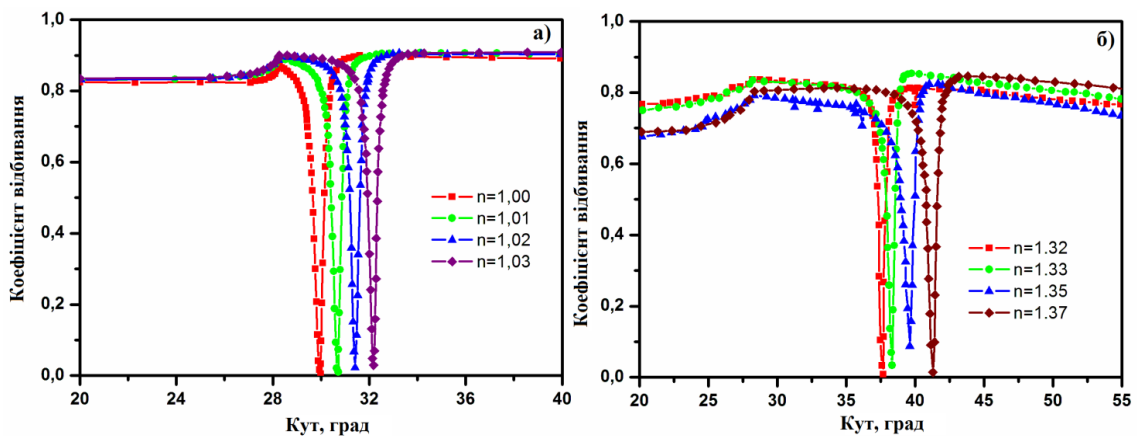


Рис. 19. Залежність коефіцієнта відбивання від кута падіння лазерного променя для ґратки з наступними параметрами $\lambda = 633$ нм, $\Lambda = 1200$ нм, $h = 120$ нм при різних показниках заломлення досліджуваного газового (а) та рідкого середовищ (б)

Порівняння теоретичних та експериментальних результатів залежності коефіцієнта відбивання від кута падіння лазерного променя показано на рис. 20. Моделювання показує, що на довжині хвилі збудження 633 нм очікується пік поверхневого плазмонного резонансу для кута 29,9 градуса. Для аналізованої структури невідповідність між експериментальними та теоретичними положеннями піку в спектрах відбивання може бути пояснена неоднорідністю чистої ґратки GaAs (див. рис. 21а) та ґратки із золотим покриттям (див. рис. 21б) або варіацією періоду та товщини ґраткової структури.

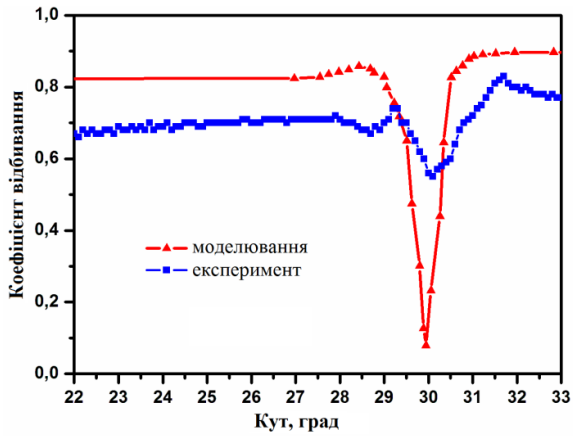


Рис. 20. Залежність коефіцієнта відбивання від кута падіння лазерного променя: порівняння теоретичних і експериментальних результатів

резонансу при зміні показника заломлення навколишнього середовища.

Підвищення локалізованого електричного поля є найбільш ефективним способом підвищення чутливості спектроскопії комбінаційного розсіяння світла. Як відомо, збудження плазмонного резонансу визначається як геометричними, так і оптичними (діелектричними) властивостями металу. В металах в оптичному діапазоні довжин хвиль дійсна частина діелектричної проникності від'ємна і тому світло швидко згасає в об'ємі. Але на межі розділу діелектрик-метал при взаємодії електромагнітної хвилі світла з поверхнею металу можуть виникати поверхневі плаزمони - колективне коливання електронів, яке, потрапляючи в резонанс з електромагнітної хвилею падаючого світла, призводить до різкого підсилення локального (поблизу поверхні) поля. Коли молекула знаходиться дуже близько до підсиленого поля і нелінійно взаємодіє, то можна спостерігати підсилення сигналу комбінаційного розсіяння світла.

Крім того, існує різниця в амплітуді коефіцієнта відбивання. Експериментальні результати показують, що коефіцієнт відбивання структури при резонансі становить близько 55%. Ця відносно невисока ефективність GaAs-Au ґратки пов'язана з недосконалістю ґратки та втратами в ній. Хоча ефективність виготовленого пристрою відносно низька, він може використовуватись в резонансних сенсорних пристроях, оскільки висока ефективність не є неодмінною умовою застосування плазмонних резонансних сенсорів, а ключовим є зміщення кута

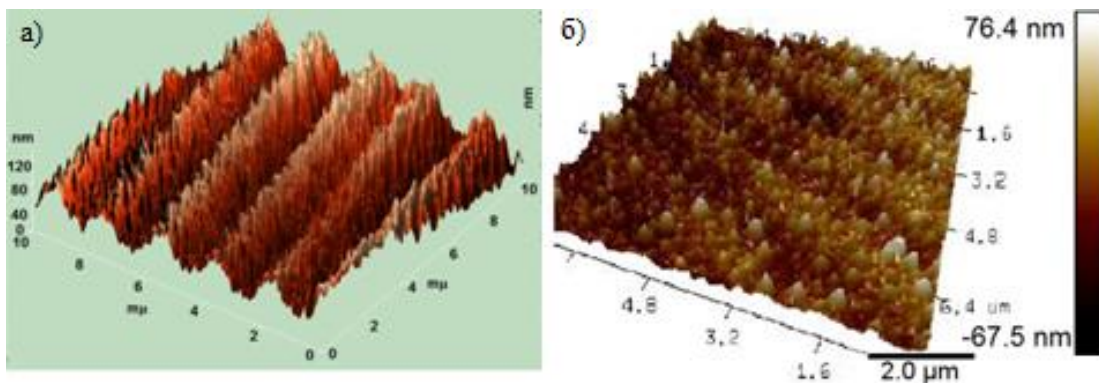


Рис. 21. Просторове зображення ґратки GaAs (а) та ґратки GaAs-Au (б)

Теоретично досліджено та оптимізовано прямокутні періодичні структури з метою досягнення максимального коефіцієнта підсилення сигналу комбінаційного розсіяння світла. Визначено оптимальні параметри прямокутної металеві ґратки на діелектричній підкладці. В якості матеріалу ґратки вибрано срібло, а в якості підкладки вибрано полікарбонат. Найвищий коефіцієнт

підсилення отримано при довжині хвилі збудження $0,633 \text{ мкм}$ і періоді $0,37 \text{ мкм}$ при факторі заповнення $F=0,2$ та товщині ґратки $0,01 \text{ мкм}$. Максимальне підсилення на довжині хвилі збудження становить $g_1=16,6$, а на стоксовій довжині хвилі молекули N_2 $g_2=17,5$. На рис. 22. наведений розподіл коефіцієнта підсилення на довжині хвилі збудження в межах одного періоду ґратки.

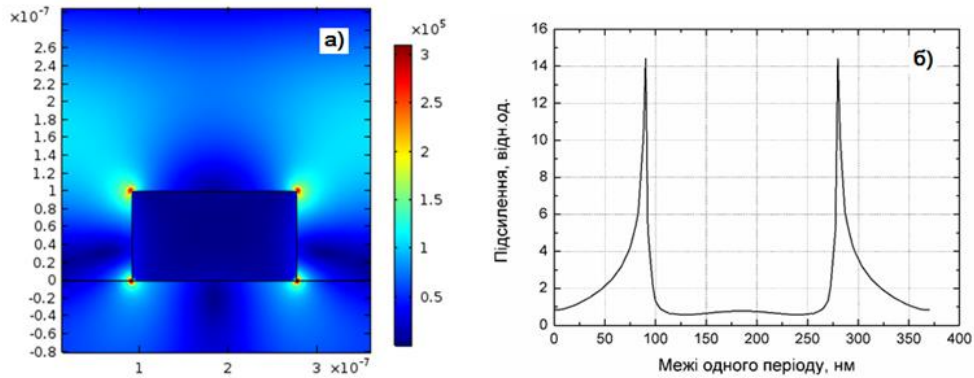


Рис. 22. Розподіл електромагнітного поля (а) і коефіцієнта підсилення (б) в межах одного періоду при довжині хвилі збудження $0,633 \text{ мкм}$ у ґратці з $L=0,37 \text{ мкм}$ $h=0,1 \text{ мкм}$ і $F=0,2$

Проведено дослідження ґраткової структури, коли підкладка та ґратка зі срібла, на тих же довжинах хвиль, що і в попередньому випадку. Оскільки, підкладкою є срібло, то допустимий період такої структури буде залежати лише від довжини хвилі збудження. Для періодичної прямокутної структури, коли підкладка та ґратка зі срібла, найвищий коефіцієнт підсилення отримано при довжині хвилі збудження $0,633 \text{ мкм}$ і періоді $0,6 \text{ мкм}$, факторі заповнення $F=0,5$ і товщині ґратки $h=0,03 \text{ мкм}$. Максимальне підсилення отримано на довжині хвилі збудження $g_1=21,8$, а на стоксовій довжині хвилі CSl_4 $g_2=17,4$. На рис. 23 наведений розподіл коефіцієнта підсилення на довжині хвилі збудження в межах одного періоду ґратки.

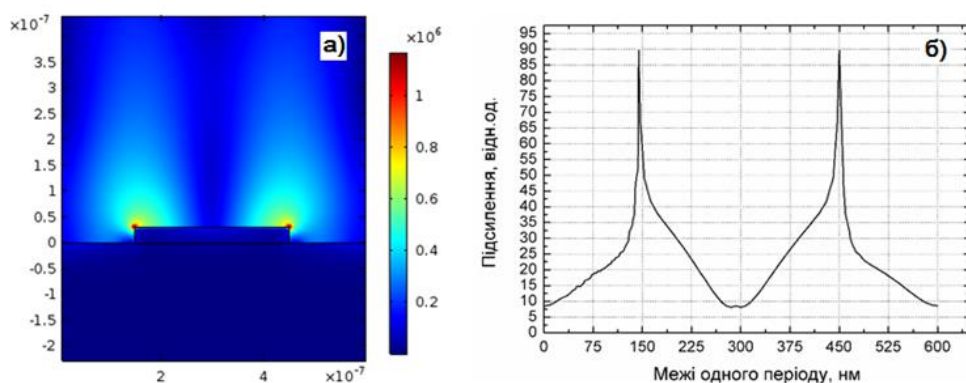


Рис. 23. Розподіл електромагнітного поля (а) і коефіцієнта підсилення (б) в межах одного періоду при довжині хвилі збудження $0,633 \text{ мкм}$ у ґратці з $L=0,6 \text{ мкм}$, $h=0,03 \text{ мкм}$, $F=0,5$

Результати моделювання показали, що оптимізовані підкладки на основі прямокутних структур підсилюють комбінаційне розсіяння світла приблизно 10^4 - 10^5 , що вказує на високу ефективність їх використання в спектроскопії комбінаційного розсіяння світла. Причому, повністю металеві періодичні

структури є більш придатними для ефективного застосування їх в якості підкладок для підсилення комбінаційного розсіяння світла, оскільки за допомогою них можна значно більше підсилити електромагнітне поле у порівнянні з метал-діелектричними періодичними структурами.

Показано, що полікарбонатні ґратки з золотим покриттям можуть також ефективно використовуватись в якості підкладок для підсилення комбінаційного розсіяння світла. Встановлено, що такі структури в комбінації з біофункціоналізованими наночастинками золота можуть використовуватися для аналітичних цілей, наприклад, для отримання спектрів коливань холестерол-оксидазу (ChOX), як важливого аналітичного ферменту.

Отже, можемо узагальнити, що розуміння та вивчення 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 дали можливість дослідити та виготовити різноманітні твердотільні елементи на основі мікро- і наноструктур, що можуть з успіхом використовуватися для сенсорної електроніки.

У додатках подано акти використання результатів дисертації, список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено науково-технічну проблему фізики твердого тіла, а саме встановлено роль хвилеводного, плазмонного та плазмон-поляритонного резонансів, які виникають в процесі взаємодії електромагнітної хвилі з мікро- та наноструктурами та проведено моделювання і оптимізацію оптоелектронних елементів на їх основі для застосування в сенсорній електроніці. Проведені дослідження дали змогу зробити такі висновки:

1. Математичне формулювання точної системи рівнянь зв'язаних хвиль та алгоритму S-матриці детально представлені та адаптовані до простої матричної форми для використання на сучасній мові програмування з метою дослідження умов виникнення резонансних явищ в мікро- та наноструктурах. Для цього було отримано набір матричних зв'язків, що забезпечило стабільний алгоритм для обчислення коефіцієнтів пропускання та відбивання. Запропонований чисельний алгоритм був реалізований у стандартному математичному програмному забезпеченні. Запропоновано нове представлення функціональної залежності діелектричної проникності матеріалу періодичної структури у вигляді модифікованого комплексного ряду Фур'є, що забезпечує зменшення осциляцій в залежностях коефіцієнтів відбивання та пропускання від кількості використаних зв'язаних хвиль, також покращується збіжність результатів аналізу. Досліджено збіжність методу зв'язаних хвиль для аналізу дифракції на деяких рельєфних ґратках в оптичному та ближньому інфрачервоному діапазонах для певних довжин хвиль.

2. У випадку призмової структури встановлені нові закономірності, що визначають зв'язок між геометричними параметрами оптоелектронної

призмової сенсорної системи та її чутливістю. Показано, що в призмовій структурі при реалізації плазмон-поляритонного резонансу можна досягнути вищої чутливості зміни кута мінімального відбивання до зміни показника заломлення навколишнього середовища в порівнянні зі структурою, що працює на явищі хвилеводного резонансу. Чутливість такого сенсорного елемента зростає при зменшенні показника заломлення матеріалу призми, причому цей висновок стосується обох типів поляризації. Чутливість є вищою для хвиль TE поляризації ніж для TM поляризації, і вона зростає при наближенні мінімального кута відбивання до кута повного внутрішнього відбивання.

3. Розглянуто умови виникнення хвилеводного, плазмон-поляритонного та плазмонного резонансів в ґраткових мікро- та наноструктурах, та фактори, які впливають на їх спектральні характеристики. Показано, що мікроструктура на основі ґратки в умовах хвилеводного резонансу характеризується високим коефіцієнтом відбивання у вузьких спектральних смугах та може бути використана як високочутливий елемент сенсорної електроніки. Причому, при нормальному падінні наявний один пік в спектрі відбивання і два піки – при падінні променя під кутом. Встановлено, що зміщення другого піку в спектрі відбивання менш чутливе до зміни певних структурних параметрів і є більш чутливим до зміни показника заломлення навколишнього середовища. Крім того, спектральні положення піків суттєво залежать від періоду ґратки і товщини хвилеводу.

4. Досліджено можливість використання в якості оптичного фільтра багат шарової структури типу: діелектричний шар/металева ґратка/діелектричний шар/підкладка в умовах TE поляризації. Встановлено наявність єдиного піку пропускання в спектральному діапазоні від 1 до 10 мкм. Показано, що аномально високе пропускання реалізується на довжині хвилі, яка відповідає двом резонансам: хвилеводному резонансу в діелектричних шарах та резонансу в діелектричній щілині металевої ґратки.

5. Проаналізовано взаємодію оптичного випромінювання з наноструктурами типу: система періодично розташованих квадратного перерізу золотих та срібних нанодротів на діелектричній підкладці. Встановлено, що спектральне розташування піків поглинання при резонансі локалізованих поверхневих плазмонів масиву періодично розташованих металевих нанодротів близькі до резонансних довжин хвиль металевих наночастинок. Завдяки тому, що уявна частина діелектричної проникності срібла суттєво менша за уявну частину діелектричної проникності золота, резонансний пік у сріблі розщеплюється на декілька піків в результаті інтерференції поля падаючої хвилі та розсіяного поля на сусідніх нанодротах. Встановлено, що тангенціальні складові напруженості поля на срібних нанодротах у декілька разів більші ніж поля на нанодротах із золота. Показано, що такі структури є перспективними елементами сенсорної електроніки.

6. На основі експериментальних даних діелектричної проникності в діапазоні 0.3...2 мкм для срібла та золота, 0.3...4.2 мкм для міді і 0.1...2 мкм для алюмінію знайдені аналітичні вирази для їх опису. Причому, весь спектральний діапазон (за виключенням уявної частини діелектричної

проникності срібла) розбито на декілька інтервалів. Для кожного інтервалу довжин хвиль підбирались відповідні функції, переважно у вигляді поліномів. Відбір функції на кожному інтервалі здійснювався функцією Хевісайда. Таке аналітичне представлення діелектричної проникності є корисним для вивчення резонансних явищ та моделювання на їх основі елементів твердотільної електроніки.

7. Розглянуто умови виникнення локалізованого плазмонного резонансу в металевих наночастинках, нанооболонках та нанокомпозитних матеріалах, а також можливості їх застосування як чутливих елементів сенсорної електроніки. Встановлено, що зміною товщини оболонки металу на діелектричному чи напівпровідниковому ядрі можна добитися зміщення піку поверхневого плазмонного поглинання в інтервалі довжин хвиль видимої і ближньої інфрачервоної області спектру та оцінено вплив відносної діелектричної проникності оточуючого середовища на оптичні характеристики таких наноструктур. Показано, що для нанокомпозитного матеріалу на основі алмазоподібної вуглецевої плівки з диспергованими в неї наночастинками срібла ефективну діелектричну проникність найкраще описує теорія ефективного середовища Максвелла-Гарнетта. Спектральне положення піку поглинання є більш чутливим до діелектричної проникності алмазоподібної вуглецевої плівки ніж до радіусу наночастинок (радіус наночастинок менший за 25 нм). Встановлено визначальний вплив об'ємної концентрації срібла, збільшення електромагнітної взаємодії між наночастинками та зміни діелектричної проникності матриці на положення піку плазмонного поглинання.

8. Проведено моделювання оптичних властивостей алмазоподібної вуглецевої плівки з диспергованими в ній наночастинками срібла в залежності від температури відпалу. В результаті відпалу, поряд з більш дрібними з'являються великі металеві нанокластери несиметричної форми. Показано, що після відпалу нанокомпозиту плазмонні піки зміщуються в довгохвильову область і розширюються. Крім того, стають яскраво вираженими квадрупольні додаткові піки поглинання. Зміна спектральних параметрів відпалених нанокомпозитних плівок, пояснюється зміною розміру та форми наночастинок, зміною відносної діелектричної проникності середовища та збільшенням взаємодії між нанокластерами. Встановлено, що алмазоподібна вуглецева плівка, з диспергованими в ній наночастинками срібла є перспективним матеріалом сенсорної електроніки.

9. Оптимізовано геометричні параметри ґратки на основі арсеніду галію покритої тонким шаром золота, та створено на її основі сенсорний елемент. Показано, що положення піку плазмонного резонансу знаходиться в лінійній залежності від довжини хвилі збудження та періоду ґратки. Теоретичні результати показують, що досліджувана структура є більш чутливою до зміни показника заломлення рідких середовищ, ніж газових. Теоретичні та експериментальні результати залежності коефіцієнта відбивання від кута падіння лазерного променя строго корелюють між собою.

10. Прямокутні структури на основі матеріалів полікарбонат/срібло та

срібло/срібло були розраховані та оптимізовані для довжин хвиль збудження 0,532 мкм, 0,633 мкм і 0,785 мкм з метою отримання максимального підсилення сигналів гігантського комбінаційного розсіяння. Показано, що досягнення максимального підсилення заданої довжини хвилі збудження можливе лише за певних комбінацій періоду ґратки, її глибини і коефіцієнта заповнення, які відповідають поверхневому плазмон-поляритонному резонансу на поверхні металу. Повністю металеві періодичні структури є більш придатними для ефективного застосування їх в якості підкладок гігантського комбінаційного розсіяння, оскільки за допомогою них можна значно більше підсилити електромагнітне поле у порівнянні з метал-діелектричними періодичними мікроструктурами.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Fitio, V.M., Bendzyak, A.V., **Yaremchuk, I.Y.**, & Bobitski, Y.V. (2017). Wave equation solution for multilayer planar waveguides in a spatial frequency domain. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 20(4), 424–429. <https://doi.org/10.15407/spqeo20.04.424>. (Здобувачкою проведено розрахунок сталих поширення в планарному хвилеводі)
2. **Yaremchuk, I.Y.**, Fitio, V.M., & Bobitski, Y.V. (2017). Resonance phenomena in one-dimensional grating-based structures. *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*, 20(1), 85–90. <https://doi.org/10.15407/spqeo20.01.085>. (Здобувачкою проведено моделювання спектрів пропускання та відбивання в металевій ґратці та розподілу електромагнітного поля в ґратці).
3. **Яремчук І.Я.**, Петровська Г.А., Фітьо В.М., & Бобицький Я.В. (2017). Детальний аналіз елемента призмового сенсора, що працює на явищі поверхневого плазмонного резонансу. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія "Радіоелектроніка та телекомунікації"*, 885, 97–102. <http://science.lpnu.ua/srt/all-volumes-and-issues>. (Здобувачкою проведено розрахунок спектральних характеристик сенсорного елемента на основі призми).
4. Петровська Г.А., **Яремчук І.Я.**, Мурвай І.М., Фітьо В.М., & Бобицький Я.В. (2017) Підсилення електромагнітного поля періодичними структурами для застосування у раманівській спектроскопії. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія "Радіоелектроніка та телекомунікації"*, 885, 141–146 <http://science.lpnu.ua/srt/all-volumes-and-issues>. (Здобувачкою проведено моделювання розподілу електромагнітного поля в металевій ґратці).
5. **Yaremchuk, I.Y.**, Fitio, V.M., & Bobitski, Y.V. (2016). Enhanced optical transmission of the triple-layer resonant waveguide structure. *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*, 19(2), 156–161. doi: 10.15407/spqeo19.02.156. (Здобувачкою проведено моделювання залежності пропускання металеві ґратки, розміщеної між двома діелектричними шарами, від довжини хвилі).

6. **Яремчук, І.Я.,** Фітьо, В.М., & Бобицький, Я.В. (2016). Моделювання плазмонних властивостей нанокмпозитних матеріалів на основі алмазоподібної вуглецевої плівки та наночастинок срібла. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія "Радіоелектроніка та телекомунікації"*, 849, 292–299. <http://science.lpnu.ua/srt/all-volumes-and-issues>. (Здобувачкою проведено розрахунок ефективної діелектричної проникності алмазоподібної вуглецевої плівки з диспергованими в неї наночастинками срібла в залежності від несферичності наночастинок та показника заломлення матриці).

7. Фітьо, В.М., **Яремчук, І.Я.,** Ромах, В.В., & Бобицький, Я.В. (2010). Резонанс поверхневих плазмонів та хвилеводних мод у призмових структурах. *Вісник Національного університету „Львівська політехніка”. Електроніка*, 681, 160–166. <http://ena.lp.edu.ua/handle/ntb/24074>. (Здобувачкою розраховано залежності відбивання призмових структур від кута падіння променя за умови виникнення плазмон-поляритонного та хвилеводного резонансів).

8. Фітьо, В., & **Яремчук, І.** (2010). Просвітлення ґраткою межі прозорий діелектрик-повітря. *Теоретична електротехніка*, 61, 180–187. http://elit.lnu.edu.ua/pdf/61_23.pdf. (Здобувачкою проведено моделювання спектрів відбивання прямокутних ґраток).

9. **Яремчук, І.Я.,** Фітьо, В.М., & Бобицький, Я.В. (2009). Модель інфрачервоних тонкопліткових фільтрів на основі інтерференційного дзеркала. *Вісник Національного університету „Львівська політехніка”. Електроніка*, 646, 218–225. http://vlp.com.ua/files/21_36.pdf. (Здобувачкою детально описано методику розрахунку спектральних характеристик періодичних структур)

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав із напряму, з якого підготовлена дисертація, включених до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science

10. Fitio, V., **Yaremchuk, I.,** Vernyhor, O., & Bobitski, Y. (2018). Resonance of surface-localized plasmons in a system of periodically arranged gold and silver nanowires on a dielectric substrate. *Applied Nanoscience*, 8(5), 1015–1024. <https://doi.org/10.1007/s13204-018-0686-z>. (Здобувачкою проведено розрахунок спектральних характеристик срібних та золотих нанодротів, періодично розміщених на діелектричній підкладці).

11. **Yaremchuk, I.,** Petrovska, H., Fitio, V., & Bobitski, Y. (2017). Optimization and Fabrication of the Gold-Coated GaAs Diffraction Gratings for Surface Plasmon Resonance Sensors. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 158, 535–540. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.12.148>. (Здобувачкою проведено моделювання спектрів відбивання металізованих синусоїдальних ґраток від кута падіння променя)

12. Meškiniš, Š., Peckus, D., Vasiliauskas, A., Čiegis, A., Gudaitis, R., Tamulevičius, T., **Yaremchuk I.** & Tamulevičius, S. (2017). Photovoltaic Properties and Ultrafast Plasmon Relaxation Dynamics of Diamond-Like Carbon Nanocomposite Films with Embedded Ag Nanoparticles. *Nanoscale Research Letters*, 12(1), 288-1–288-10. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2065-1>.

(Здобувачкою досліджено властивості алмазоподібної вуглецевої плівки з диспергованими в неї наночастинками срібла в залежності від концентрації наночастинок)

13. Meškiniš, Š., **Yaremchuk, I.**, Grigaliūnas, V., Vasiliauskas, A., & Čiegis, A. (2016). Plasmonic Properties of Nanostructured Diamond Like Carbon/Silver Nanocomposite Films with Nanohole Arrays. *Materials Science*, 22(4), 467–471. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.ms.22.4.13193>. (Здобувачкою проведено моделювання спектрів поглинання нанокомпозитної плівки з масивом наноотворів в залежності від періоду та діаметру наноотворів)

14. Meškiniš, Š., Čiegis, A., Vasiliauskas, A., Šlapikas, K., Gudaitis, R., **Yaremchuk, I.**, Fitio, V., Bobitski, Ya. & Tamulevičius, S. (2016). Annealing effects on structure and optical properties of diamond-like carbon films containing silver. *Nanoscale Research Letters*, 11(1), 146-1–146-9. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1362-4>. (Здобувачкою проведено моделювання спектрів поглинання алмазоподібної вуглецевої плівки з диспергованими в неї наночастинками срібла в залежності від форми та розміру срібних нанокластерів, що утворилися в результаті відпалу)

15. Ivanov, S., Barylyak, A., Besaha, K., Bund, A., Bobitski, Y., Wojnarowska-Nowak, R., **Yaremchuk I.**, & Kus-Liškiewicz, M. (2016). Synthesis, characterization, and photocatalytic properties of sulfur-and carbon-codoped TiO₂ nanoparticles. *Nanoscale Research Letters*, 11(1), 140-1–140-12. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1353-5>. (Здобувачкою досліджено оптичні властивості наночастинок двоокису титану з сіркою)

16. **Yaremchuk, I.**, Meškiniš, Š., Fitio, V., Bobitski, Y., Šlapikas, K., Čiegis, A., Valevičius Z., Selskis A. & Tamulevičius, S. (2015). Spectroellipsometric characterization and modeling of plasmonic diamond-like carbon nanocomposite films with embedded Ag nanoparticles. *Nanoscale Research Letters*, 10(1), 157-1–175-7. <https://doi.org/10.1186/s11671-015-0854-y>. (Здобувачкою розраховано ефективну діелектричну проникність алмазоподібної вуглецевої плівки з диспергованими в неї наночастинками срібла в залежності від форми та розміру наночастинок)

17. Fitio, V.M., **Yaremchuk, I.Y.**, Romakh, V.V., & Bobitski, Y.V. (2015). A solution of one-dimensional stationary Schrödinger equation by the Fourier transform. *ACES*, 30(5), 534–539. <http://www.aces-society.org/search.php?vol=30&no=5&type=2>. (Здобувачкою проведено розрахунок дискретних рівнів енергії одновимірного кристалу)

18. **Yaremchuk, I.**, Tamulevičienė, A., Tamulevičius, T., & Tamulevičius, S. (2014). Optical Properties of DLC-Ag Nanocomposite and Grating Structures on their Base. *Applied Mechanics and Materials*, 490, 53–57. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.53>. (Здобувачкою проведено моделювання спектрів відбивання алмазоподібної вуглецевої плівки з диспергованими в неї наночастинками срібла)

19. **Yaremchuk, I.**, Tamulevičienė, A., Tamulevičius, T., Šlapikas, K., Valevičius, Z., & Tamulevičius, S. (2014). Modeling of the plasmonic properties of DLC-Ag nanocomposite films. *Physica Status Solidi (a)*, 211(2), 329–335.

<https://doi.org/10.1002/pssa.201330067>. (Здобувачкою розраховано ефективну діелектричну проникність алмазоподібної вуглецевої плівки з диспергованими в неї наночастинками срібла та проведено моделювання спектрів поглинання)

20. **Yaremchuk, I.**, Tamulevičius, T., Fitio, V., Gražulevičiūtė, I., Bobitski, Y., & Tamulevičius, S. (2013). Guide-mode resonance characteristics of periodic structure on base of diamond-like carbon film. *Optics Communications*, 301, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.03.032>. (Здобувачкою проведено моделювання спектрів відбивання алмазоподібної вуглецевої плівки від довжини хвилі за різних кутів падіння променя)

21. Fitio, V.M., **Yaremchuk, I.Y.**, & Bobitski, Y.V. (2013). Accuracy of coupled-wave analysis of relief diffraction gratings in optical range. *Telecommunications and Radio Engineering*, 72(8), 661–671. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i8.20. (Здобувачкою розраховано спектри пропускання металевих та діелектричних ґраток в залежності від кількості використаних зв'язаних хвиль)

22. **Yaremchuk, I.**, Tamulevičius, T., Fitio, V., Gražulevičiūtė, I., Bobitski, Y., & Tamulevičius, S. (2013). Numerical implementation of the S-matrix algorithm for modeling of relief diffraction gratings. *Journal of Modern Optics*, 60(20), 1781–1788. <https://doi.org/10.1080/09500340.2013.861032>. (Здобувачкою розроблено алгоритм розрахунку дифракційної ефективності періодичних структур)

23. **Yaremchuk, I.Y.**, Fitio, V.M., & Bobitski, Y.V. (2011). New design of interference band-pass infrared filter. *Opto-Electronics Review*, 19(2), 193–197. <https://doi.org/10.2478/s11772-011-0008-4>. (Здобувачкою розроблено алгоритм розрахунку багатопарової періодичної структури).

24. Fitio, V., **Yaremchuk, I.**, & Bobitski, Y. (2011). Optical excitation of surface plasmon polariton and waveguide modes resonances on prismatic structures. *Optica Applicata*, 41(4), 929–939. http://direct.dbc.wroc.pl/Content/17198/OA_vol41_2011_4.pdf#page=135 (Здобувачкою проведено моделювання спектрів відбивання призмових структур в умовах хвилеводного та плазмон-поляритонного резонансів)

Розділи у книгах та збірках наукових праць, виданих за кордоном, які включено в наукометричні бази Scopus та Web of Science

25. Bulavinets, T., Yaremchuk, I., & Bobitski, Y. (2016). Modeling Optical Characteristics of Multilayer Nanoparticles of Different Sizes for Applications in Biomedicine. *Nanophysics, Nanophotonics, Surface Studies, and Applications. Springer Proceedings in Physics*, (vol 183, pp.101-115). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30737-4_9 (Здобувачкою проведено моделювання перерізів поглинання та розсіювання двошарових наночастинок).

26. Fitio, V. M., Yaremchuk, I. Y., Romakh, V. V., & Bobitski, Y. V. (2017). Numerical Solution of One-Dimensional Stationary Schrödinger Equation in the Frequency Domain. *International Conference on Nanotechnology and Nanomaterials. Springer Proceedings in Physics*, (vol 195., pp. 3-17). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56422-7_1 (Здобувачкою проведено

розрахунок дискретних рівнів енергії в періодичній квантоворозмірній структурі).

Статті в матеріалах конференцій, які індексовані у наукометричних базах Scopus та Web of Science

27. Fitio, V., Vernygor, O., **Yaremchuk, I.**, & Bobitski, Y. (2018 February). Analytical approximations of the noble metals dielectric permittivity. *14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, (pp. 426-430). IEEE. (Здобувачкою проведено моделювання діелектричної проникності срібла, золота, міді та алюмінію за аналітичними виразами)

28. **Yaremchuk, I.**, Petrovska, H., Fitio, V., Bobitski, Y., Sheregii, E., & Wojnarowska-Nowak, R. (2017, May). Sensors element on base of the relief Au-coated GaAs grating. *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, (pp. 709-712). IEEE. (Здобувачкою проведено моделювання спектральних характеристик ґратки на основі GaAs, покритої шаром золота).

29. **Yaremchuk, I.**, Fitio, V., Meškinis, Š., Tamulevičius, S., & Bobitski, Y. (2017). Design of Thin Film Nanocomposite Grating Based Sensors. *Nano-Optics: Principles Enabling Basic Research and Applications* (pp. 565-566). Springer, Dordrecht. (Здобувачкою проведено моделювання спектральних характеристик сенсорних елементів на основі нанокмпозитного матеріалу).

30. **Yaremchuk, I.**, Petrovska, Bobitski Y., Sheregii E., Wojnarowska-Nowak R. (2017, May). Gold-coated polycarbonate grating-based substrates for Raman spectroscopy. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, (pp. 717-720). IEEE. (Здобувачкою проведено моделювання спектральних характеристик полікарбонатної ґратки, покритої шаром золота)

31. Fitio, V., **Yaremchuk, I.**, Bendzyak, A., & Bobitski, Y. (2017, May). Application RCWA for studying plasmon resonance under diffraction by metal gratings. *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, (pp. 667-670). IEEE. (Здобувачкою проведено розрахунок спектральних характеристик металевих ґраток за допомогою модифікованого асимптотично точного методу зв'язаних хвиль)

32. Fitio, V., **Yaremchuk, I.**, Bendzyak, A., & Bobitski, Y. (2017, April). Modified RCWA method for studying the resonance diffraction phenomena on metal gratings. *IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, (pp. 170-174). IEEE. (Здобувачкою проведено порівняння спектральних характеристик металевих та діелектричних ґраток, розрахованих за допомогою модифікованого асимптотично точного методу зв'язаних хвиль)

33. **Yaremchuk, I.**, Petrovska, H., Karelko, I., Fitio, V., & Bobitski, Y. (2017, April). Optimization of the grating-based structures for the efficient SERS substrates. *IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*,

(pp. 119-123). IEEE. (Здобувачкою проведено моделювання спектральних характеристик металізованих ґраток для SERS застосувань)

34. Petrovska, H. A., **Yaremchuk, I. Y.**, Fitio, V. M., Suriadova, O. D., & Bobitski, Y. V. (2016, September). Optimization metal-coated gratings for sensors applications. *IEEE 13th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM)*, (pp. 30-31). IEEE. (Здобувачкою проведено розрахунок спектральних характеристик прямокутних металізованих ґраток)

35. Bulavinets, T. O., **Yaremchuk, I. Y.**, Kotsko, A. Y., & Bobitski, Y. V. (2016, September). Modeling absorption and scattering cross sections of the multilayer nanoshells in the near infrared spectrum region. *IEEE 13th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM)*, (pp. 35-37). IEEE. (Здобувачкою проведено розрахунок перерізів поглинання та розсіяння нанооболонки в залежності від геометричних параметрів)

36. **Yaremchuk, I.**, Fitio, V., & Bobitski, Y. (2016, February). Shape effect of silver nanoparticles on plasmon properties of DLC: Ag nanocomposites. *13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, (pp. 392-394). IEEE. (Здобувачкою проведено дослідження впливу розміру і форми наночастинок на спектри поглинання нанокмпозитного матеріалу)

37. **Yaremchuk, I. Y.**, Mineckiy, P. S., Fitio, V. M., Bobitski, Y. V., & Lesyuk, R. I. (2015, April). Plasmon resonance of the silver nanoparticles with different shape. *IEEE 35th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, (pp. 185-187). IEEE. (Здобувачкою проведено розрахунок перерізів поглинання та розсіювання металевими наночастинами різної форми).

38. **Yaremchuk, I.**, Tamulevicienė, A., Tamulevicius, T., Šlapikas, K., Andrulevicius, M., & Tamulevicius, S. (2015). Optical Properties Nanocomposite Composed of Ag Nanoparticles Embedded in a DLC Film. *Nano-Structures for Optics and Photonics. Series: NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics*. (pp. 565-566). Springer, Dordrecht. (Здобувачкою проведено розрахунок ефективної діелектричної проникності алмазоподібної вуглецевої плівки з диспергованими в неї наночастинами срібла)

39. Petrovska, H. A., Fitio, V. M., **Yaremchuk, I. Y.**, & Bobitski, Y. V. (2013). Properties of prismatic structures consisting dielectric waveguide. *IEEE 12th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM)*, (pp. 71-73). IEEE. (Здобувачкою проведено розрахунок спектрів відбивання)

40. **Yaremchuk, I.Y.**, Fitio, V.M., & Bobitski, Y.V. (2013). High transmission of light through metallic grating limited by dielectric layers. *IEEE 12th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM)*, (pp. 74-76). IEEE. (Здобувачкою проведено розрахунок спектрів пропускання)

41. **Yaremchuk, I.**, Fitio, V., & Bobitski, Y. (2012, May). Silver nanoparticles under plasmon resonance conditions. *28th International Conference on Microelectronics (MIEL), 2012* (pp. 297-300). IEEE. (Здобувачкою проведено розрахунок перерізів поглинання срібних наночастинок в залежності від їх радіусу)

42. Kurylo, P., & **Yaremchuk, I.** (2012, February). Optical properties of silver-silica nanoshells. *International Conference on Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, (pp. 520-520). IEEE. (Здобувачкою проведено розрахунок перерізів поглинання нанооболонок в залежності від їх геометрії)

43. **Yaremchuk, I.**, Fitio, V., & Bobitski, Y. (2012, February). Waveguide-based resonance sensor design. *International Conference on Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, (pp. 508-508). IEEE. (Здобувачкою проведено моделювання спектрів відбивання призмового сенсора в умовах хвилеводного резонансу)

44. Fitio, V.M., **Yaremchuk, I.Y.**, & Bobitski, Y.V. (2011, September). Optical properties of the Ag and Au nanowires gratings. *11th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM), 2011* (pp. 1-2). IEEE. (Здобувачкою проведено розрахунок спектрів поглинання срібних нанодротів, періодично розміщених на діелектричній підкладці)

Праці, що опубліковані в збірниках тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій

45. **Yaremchuk I.**, Fitio V., Andrela V., & Bobitski Ya. (2017, August) Influence of temperature on the surface-plasmon resonance sensor elements. *International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials (NANO 2017)*, (p. 478). SME Burlaka, Kiev (Здобувачкою проведено дослідження впливу температури на параметри матеріалів призмового сенсорного елемента)

46. Fitio, V.M., **Yaremchuk, I.Ya.**, Vernyhor, O.L., & Bobitski Ya.V. (2017, August) Plasmon resonance in the periodic square nanowires on dielectric substrates. *International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials (NANO 2017)*, (p. 578). SME Burlaka, Kiev (Здобувачкою проведено моделювання спектрів поглинання золотих нанодротів, періодично розміщених на підкладці)

47. **Yaremchuk, I.** (2017, Серпень) Influence Of Temperature On The Sensitivity Surface-Plasmon Resonance Sensor. *IX-а Українсько-польська науково-практична конференція «Електроніка та інформаційні технології», (ЕЛІТ-2017)* (с. 249-250). Видавництво ЛНУ ім. І. Франка, Львів (Здобувачкою проведено дослідження впливу температури на параметри срібного тонкого шару в призмовому сенсорному елементі)

48. Bobitski, Ya., **Yaremchuk, I.**, Sheregii, E., & Wojnarowska-Nowak, R. (2016, September) Gold-Coated Gratings for SERS Applications. *7th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers CAOL*2016* (pp.46-47). Odessa, Ukraine (Здобувачкою проведено моделювання розподілу поля в металізованих ґратках)

49. **Яремчук, І.Я.** (2015, Серпень) Моделювання оптичних характеристик алмазоподібних вуглецевих плівок допованих сріблом. *VII-а Українсько-польська науково-практична конференція «Електроніка та інформаційні технології», (ЕЛІТ -2015)* (с. 208). Видавництво ЛНУ ім. І. Франка, Львів (Здобувачкою проведено моделювання спектрів поглинання алмазоподібних вуглецевих плівок з металевими нановключеннями)

50. Barylyak A., **Yaremchuk I.**, Wojnarowska R., Sheregii E., & Bobitski Ya. (2015, June) Characterization and plasmonic effect of Ag-TiO₂:S nanocomposites. *Materials of scientific and technical conference "Laser technologies. Laser and their application"*, (pp. 125–127) Truskavets, Ukraine (Здобувачкою проведено дослідження оптичних характеристик наночастинок Ag-TiO₂:S)

51. **Yaremchuk I.**, Fitio V., Volos V., & Bobitski Ya. (2015, August) Plasmon effects in DLC-Ag nanocomposite structures. *Proc. 17th International Conference School Advanced Materials and Technologies*, (pp. 52) Palanga, Lithuania (Здобувачкою визначено умови виникнення плазмонного резонансу в композитних матеріалах)

52. **Yaremchuk I.**, Fitio, V., Meškinis, Š., Tamulevičius, S., & Bobitski, Ya. (2015, October). Thin-film nanocomposites grating based sensors. *International meeting Clusters and Nanostructured materials* (p. 138) Uzhhorod, Vodohorod, Ukraine (Здобувачкою проведено моделювання спектральних характеристик ґратки на основі нанокompозитного матеріалу)

53. **Yaremchuk I.**, Fitio, V., Velska, K., & Bobitski, Ya. (2014, August) Effective dielectric permittivity of plasmonic nanocomposite materials. *Summer school and International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials (NANO 2014)* (p. 316) Eurosvit, Lviv (Здобувачкою проведено розрахунок ефективної діелектричної проникності нанокompозиту на основі срібних наночастинок)

54. Fitio, V., **Yaremchuk I.** Ya., Romakh, V.V., & Bobitski, Ya.V. (2014, August) One-dimensional Stationary Schrödinger Equation with the Fourier Transformation. *International Conference Nanomaterials: Applications and Properties* (pp. 02NAESF07-1 - 02NAESF07-2) Lviv, Ukraine. (Здобувачкою проведено розрахунок дискретних рівнів енергії в квантоворозмірній структурі)

55. **Yaremchuk I.**, Tamulevičienė, A., Tamulevičius, T., Šlapikas, K., Andrulevicius, & M., Tamulevičius, S. (2013, August) Optical absorption properties of the DLC-Ag nanocomposite films. *15th International Conference School Advanced Materials and Technologies* (p. 97) Palanga, Lithuania (Здобувачкою проведено розрахунок спектрів поглинання нанокompозиту на основі срібних наночастинок)

56. **Yaremchuk I.**, Tamulevičienė, A., Tamulevičius, T., Andrulevicius, M., & Tamulevičius, S. (2013, November) Nanocomposite DLC-Ag based periodic structures for sensing applications. *International Conference NanotechItaly 2013* (p. 107). Venice, Italy. (Здобувачкою проведено моделювання оптичних характеристик періодичних структур на основі нанокompозитного матеріалу)

57. Fitio, V., **Yaremchuk I.**, & Bobitski, Ya. (2012, August) Interaction light with nanowires grating on dielectric substrate. *14th International Conference School Advanced Materials and Technologies* (p. 45) Palanga, Lithuania (Здобувачкою проведено розрахунок спектрів поглинання масиву золотих нанодротів)

58. **Yaremchuk I.**, Fitio, V., Andrulevicius, M., & Tamulevicius, S. (2012, August) Rigorous Coupled-Wave Analysis of Multilayered Grating Structures. *14th International Conference School Advanced Materials and Technologies* (p. 70)

Palanga, Lithuania (Здобувачкою проведено моделювання дифракційної ефективності діелектричних та металевих ґраток)

59. **Yaremchuk, I.** (2012, October) Guided-mode resonant grating filters. *13th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2012*, (p. 261) Kyiv, Ukraine (Здобувачкою проведено моделювання спектральних характеристик фільтра на основі ґратки)

60. Фітьо, В., **Яремчук, І.**, & Бобицький, Я. (2011, Вересень). Резонанс плазмонів в ґратках з нанодротами з срібла та золота. *III Науково-практична конференція «Електроніка та інформаційні технології», (ЕЛІТ-2011)* (с.143) Видавництво ЛНУ ім. І. Франка, Львів (Здобувачкою проведено розрахунок спектрів поглинання масиву срібних нанодротів)

61. Atamanyuk, N.V. Fitio, V.M., **Yaremchuk, I.Y.**, & Bobitski, Ya.V. (2011, October) Waveguide resonance in a prism structure. *3th International Conference «Electronics and applied physics»* (pp. 47–48) Kyiv, Ukraine (Здобувачкою проведено розрахунок спектрів відбивання призмової структури)

62. **Yaremchuk, I.Ya.**, Fitio, V.M., & Bobitski, Ya.V. (2011, October) Metallic nanowires gratings under plasmon resonance condition. *12th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2011* (p. 261) Kyiv, Ukraine. (Здобувачкою проведено дослідження умов виникнення плазмонного резонансу в масиві металевих нанодротів)

63. Fitio, V.M., **Yaremchuk, I.Ya.**, Bobitski, Ya.V. (2010, May) Resonance absorption of energy of waveguide modes in prismatic structure with metallic film and dielectrics layer. *8th International conference on Electronic Processes In Organic And Inorganic Materials*, (p. 148) Synyogora, Ukraine (Здобувачкою проведено моделювання спектральних характеристик призмової структури)

64. **Yaremchuk, I.Ya.**, Fitio, V.M., Bobitski, Ya.V. (2010, September) Surface Plasmon-polaritons and waveguide modes in prismatic structures. *10th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling LFNМ*2010* (pp. 63-65) Sevastopol, Ukraine. (Здобувачкою проведено дослідження умов виникнення плазмон-поляритонного та хвилеводного резонансів в призмових структурах)

65. **Yaremchuk, I.** (2010, October) Refractive index sensitivity the prismatic structures. *11th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2010* (p. 103) Kyiv, Ukraine (Здобувачкою проведено розрахунок спектрів відбивання призмових структур)

АНОТАЦІЯ

Яремчук І.Я. Хвилеводний, плазмон-поляритонний і плазмонний резонансні ефекти в мікро- та наноструктурах для сенсорної електроніки. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.04.07 «Фізика твердого тіла». – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Львів, 2018.

Дисертацію присвячено вивченню резонансних явищ, які виникають в процесі взаємодії електромагнітної хвилі з мікро- та наноструктурами в умовах оптичної дифракції та плазмонного, плазмон-поляритонного і хвилеводного

резонансів та моделюванню і оптимізації оптоелектронних елементів на їх основі. В роботі розроблено математичні моделі взаємодії електромагнітної хвилі з композитними мікро- та наноструктурами для розрахунку їх спектральних характеристик та виявлення умов виникнення резонансних ефектів. Розглянуто основні напрямки, переваги і досвід застосування резонансних мікро-та наноструктур в задачах аналізу і синтезу оптико-електронних систем; сучасний стан методів дослідження та проблем вдосконалення наявних і створення нових ефективних засобів фотоніки та електроніки, а також можливі напрямки та методи покращення експлуатаційних характеристик твердотільних елементів. Удосконалено метод зв'язаних хвиль, що дозволяє в простій математичній формі визначити умови виникнення резонансних ефектів в періодичних мікро-та наноструктурах сучасної оптоелектроніки. Вивчено особливості виникнення хвилеводного та плазмон-поляритонного резонансів в призмових та ґраткових структурах, а також проведена оптимізація їх структурних і оптичних характеристик з метою виготовлення дослідних зразків для оптоелектронних систем. Досліджено спектральні характеристики оптичного відгуку металевих наночастинок та їх ансамблів, а також встановлено характер впливу металевих нановключень з врахуванням їх розміру, форми та концентрації на оптичні та електронні властивості нанокомпозитних структур. Шляхом моделювання визначено оптимальні параметри субмікронних структур, які можуть бути сенсорами, що працюють на основі плазмон-поляритонного резонансу, можуть застосовуватися в спектроскопії комбінаційного розсіяння світла за рахунок виникнення резонансу плазмонів і відповідно значного підсилення поля.

Ключові слова: хвилеводний резонанс, плазмон-поляритонний резонанс, локалізований плазмонний резонанс, дифракційна ґратка, хвилевод, наночастинки, нанооболонки, нанокомпозитні матеріали, сенсори.

АННОТАЦІЯ

Яремчук И.Я. Волноводный, плазмон-поляритонный и плазмонный резонансные эффекты в микро- и наноструктурах для сенсорной электроники. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 «Физика твердого тела». - Национальный университет «Львівська політехніка», Министерство образования и науки Украины, Львов, 2018.

Диссертация посвящена изучению резонансных явлений, которые возникают в процессе взаимодействия электромагнитной волны с микро- и наноструктурами в условиях оптической дифракции и плазмонного, плазмон-поляритонного и волноводного резонансов и моделированию и оптимизации оптоэлектронных элементов на их основе. В работе разработаны математические модели взаимодействия электромагнитной волны с композитными микро- и наноструктурами для расчета их спектральных характеристик и выявления условий возникновения резонансных эффектов. Рассмотрены основные направления, преимущества и опыт применения

резонансных микро- и наноструктур в задачах анализа и синтеза оптико-электронных систем; современное состояние методов исследования и проблем совершенствования существующих и создания новых эффективных средств фотоники и электроники, а также возможные направления и методы улучшения эксплуатационных характеристик твердотельных элементов. Усовершенствован метод связанных волн, что позволяет в простой математической форме определить условия возникновения резонансных эффектов в периодических микро- и наноструктурах современной оптоэлектроники. Изучены особенности возникновения волноводного и плазмон-поляритонного резонансов в призмных и решеточных структурах, а также проведена оптимизация их структурных и оптических характеристик с целью изготовления опытных образцов для оптоэлектронных систем. Исследованы спектральные характеристики оптического отклика металлических, наночастиц и их ансамблей, а также установлен характер влияния металлических нановключений с учетом их размера, формы и концентрации на оптические и электронные свойства нанокompозитных структур. Путем моделирования определены оптимальные параметры субмикронных структур, которые могут быть сенсорами, работающих на основе плазмон-поляритонного резонанса, могут применяться в рамановской спектроскопии за счет возникновения резонанса плазмонов и соответственно значительного усиления поля.

Ключевые слова: волноводный резонанс, плазмон-поляритонный резонанс, локализованный плазмонный резонанс, дифракционная решетка, волновод, наночастицы, нанооболочки, нанокompозитные материалы, сенсоры.

ABSTRACT

Yaremchuk I.Ya. Waveguide, plasmon-polariton and plasmon resonance effects by micro- and nanostructures for sensor's electronics. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for a scientific degree of a Doctor of Technical Sciences on the specialty 01.04.07 – Solid State Physics. Lviv Polytechnic National University, The Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv 2018.

Thesis is devoted to the study of the resonance phenomena that arise in micro- and nanostructures under conditions of optical diffraction, waveguide, plasmon-polariton and plasmon resonances. The mathematical models of the electromagnetic wave interaction with micro- and nanostructures have been developed for the research their spectral characteristics and the determination of conditions occurrence of the resonance effects. The main directions, advantages and experience of using resonant micro- and nanostructures in problems of analysis and synthesis of the optoelectronic systems have been considered. The rigorous method of coupled waves is improved by the new numerical implementation of the S-matrix algorithm to relief diffraction gratings and also due to the new representation of the functional dependence of the dielectric permittivity of the periodic structure material in the form of a modified Fourier series.

The features of the waveguide and plasmon-polariton resonances in prism and grating based structures were studied. New relationships determining the connection

between the parameters of the prism sensor system and its sensitivity have been established. It is shown that the highest sensitivity of the change of the minimum angle of reflection on the change in the refractive index of surrounding medium is possible in the prism structure without the waveguide layer under the surface plasmon-polariton resonance. Knowledge about waveguide resonance grating structure is developed. It is shown that reflection spectra of such structure have a single peak at normal incidence and two peaks at oblique incidence. The transmission spectrum of a multilayer structure of type dielectric layer/metal grating/dielectric layer/substrate was investigated for TE polarization. The single peak of transmission in the spectral range from 1.0 to 10.0 microns with the spectral width of 200 nm was determined. The interactions of optical radiation with the system of periodically arranged the square gold and silver nanowires on the dielectric substrate have been analyzed.

The properties of metallic nanoparticles under conditions of the localized plasmon resonance have been studied. The analytical representations of dielectric permittivity of the copper, gold, silver and aluminum in a wide spectral range have been proposed. It is additionally confirmed that it is possible to shift the spectral position of the peak of surface plasmon absorption from visible wavelength range to the near-infrared spectrum by changing the thickness of the metal shell on the dielectric or semiconductor core.

The features of the interaction of electromagnetic radiation with nanocomposite materials have been researched. It is shown that effective dielectric permittivity of the nanocomposite material based on a diamond-like carbon film with dispersed silver nanoparticles the best describes by the Maxwell-Garnett effective medium theory. The influence of the volume concentration of the nanoparticles, the increase of the electromagnetic interaction between them and the change of the dielectric constant of the matrix on the position of the peak of plasmon absorption have been researched. The optical properties of the diamond-like carbon film dispersed silver nanoparticles, depending on the temperature of annealing, were simulated. It is shown that after annealing of the nanocomposite the plasmon peaks are shifted to the long-wave region, broadened and become pronounced quadrupole additional absorption peaks.

In order to produce prototype samples for optoelectronic systems the optimization of their structural and optical characteristics was carried out. The geometric parameters of the metallized gratings have been optimized and the sensors element has been created on its basis. Modeling and optimization of rectangular grating structures based on polycarbonate/silver and silver/silver has been carried out in order to obtain maximum gain of combining signals. It is shown that the achievement of the maximum amplification of a certain excitation wavelength is possible only for given combinations of the grating period, depth and filling factor corresponding to the resonance of localized surface plasmons on the metal interface.

Key words: waveguide resonance, surface plasmon-polariton resonance, localized plasmon resonance, diffraction grating, waveguide, nanoparticles, nanocomposite materials, sensors.