

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

д.т.н. доцента Пукаса Андрія Васильовича

на дисертаційну роботу Польового Віталія Євгеновича

“Моделювання поширення плазмон-поляритонних хвиль в шаруватих структурах”,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 113 – Прикладна математика

(галузь знань 11 – Математика і статистика)

Актуальність теми дисертації.

Сучасний розвиток оптичних технологій дозволяє конструювати високоточні оптичні пристрої з використанням нанорозмірних оптичних структур. Такі пристрої дозволяють керувати світловими променями на малих характерних масштабах, та знаходять своє застосування у різних сферах науки та технологій. Їхня робота базується на виникненні елекромагнітних коливань у провідних елементах структур. Ці коливання називають плазмон-поляритонними хвилями. Як приклади таких пристроїв можна згадати високочутливі оптичні хвилеводи дуже компактних розмірів, пристрої лазерної стетоскопії, плазмонні біосенсори та ін. Часто згадані структури складаються із провідного середовища (метал, графен тощо), оточеного непровідними середовищами (вакуум, діелектрики тощо).

Наявність провідного середовища та його характерні розміри вимагають опису протікання процесу поширення плазмон-поляритонної хвилі, спричиненого впливом світлового потоку та, які б врахували зазначені особливості досліджуваної системи. Для коректного опису такого процесу необхідно побудувати математичну модель, яка б дозволила дати адекватні відповіді на питання про вплив на поведінку хвилі розмірів провідного середовища, квантоворозмірних ефектів (які при таких розмірах мають значний вплив) та як врахувати крайові ефекти на межах середовищ системи, враховуючи стрибкоподібну поведінку функції діелектричної проникності при переході від діелектрика до металу.

Усе вищевикладене вказує на те, що розглянута у роботі задача поширення плазмон-поляритонних хвиль в структурах діелектрик/метал/діелектрик, де в ролі металу виступає плівка товщиною від кількох до декілька десятків моношарів, є актуальною та потребує значної уваги з боку дослідників на сучасному етапі розвитку оптики та плазмоніки.

Наукові результати та їх новизна.

У дисертаційній роботі дисертантом побудовано та розвинуто математичні моделі, які з різних сторін розглядають поведінку плазмон-поляритонних хвиль на поверхні металу в гетерогенних структурах діелектрик/метал/діелектрик.

Першочергово варто відмітити побудову математичної моделі процесу на основі системи рівнянь Максвелла з врахуванням просторової дисперсії. Отримано систему хвильових рівнянь, у якій функція діелектричної проникності металу залежить від просторової координати нормальної до поверхні поділу, а також наведені крайові умови для зшивання розв'язків в кожній окремо взятій частині структури.

З отриманих рівнянь побудовано модель, в якій метал розглянуто як 2D провідну плівку, на поверхні якої розподілені заряджені частинки. У межах отриманої моделі розраховано частотний спектр плазмон-поляритонних хвиль розглянувши модель хаотичних фаз провідності (RPA) металу та порівняно з класичною моделлю Друде. Показано, що, починаючи з деяких значень хвильового вектора, частотний спектр плазмонних збуджень починає суттєво відрізнятися від класичного випадку.

Далі, з тієї ж системи рівнянь виведено математичну модель, яка враховує товщину металевого прошарку (через наявність просторової залежності в функції діелектричної проникності), та показано, що така модель дає краще узгодження з експериментальними даними в порівнянні з попередньою моделлю.

У наступній моделі вперше враховано вплив умови електронейтральності на частотний спектр плазмон-поляритонних хвиль, що дало ще краще узгодження з експериментальними даними.

Найкращі ж результати отримано вперше вивчивши вплив взаємодії електронів (кулонівських кореляцій) та врахувавши їх вплив на частотний спектр крізь вплив на хімічний потенціал, введений у функцію діелектричної проникності металу.

Практичне значення.

Отримані у роботі результати дають нову інформацію про явище поширення плазмон-поляритонних хвиль у структурах діелектрик/метал/діелектрик та зв'язують це явище із іншими фізичними явищами та процесами. Побудовані дисертантом математичні моделі є коректними та практично верифіковані автором порівнянням з класичними моделями та експериментальними даними.

Аналіз змісту роботи.

Робота складається з анотації, вступу, огляду літератури, трьох розділів, висновків, списку літератури з 144 позицій та одного додатку. Містить 13 рисунків та 6 таблиць. Повний обсяг дисертації 121 сторінка.

Анотація дисертації чітко та зрозуміло передає ключові моменти та наукові результати, отримані у роботі, та повністю відповідає змісту роботи.

У **вступі** описано об'єкт, предмет, мету та задачі дослідження. Наведено методи отримання та процес верифікації результатів дисертаційного дослідження. Вказано інформацію про особистий внесок та публікації здобувача.

В огляді літератури (перший розділ) описано сучасний стан розвитку оптичних технологій та плазмоніки. Проаналізовано стандартні та новітні сфери застосування плазмон-поляритонних хвиль та явищ, пов'язаних з ними. Згадано стандартні способи збудження плазмон-поляритонних хвиль. Також, досліджено стандартні підходи до моделювання поширення електромагнітних хвиль у шаруватих структурах. Виконано аналіз класичних та квазікласичних моделей опису провідності та діелектричної функції металевого прошарку, зокрема модель Друде, модель Друде-Зоммерфельда, наближення Томаса-Фермі. Додатково, автором згадано про теоретичні методи дослідження електромагнітних збуджень у плазмонних структурах.

У другому розділі описано результати релевантних до дисертаційного дослідження експериментальних робіт. Здійснено постановку задачі поширення плазмон-поляритонних хвиль у гетерогенній структурі діелектрик/метал/діелектрик. На основі систем рівнянь макроскопічної електродинаміки Максвелла, використовуючи інтегральне перетворення Фур'є по часу та просторових координатах, отримано систему хвильових рівнянь для кожної області структури. Розв'язки системи запропоновано "зшити", використовуючи умови неперервності компонент електромагнітного поля та умови згасання полів на безмежності. Умови зшивання разом зі системою хвильових рівнянь дають крайову задачу для знаходження частотного спектру плазмон-поляритонних хвиль.

У третьому розділі зазначено, що для металевих систем, товщиною від кількох до декілька десятків моношарів (у роботі введено акронім АТМП – атомно-тонкі металеві плівки), квантоворозмірні ефекти починають відігравати значну роль. У світлі цього факту описано підходи до опису АТМП з врахуванням таких ефектів, а саме моделі опису діелектричної функції АТМП. Розглянуті моделі показують різноманітні підходи до цієї задачі та свідчать про те, що її можна розглядати по різному в залежності від того, на що робиться акцент при побудові моделі. Розглянуту в цьому розділі модель, побудовану на основі тензора діелектричної проникності, використано для подальших розрахунків та симуляцій. Побудовано та симульовано математичні моделі з врахуванням умови електронейтральності, проникнення електронів металу в області діелектриків та кулонівських кореляцій. Фізичні параметри структури для симуляції взято з перевірених літературних джерел. Для вирішення проблеми розв'язку хвильового рівняння в області металу застосовано розклад магнітної напруженості електромагнітного поля в ряд за малим параметром та представлення функції діелектричної проникності у вигляді суми усереднення по координаті z та "збуреної" частини, яка відповідає за стрибки функції на краях АТМП. Отримані результати показують, що врахування квантоворозмірних ефектів мають значний вплив на частотний спектр хвиль та наближають результати симуляції до експериментальних даних.

У **четвертому розділі** розглянуто метал як 2D провідне середовище, що дало змогу застосувати спрощені крайові умови та оминати проблему розв'язку хвильового рівняння в області металу, просто описавши метал через провідність. Умови неперервності та загасання полів на безмежності дають в результаті дисперсійне рівняння для частотного спектру. Розглянуто класичну модель провідності Друде та порівняно отримані результати з аналогічними, отриманими для моделі хаотичних фаз (RPA). У наступному підпункті досліджено вплив товщини металу на частотний спектр плазмон-поляритонних хвиль. З цією метою в моделі знову ж таки використано розклад в ряд напруженості електромагнітного поля та усереднення діелектричної функції металу.

У **додатку** наведено коди комп'ютерних програм, які використовувалися для розрахунку частотного спектру плазмон-поляритонних хвиль.

Оформлення дисертації відповідає вимогам до оформлення дисертації, затверджених наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 року № 40. Мова і стиль викладення тексту дисертації чітко висвітлюють одержані науково-практичні результати.

Повнота викладення результатів в опублікованих працях.

За темою дисертації здобувачем опубліковано 14 наукових праць. З них 4 статті у наукових журналах та 2 матеріали конференцій, які індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus. Результати роботи були представлені та обговорені на 10 наукових конференціях (з них 9 міжнародних), які, зокрема, засвідчують апробацію результатів роботи. Усі публікації безпосередньо стосуються теми роботи та відображають зміст окремих розділів дисертаційного дослідження.

Довідка про результати перевірки роботи на академічний плагіат рукопису дисертаційного дослідження свідчить про відсутність порушення **академічної доброчесності**.

Зауваження до дисертації.

Дисертаційне дослідження Польового В.Є. має незаперечну наукову та практичну цінність, але в ході ознайомлення з роботою мною було помічено такі моменти:

1. У розділі два доцільно було б навести ширше математичні викладки, адже в деяких випадках складно одразу зрозуміти перехід від одного рівняння до іншого.
2. У третьому розділі не порівняно описані квантові моделі діелектричної проникності металу та відсутнє обґрунтування вибору саме моделі, побудованої на основі тензора діелектричної проникності для подальших симуляцій. Для ширшого підтвердження точності та адекватності моделей доцільно додати більше прикладів симуляції використаної

функції діелектричної проникності металу та графіків розрахунку хвильового вектора Фермі для різних металевих прошарків.

3. У розділі чотири варто було б надати строгіше пояснення задовільності та коректності переходу до розгляду металу як 2D електронної системи.
4. У розділах три та чотири також цікаво було б побачити результати отримані не тільки для нульового наближення розкладу вектора магнітної напруженості поля, але й, хоча б, для першого.
5. Робота містить незначну кількість граматичних неточностей.

Висновок.

Усі вищевказані зауваження висунуті до дисертації Польового В. Є. “Моделювання поширення плазмон-поляритонних хвиль в шаруватих структурах” не впливають на позитивну оцінку дисертації та значимість отриманих результатів. Робота є завершеною науково-дослідною працею, з вагомим теоретичними та практичними результатами, та повністю відповідає наказу МОН України №40 від 12.01.2017р. “Про затвердження вимог до оформлення дисертації”, Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. № 167), які висуваються до робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а здобувач Польовий Віталій Євгенович **заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії** з спеціальності 113 Прикладна математика.

Офіційний опонент

доктор технічних наук, доцент,

завідувач кафедри комп'ютерних наук

Західноукраїнського національного

університету



Андрій ПУКАС

Андрій ПУКАС

Андрій ПУКАС