

## ВІДГУК

### офіційного опонента

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.

**Актуальність теми дисертації.** У роботі розглянуто важливу задачу математичного моделювання, яка стосується вивчення фізичних закономірностей збудження та поширення плазмонів у структурах “діелектрик-метал-діелектрик”. Такого типу структури є перспективними з точки зору використання плазмон-поляритонних хвиль, збуджуваних у них, для створення нових засобів електроніки, що можуть ефективно працювати у нанорозмірній області. На даний час такого типу структури є предметом великої кількості як експериментальних, так і теоретичних досліджень. Проблема полягає у тому, що для збудження плазмон-поляритонної хвилі товщина металевої плівки, яка розділяє діелектричні середовища, повинна бути тонкою, тобто містити декілька атомних шарів. Очевидно, що у такому випадку електрофізичні характеристики цієї плівки, зокрема її комплексна діелектрична проникність, повинні враховувати квантово-механічні і розмірні ефекти електронної системи металу. Тобто тут виникають дві проблеми, а саме: проблема коректного знаходження електрофізичних характеристик електронної системи тонкої плівки металу, яку розв’язують з залученням засобів квантової механіки і статистичної фізики і проблема коректного опису збудження і поширення у такій системі плазмон-поляритонних хвиль з залученням методів розв’язування крайових задач електродинаміки. В обох випадках врахування поверхонь розділу середовищ відіграє ключову роль. Один з методів розв’язання цієї загальної задачі бачиться у створенні нових моделей утворення та поширення плазмон-поляритонних хвиль і розробленні ефективних методів математичного моделювання цього явища. Тому розглянута у дисертації задача поширення плазмонних хвиль у структурах “діелектрик-метал-діелектрик” є актуальною.

### Наукові новизна

Новизна математичних моделей поширення плазмон-поляритонних хвиль у структурах “діелектрик-метал-діелектрик”, розроблених дисертантом у цьому дослідженні полягає у вивченні впливу на цей процес ефектів і явищ, які раніше не розглядалися. А саме:

- на основі квантово механічного опису металевої плівки як невзаємодіючої електронної системи, поміщеної в потенціальну яму скінченної глибини, розвинуто математичну модель поширення плазмон-поляритонних хвиль, яка дозволяє врахувати вплив товщини металевої плівки на частотний спектр плазмонних збуджень;
- показано, що залежність частотного спектру від товщини металу має характерну осциляційну картину, яка відповідає аналогічній залежності для хвильового вектора Фермі.

- розроблено модель формування плазмон-поляритонних хвиль, яка враховує електрон-електронну взаємодію в металі та її вплив на частотний спектр. Показано, що отримані результати добре узгоджуються з експериментальними даними.
- Для усіх розроблених моделей показано, що квантові ефекти починають втрачати свій вплив при збільшенні товщини металу і значення частотного спектру наближаються знизу до відомих у літературі результатів.

**Практичне значення роботи** полягає в тому, що запропоновані та досліджені дисертантом моделі доповнюють відому досі картину поширення плазмон-поляритонних хвиль у “діелектрик-метал-діелектрик” структурах із ультра тонкими металевими шарами, а отримані результати вказують на те, що повна та коректна картина такого процесу повинна базуватися на врахуванні не тільки явищ відомих з класичної електродинаміки, але й враховувати вплив квантово механічних ефектів.

### **Аналіз змісту роботи**

В **огляді літератури** автор аналізує літературні джерела, які включають як класичні результати, так і нові роботи, присвячені сучасним експериментальним та теоретичним підходам до дослідження плазмон-поляритонних збуджень. Наведено приклади збудження хвиль на ґратці, та при проходженні світлового пучка крізь призму. Детально описано класичну модель Друде провідності металів. Аналізується статистика Фермі-Дірака, на основі якої отримується квазікласичний підхід до опису провідності металу, а також квазікласичне наближення Томаса-Фермі діелектричної проникності.

У **другому розділі** подано результати актуальних експериментальних досліджень, які показують інтерес до задач поширення плазмонів у шаруватих структурах. Наголошується на дослідженнях, в яких розглядаються тонкі плівки, товщиною в декілька атомних шарів. Далі формулюється базова для усієї роботи крайова задача електродинаміки, яка описує взаємодію ТМ-хвилі з тришаровою структурою “діелектрик-метал-діелектрик”. Для її розв’язання застосовується просторове та часове інтегральне перетворення Фур’є у кожній з областей структури. Кінцеві рівняння моделі записуються дисертантом у вигляді системи диференціальних рівнянь відносно трансформант Фур’є за часом і просторовою координатою компоненти магнітного поля, а також умов спряження полів на плоских межах поділу середовищ. Інтегральні перетворення враховують нелокальний характер взаємодії поля з середовищем. Суть запропонованої моделі полягає у тому, що розв’язок сформульованої крайової задачі, формально дозволяє дисертанту отримати шукану структуру поля і залежність компонент поля від спектрального параметра. Ця обставина, дає можливість знайти спектр збуджуваних плазмонів, а відтак моделювати різні умови збудження плазмон-поляритонних хвиль. Очевидно, що для такої симуляції потрібно мати ще і модель провідності металу та функції діелектричної проникності середовищ, що робиться у наступних розділах.

У **третьому розділі** детально проаналізовано спосіб отримання функції діелектричної проникності провідного середовища в наближенні хаотичних фаз. Наведено



статичну функцію діелектричної проникності металу, виражену через матричні елементи потенціалу електрон-електронної взаємодії та поляризаційний оператор. Використовується також модель діелектричної проникності, з врахуванням просторової дисперсії, що дозволяє краще моделювати перехід між металом та діелектриком, а також врахувати проникнення “хвоста” електронної густини металу в діелектрик. Розглянуто також модель діелектричної проникності в межах формалізму матриці густини. Використовуючи квантову теорію збурень, отримано усі компоненти тензора діелектричної проникності та вказано умови переходу до моделі Друде. Для розв’язку хвильового рівняння в області металу, яке є диференціальним рівнянням другого порядку зі змінними коефіцієнтами, автором застосовано розклад вектора магнітної напруженості поля за малим параметром та розклад функції діелектричної проникності на збурену та усереднену компоненти. Отримані в ході симуляції результати порівняно з експериментальними даними.

У четвертому розділі дисертант розглядає метал як двовимірну плівку з рівномірно розподіленим зарядом. Такий підхід дозволив отримати просту модель, в якій, крім умов зшивання, потрібно задати вираз для провідності металу. При моделюванні функцій діелектричної проникності провідного середовища проводиться порівняння результатів, отриманих за моделлю Друде і за моделлю хаотичних фаз. Досліджено також вплив товщини металу на частотний спектр плазмон-поляритонних хвиль. Показано, що для моделей товщина, яких складає 2-15 моношарів, спостерігається краще узгодження експериментальними даними.

**Оформлення дисертації та автореферату** відповідає вимогам до оформлення дисертації, затверджених наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 року № 40.

**Повнота викладення результатів в опублікованих працях.** За темою дисертації автором опубліковано необхідну кількість наукових праць, зокрема є статті у журналах, та матеріалах конференцій, які індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus. Обговорення та апробація результатів дослідження проводилася на міжнародних наукових конференцій.

#### **Дотримання вимог академічної доброчесності**

У дисертаційній роботі Польового В. Є. “Моделювання поширення плазмон-поляритонних хвиль в шаруватих структурах” відсутній плагіат. Про що й свідчить довідка про результати перевірки роботи на академічний плагіат рукопису дисертаційного дослідження. Текст матеріалів дисертації супроводжується всіма необхідними посиланнями на першоджерела та запозичення з праць інших авторів.

#### **Зауваження та дискусійні положення**

- У розділі 2, на стор. 47, автор детально описує фізичний зміст рівнянь Максвелла (2.6) і практично нічого не говорить про фізичний зміст крайових умов (2.7).



- Оскільки ці умови відіграють суттєву роль при побудові моделей, то для полегшення розуміння, варто було б детальніше на цьому зупинитись.
- Ключова модель, яку використовує дисертант – це крайова задача електродинаміки (2.58). Не зовсім ясно, чи для отримання її розв'язку, дисертанту необхідні усі 6 умов спряження, чи достатньо тільки частини з них.
  - Для однозначного розв'язку крайових задач дисертант вимагає виконання умов загасання полів на нескінченності (див. формулу (2.56), а також с. 88). Загалом це вірно. Але у таких ситуаціях краще говорити, що поля повинні задовольняти умовам випромінювання, бо загасання полів на нескінченності не може бути довільним. Для автора найбільш підходящі були б умови граничного поглинання.
  - Для знаходження спектра плазмон-поляритонних хвиль автор використовує дисперсійні рівняння (3.55), (4.12), (4.15), які у загальному випадку є неоднозначними функціями комплексного спектрального параметра, оскільки містять корені. Тобто для однозначного знаходження усього спектра, корені дисперсійних рівнянь необхідно шукати на Рімановій поверхні з розрізами. Це варто було б в роботі відзначити.
  - При читанні дисертації зустрічаються описки, які не утруднюють розуміння змісту.

**Загальна оцінка дисертаційної роботи.** Дисертація Польового В. Є. “Моделювання поширення плазмон-поляритонних хвиль в шаруватих структурах” є завершеним дослідженням з вагомими теоретичними та прикладними результатами, а наведені зауваження не впливають на позитивний висновок. Робота 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.

Офіційний опонент  
 Куриляк Дозислав Богданович  
 лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки,  
 доктор фізико-математичних наук, професор,  
 провідний науковий співробітник  
 Відділу теорії хвильових процесів та оптичних систем діагностики  
 Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка, НАН України

  
 (підпис) /Куриляк Д. Б.

Підпис Куриляка Д. Б, засвідчую

