

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Герасимової Дарії Олександрівни “Дифракційне випромінювання на структурах з круглих діелектричних, металевих і графенових нанониток, що збуджуються модульованим потоком електронів”, подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 110 – фізика та астрономія

Актуальність теми дисертації

Рухомі заряджені частинки, наприклад електрони, випромінюють електромагнітні хвилі при проходженні через межу між матеріальними середовищами. Такі ефекти називають перехідним або черенковським випромінюванням. Випромінювання електронів, що рухаються у вакуумі без перетину будь-яких матеріальних кордонів, також привертає увагу дослідників з 50-х років минулого століття. Найвідомішим прикладом такого ефекту є випромінювання Сміта-Перселла, яке пов'язане з пучком електронів, що проходить через періодичну матрицю. У цьому плані ефект Сміта-Перселла є лише окремим випадком більш загального явища, яким є випромінювання поверхні; а струми поляризації, індуковані на металевих і діелектричних об'єктах електронними променями, що протікають поблизу них, не торкаючись їх. Цей вид електромагнітного випромінювання зазвичай називають дифракційним.

Мікрохвильовий діапазон дифракційного випромінювання вже використовується як зручний метод для неінвазивної діагностики пучків у прискорювачах, тобто для дистанційного зондування положення та швидкості пучків частинок (електронів). Такі пристрої називають моніторами положення променя. Розробка таких пристроїв може бути поширена і на оптичний діапазон, оскільки поява і стрімкий розвиток нанотехнологій відкриває шлях до створення ансамблів нанорозмірних оптичних розсіювачів з контрольованою формою і розташуванням. Нанорозмірні компоненти вносять дуже незначні збурення в промінь, його швидкість і траєкторію, і тому його поле може бути фіксованим. Тому аналіз ефекту дифракційного випромінювання можна проводити в рамках класичної теорії розсіювання електромагнітних хвиль, тобто як розсіювання хвиль на об'єктах відомої форми з відомими матеріальними параметрами. Багато проблем у цій галузі ще не досліджені, тому вивчення випромінювання від діелектричних, срібних і графенових круглих нанодротів і решіток з таких дротів є актуальною проблемою як в теоретичному, так і в інженерному відношенні.

Структура та зміст роботи

Дисертаційна робота складається з анотацій, вступу, п'яти розділів, які містять 73 рисунки, висновків, списку використаних джерел із 159 найменувань та додатку. Загальний обсяг дисертації – 175 сторінок.

Вступ зосереджено на обґрунтуванні вибору теми дослідження, конкретизації об'єкта дослідження, роз'ясненні мети і завдань роботи, обґрунтуванні методів дослідження, акцентуванні наукової новизни отриманих результатів і їх практичній цінності, конкретизації особистого внеску автора, апробації результатів дослідження на наукових міжнародних конференціях та підтвердження зв'язку теми дисертації з науковими дослідженнями Інституту, де була підготовлена дисертація.

Перший розділ присвячено огляду літератури та уточненню методів дослідження, які застосованих в роботі. Автор зосереджується на методах аналізу розсіювання хвиль на круглих діелектричних циліндрах, способах, як можна представити поле гармонічно модульованого пучка заряджених частинок, описі властивостей комплексної діелектричної проникності срібла як функції частоти, опису характеристик графену з використанням формалізму Кубо, специфікації перерізів розсіювання - поглинання та ролі оптичної теореми, а також важливості досліджень, пов'язаних з проблемою зв'язних власних значень.

У **другому розділі** автор розглядає дифракційне випромінювання пучка частинок, що рухаються поблизу діелектричних нанодротів. Тут отримано характеристику розсіювання та поглинання дифракційного випромінювання у видимому діапазоні частот для одиночної круглої діелектричної нанонитки та димеру подвійних круглих діелектричних нанониток, збуджених модульованим електронним променем. Для розв'язування задач використовується напіваналітична техніка, яка використовує розклади Фур'є в локальних координатах кожного дроту та теорема додавання для циліндричних функцій. Використовуючи такий підхід, автор досліджує резонансні поля дифракційного випромінювання окремого діелектричного дроту та ідентифікує їх як лінійні комбінації двох вироджених мод круглого резонатора. Показано, що для димера моди є супермодами, і вони побудовані на природних модах складових діелектричних порожнин, об'єднаних разом і підкоряються подвійній симетрії. Для обґрунтування наведених вище співвідношень автор вивчає постановку задачі розсіювання для скінченної кількості круглих дротів, пояснює механізм зведення задачі до матричного рівняння Фредгольма 2-го роду, досліджує резонанси на модах шепочучої галереї для одиночного діелектричного нанодроту, пояснює, як два діелектричні нанодроти можуть бути використані як модель датчика положення променя, також проведено комплексне чисельне моделювання, пов'язане з резонансами на димерних супермодах.

Третій розділ присвячено дифракційному випромінюванню пучка частинок, що рухаються поблизу срібних нанодротів. У цьому розділі чисельно досліджено характеристики розсіювання та поглинання дифракційного випромінювання у видимому діапазоні для окремого круглого срібного нанодроту та пари круглих срібних нанодротів і нанотрубок. Такі конфігурації досліджуються із застосуванням додатків Beam Position Monitor. Залежна від довжини хвилі діелектрична проникність срібла взята з експериментальних даних і має від'ємні значення дійсної частини. Завдяки цьому факту, субдовжина хвилі в срібних нанодротах відома є нанорезонаторною завдяки локалізованим поверхнево-плазмонним модам. Автор використовує розклад поля у вигляді азимутального ряду Фур'є та теорему додавання для циліндричних функцій, подібно до розділу 2. Такий підхід дозволяє отримати розв'язок задачі для локального проводу аналітично та звести його до рівняння Фредгольма другого роду у випадках нескінченної матриці для димерів зі срібного дроту та срібної трубки. Збіжність чисельного розв'язку підтверджується теоремою Фредгольма.

У **четвертому розділі** підхід, розроблений у попередньому розділі, поширено на дослідження дифракційного випромінювання пучка частинок, що рухаються поблизу покритих графеном діелектричних нанодротів. Вважається, що швидкість пучка фіксована, і

можна застосувати розділення змінних у локальних координатах і теорему додавання для циліндричних функцій, щоб звести задачу дифракційного випромінювання до матричного рівняння Фредгольма другого роду. Двосторонні резистивні граничні умови застосовуються для графенових покриттів малої товщини. Електронна провідність і, як наслідок, поверхневий імпеданс графену, визначаються за допомогою формалізму Кубо. Значну увагу приділено резонансним модам ґратки для скінченної сукупності покритих графеном нанодротів. Теоретичні результати підтверджені чисельним моделюванням, пов'язаним з дослідженням резонансів на плазмонних супермодах і ефектів дифракційного випромінювання для скінченної решітки нанодротів, покритих графеном.

У **п'ятому розділі** попередні результати використовуються для обґрунтування порогових умов для одинарних і подвійних квантових нанодротових лазерів, покритих графеном. Тут реалізовано концепцію лазерної проблеми власних значень для дослідження електромагнітного поля в присутності кільцевого квантового дроту, виготовленого з активного матеріалу та обгорнутого графеновою оболонкою, і димера з двох ідентичних квантових дротів, покритих графеном, за порогової стаціонарної емісії. Такий підхід дозволяє виділити моди для пари власних значень, а саме частоти та порогові значення індексу підсилення квантового дроту для плазмонних і дровових мод таких нанолазерів. Як і в попередніх розділах, автор використовує квантовий формалізм Кубо для опису провідності графену та класичну крайову задачу Максвелла для функцій, які описують поле. Чисельні результати повнохвильового аналізу властивостей однодротової лазерної моди та властивостей димерно-дротяної лазерної моди підтверджують ефективність запропонованого підходу.

Висновки роботи чітко сформульовані; вони повною мірою висвітлюють результати, отримані в роботі. За змістом та рівнем аргументованості висновки відповідають вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Список літератури має інформативний характер; всебічно характеризує галузь досліджень і свідчить про широку ерудицію автора в цій галузі.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, їх достовірність

Автором дисертації виконано аналіз комплексної проблеми дослідження розсіювання електромагнітних хвиль діелектричними, срібними та графеновими нанодротоми, проведено усестороннє теоретичне та практичне обґрунтування шляхів її вирішення. Обґрунтованість і достовірність наведених у дисертаційній роботі наукових результатів, висновків і рекомендацій досягається використанням обґрунтованих методів розв'язування задач розсіювання на сукупності нанорозмірних тіл та ретельного багатоаспектного системного аналізу фізичних процесів у сукупності таких проводів з використанням результатів чисельного моделювання.

Новизна наукових положень дисертаційної роботи

У процесі дослідження ефектів дифракційного випромінювання для різних конфігурацій круглих нанодротів і нанотрубок, які складаються з діелектрика, срібла і графену і опромінюються модульованим пучком заряджених частинок, виходячи з поставленої мети роботи, автор отримав ряд нових наукових та технічних результатів, серед яких, на мою думку, найважливішими є:

1. Встановлено, що траєкторія пучка зсувається з центрального (симетричного) положення між подвійними нанодротоми, а спектри дифракційного розсіяння та поглинання випромінювання демонструють появу раніше невідомих резонансів, пов'язаних із димерними супермодами, поля яких ортогональні, і інтенсивності нових піків пропорційні переміщенню променя або його кутовому зсуву.

2. У процесі аналізу дифракційного випромінювання для розріджених скінченних періодичних решіток нанодротів покритих графеном з використанням числових розрахунків показано, що домінуюча особливість у частотних спектрах потужності дифракційного випромінювання визначає резонанси на плазмонних модах кожного дроту та моди всієї решітки.

3. Аналізуючи порогові умови генерації мод одиночного круглого активного дроту, покритого графеном, автором встановлено, що якщо радіус дроту більше 10 мкм, то «паразитні» моди діелектричного дроту не слабші за «робочі» плазмонні моди по відношенню до частот і порогових значеннях підсилення, що є важливою інформацією для практичної реалізації відповідних решіток.

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості використання результатів чисельного моделювання для розробки плазмонних графенових нанолазерів. Розроблене програмне забезпечення для дослідження характеристик розсіювання та поглинання наноматриць може бути використане як платформа для чисельної оптимізації оптичних пристроїв, ключовими елементами яких є нанодроти кругового перерізу.

Основні результати роботи опубліковано у 25 наукових роботах, з них 6 опубліковано в міжнародних наукових журналі квартилів Q1 – Q2, 19 публікацій є матеріалами міжнародних наукових конференцій, цитованих у Scopus.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Отримані результати досліджень мають достатню апробацію, що підтверджено доповідями на престижних міжнародних наукових конференціях, зокрема,

- European Microwave Conferences (EuMC), Paris (2019), Utrecht (2020), London (2021), Milan (2022), Berlin (2023);
- IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas, and Electronic Systems (COMCAS), Tel Aviv (2019);
- European Conferences on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen (2020), Madrid (2022), Florence (2023);
- IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS), San Diego (2023).

Зауваження

1. На сторінці 9, Анотація українською мовою, пункт перший наукової новизни, рядок третій, слово «відсутні» замінити на «невідомі».

2. Це зауваження впливає з попереднього, а саме на сторінці 22 у першому пункті наукової новизни, третьому рядку неправильно вжито слово «absent», замість «unknown».

3. В останньому пункті наукової новизни (сторінка 23, другий абзац нижче), де йдеться про поріг суперрежимів для автономного та комплекту проводів, заявлено, що порогові значення можуть бути різними, але це не демонструється переконливо чисельним моделюванням.

4. Чисельні результати представлені широко, але якість рисунків вимагає більш високої роздільної здатності, оскільки кількісна оцінка характеристик випромінювання незручна (це стосується рис. 2.5, рис. 2.6 тощо).

5. На сторінках 67-68 сказано, що оптична теорема була задоволена на рівні машинної точності, а граничні умови були задоволені з тією ж точністю, що й розв'язок матричного рівняння (2.36), але немає числових дані щодо цієї заяви. На мою думку, такі цифрові дані були б вагомим підтвердженням аналітичних тверджень, які стосуються цього положення.

Підсумовуючи, слід зазначити, що наведені вище зауваження щодо недоліків дисертації не впливають на загальну позитивну оцінку виконаного дисертаційного дослідження; не зменшують наукової новизни та практичної цінності дисертаційної роботи, не знижують загальної позитивної оцінки проведеного дослідження.

Висновок

Дисертаційна робота «Дифракційне випромінювання від діелектричних, срібних і графенових кругових нанодротових конфігурацій, збуджених модульованим електронним пучком» на здобуття вченого ступеня доктора філософії, автором якої є Герасимова Дарія Олександрівна, написана сучасною науково-технічною мовою, послідовно, логічно та грамотно. Стиль викладу матеріалу забезпечує доступність його сприйняття. Дисертація за змістом є завершеним науковим дослідженням, що містить нові науково обґрунтовані результати, важливі на сучасному етапі вивчення характеристик розсіювання нанодротів і решіток з таких нанодротів, і відповідає напрямам досліджень за спеціальністю 104. – Фізика та астрономія.

Наукова новизна дисертації є безсумнівною, оскільки результати дослідження опубліковані в шести статтях у журналах, які належать до кuartилів Q1 – Q2. За науковим рівнем, практичною значимістю, рівнем апробації та якістю публікацій дисертація відповідає вимогам, викладеним в наказі Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» а також відповідає вимогам, передбаченим пунктом 10 «Порядку проведення експерименту з присудження наукового ступеня доктора філософії» та затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. № 167 «Про проведення експерименту з присудження наукового ступеня доктора філософії», а її автор Герасимова Дарія Олександрівна заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика і астрономія».

Офіційний опонент:

завідувач відділу числових методів математичної фізики
Інституту прикладних проблем механіки і математики
ім. Я. С. Підстригача НАН України,
доктор технічних наук, проф.

Михайло АНДРІЙЧУК

1 лютого 2024 р.

