

Голові спеціалізованої вченої ради
Д 64.157.01
Інституту радіофізики та електроніки ім.
О.Я. Усикова НАН України
61085, м. Харків, вул. Ак. Проскури, 12

ВІДГУК

офіційного опонента провідного наукового співробітника наукового центру Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба доктора технічних наук, професора Сухаревського Олега Ілліча на дисертаційну роботу Белоброва Володимира Олександровича “Електромагнітні поля та пороги самозбудження періодичних резонаторів з кругових діелектричних металевих та квантових ниток у шаруватому середовищі”, яка подана на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03– радіофізика.

1. Актуальність обраної теми. В сучасній фізиці та техніці електромагнітних хвиль різноманітні перспективні пристрої для обробки та передачі сигналів за допомогою терагерцових, інфрачервоних та видимих хвиль мають велике значення та постійно розвиваються. Тому і джерела хвиль у цих діапазонах привертають особливий інтерес дослідників. Серед найбільш перспективних джерел такого випромінювання є лазери на основі напівпровідникових або монокристалічних чи полімерних, з домішками барвників, мікрорезонаторів, а також решітки з нанорезонаторів, що занурені в шарувате середовище, що містить активну зону. Виготовлення таких лазерів вимагає надзвичайно коштовних технологій, тому попереднє комп'ютерне моделювання таких лазерів є критично важливим для його прискорення та здешевлення.

В дисертаційній роботі вивчаються паралельно задачі розсіяння плоских хвиль, що падають нормально на нескінчені решітки з діелектричних або металевих кругових нанониток та лазерні задачі на власні значення для таких самих решіток за наявності квантових нанониток або активних зон іншої форми. В лазерній задачі припускається, що активна зона періодичного резонатора заповнена немагнітним матеріалом, який характеризується комплексним показником заломлення з відомою дійсною частиною та невідомою уявною частиною. Остання строго від'ємна, що відповідає посиленню. Тоді власні значення, які відшукуються в лазерній задачі, мають вид пар дійсних чисел: 1) частота випромінювання та 2) поріг

самозбудження, що є уявною частиною показника заломлення активної зони. Такий підхід був раніше застосований у вивченні двовимірних мікрорезонаторних лазерів довільної форми, але ще не використовувався для аналізу власних мод періодичних резонаторів з квантових нанониток у шаруватому середовищі або інших подібних лазерних структур.

В дисертації вказаний вище підхід вперше застосовується для вивчення мод одновимірних плоскошаруватих діелектричних резонансних структур (як допоміжна ціль, що важлива для подальшого дослідження), а також, більш детально та систематично, для мод нескінченної решітки з квантових ниток у вільному просторі та багатоелементних структур, які містять решітки з діелектричних, срібних та квантових нанониток у шаруватому середовищі.

Вважаю, що обрана тема дисертаційної роботи на сьогодні є актуальною.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами і темами. Дисертацію виконано в лабораторії мікро і нано оптики відділу квазіоптики Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт, а також в рамках кількох конкурсних програм і тем, в тому числі й Державної цільової програми «Нанотехнології та наноматеріали», де відповідний проект був відзначений як один з найкращих. Робота також була тісно пов'язана з декількома міжнародними товариствами і фондами, зокрема з проектами Європейського наукового фонду, в рамках котрих дисертант стажувався у Франції, Великобританії, Чехії та Туреччині.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації, їхня достовірність і новизна. У дисертації розроблено ефективний і збіжний чисельний метод дослідження резонансного розсіяння та поглинання електромагнітних хвиль плоскошаруватими структурами, що містять нескінченні решітки з кругових діелектричних чи срібних нанониток, а також дослідження лазерних задач на власні значення для таких структур за умови наявності в них активної зони.

При постановці обох типів задач використовується потужний арсенал методів теорії граничних задач для гармонійних рівнянь Максвелла з точними граничними умовами та умовами випромінювання. Важливо вказати, що автор не використовує ніякі наближення, пов'язані з припущеннями щодо величини довжини хвилі випромінювання відносно діаметру нанониток чи періоду решітки. Далі, матеріальні властивості срібла характеризуються на основі експериментальних даних для видимого діапазону хвиль, в якому дійсна частина його діелектричної проникності від'ємна, тобто плазмонний ефект повністю враховується. Всі розглянуті задачі систематично зводяться до матричних рівнянь Фредгольма другого роду або до детермінантних рівнянь на їх основі, які розв'язуються чисельно з гарантованою збіжністю результатів. Результати чисельних експериментів

на базі розроблених методів повністю узгоджуються між собою та відповідають окремим раніше відомим результатам та експериментальним ефектам. Тому отримані в дисертації наукові положення, висновки і рекомендації дійсно обґрунтовані та достовірні.

Новизна отриманих наукових результатів не викликає сумніву. Насамперед, автором було вперше ретельно досліджено так звані ґраткові моди періодичних відкритих резонаторів з кругових нанониток та пов'язані з ними резонансні явища при розсіянні та поглинанні світла. Автор також вперше одержав зручні вирази для компонент полів у випадку нормально падаючої на решітку хвилі, провів розрахунки коефіцієнтів проходження, відбиття та поглинання при змінних параметрах решіток, вивчив залежності порогів та частот самозбудження ґраткових та плазмонних мод для відповідних активних структур від геометричних та фізичних параметрів, та вивів асимптотичні наближення для порогів та частот самозбудження мод решітки, що складається з квантових нанониток у вільному просторі.

Автор вивів, що в задачі розсіяння світла при збільшенні відносної відстані між діелектричними або металевими нанонитками, резонанси на специфічних для таких структур ґраткових модах стають добротнішими. Таки самі властивості мають місце і в лазерній задачі на власні значення для решітки з квантових нанониток, тобто при збільшенні відстані між нитками поріг самозбудження істотно зменшується. Додатково було вивчено поведінку плазмонних мод і відповідних їм резонансів в умовах їх співіснування з ґратковими модами і резонансами у решітках, що складаються із срібних нанониток та сумісно з срібних та діелектричних або квантових нанониток.

Із роботи дисертанта та його публікацій у міжнародних фахових журналах можна зробити висновок, що отримані результати у сукупності нові, а їх достовірність не викликає сумнівів.

4. Повнота викладу результатів в опублікованих працях. Основні результати усіх розділів дисертації своєчасно опубліковані у 48 наукових працях, з них 7 статей у міжнародних наукових журналах з високими імпакт-факторами, один розділ в колективній монографії та 40 доповідей на провідних міжнародних наукових конференціях.

5. Значущість для науки і практики висновків здобувача. В роботі побудована математично обґрунтована та фізично адекватна модель розсіяння гармонійного електромагнітного поля на плоскошаруватих структурах з нескінченими решітками з діелектричних чи срібних ниток. Така модель та відповідні чисельні алгоритми відкривають можливість точного вивчення тонких резонансних ефектів, на які багаті подібні структури. При умові введення до постановки задачі квантових елементів, тобто активних шарів чи ниток, ця модель модифікована для вивчення частот випромінювання та порогів самозбудження власних мод плоскошаруватих

структур, що містять нескінчені решітки з срібних та квантових нанониток, або відповідних решіток у вільному просторі.

Розроблений метод дозволив ретельно вивчити ґраткові резонанси, що є притаманні решіткам та виникають біля так званих аномалій Релея. Численні результати довели, що при збільшенні відстані між нитками у решітці, добротності цих резонансів істотно збільшуються. Цей факт проілюстровано за допомоги графіків та рельєфів модуля коефіцієнта відбиття та коефіцієнта поглинання у задачах дифракції, в залежності від частоти та нормованого періоду або показника заломлення. Було також обчислено близькі поля у резонансах на цих модах, які мають дуже велику інтенсивність – цій результат є важливим для застосувань решіток у біосенсорах показника заломлення.

У лазерних задачах на власні значення знайдено, що для ґраткових мод решітки з квантових нанониток у вільному просторі пороги самозбудження падають, якщо відстань між нитками збільшується. Цей факт додатково доведений завдяки отриманим аналітично-асимптотичним наближенням для частот та порогів самозбудження ґраткових мод. За допомогою аналітично виведених залежностей було показано, що біля кожної аномалії Релея існує безліч ґраткових мод. Одночасно для ґраткових мод та резонансів на них була виявлена інша цікава закономірність: якщо зменшується контраст між показниками заломлення ниток решітки та оточуючого середовища, то добротності ґраткових резонансів у задачі дифракції зростають; відповідно, в лазерних задачах на власні значення пороги самозбудження ґраткових мод зменшуються.

Ці властивості ґраткових мод далі вивчено у плоскошаруватих структурах, які містять нескінчені решітки з нанониток. Вони є фізичним підґрунтям для розробки нових та покращення вже існуючих оптичних пристроїв та систем. Зокрема, решітки з сотень та тисяч металевих нанониток та їх плазмонні та ґраткові резонанси знаходять своє застосування в оптичних біосенсорах за рахунок посиленого відбиття та поглинання світла, а також ефектів посилення ближнього поля. Виявлені закономірності взаємного впливу плазмонів і ґраткових резонансів істотно поглиблюють розуміння резонансних властивостей таких решіток та роблять їх перспективними для створення нових оптичних біосенсорів з поліпшеними характеристиками.

В останні декілька років у світі активно вивчаються, але здебільшого експериментальними методами, нові лазери на основі періодичних решіток з наночастинок та нанониток, занурених в шарувате середовище, що містить активну зону. Отримані в дисертації результати що до властивостей ґраткових мод дозволяють по-новому підійти до осмислення результатів експериментів та запропонувати нові перспективні лазерні конфігурації.

Слід зазначити, що усі основні результати, наведені в дисертації, належать її авторові. Про їх високу цінність для сучасної науки і практики свідчить велика кількість посилань на публікації автора: 242 посилання за Гугл та 232 за Скопус, а також доволі високий індекс Хірша автора, що дорівнює 7.

6. Можливі конкретні шляхи використання результатів дослідження.

Висока ефективність розроблених алгоритмів дозволяє використовувати їх як основу програмного забезпечення для розрахунків основних характеристик різноманітних нанолазерів, наноантен, поглиначів та біосенсорів, ключовими елементами яких є одновимірні решітки з нанониток у діелектричному шарі.

Тому одержані дисертантом результати можуть бути використані при виконанні відповідних дослідних проектів в Інституті фізики напівпровідників НАН України, Інституті фізики НАН України, Інституті електронних процесів НАН України, Інституті радіофізики та електроніки НАН України, а також у Харківському національному університеті, Київському національному університеті, Львівському національному університеті, Одеському національному університеті та Харківському національному університеті радіоелектроніки.

7. Недоліки та зауваження.

Дисертація В.О. Белоброва має ряд окремих недоліків:

1) при розв'язанні лазерних задач на власні значення отримані асимптотичні наближення для порогів та частот самозбудження мод тільки симетричного відносно осі Ox типу, але відсутні відповідні вирази для антисиметричного типу;

2) з результатів аналітичного дослідження витікає, що аномалії Релея є точками накопичення власних значень, але цей висновок не сформульовано;

3) відсутні дослідження рішення задачі про похиле падіння плоскої електромагнітної хвилі на розглянуті ґраткові структури.

4) не розглянуті як лазерні задачі, так і задачі розсіяння у випадку E -поляризації для ґраток, які містять срібні нитки.

5) бажано було б представити якісь результати щодо верифікації розроблених чисельних методів шляхом їх порівняння з, наприклад, результатами інших авторів, отриманих іншими методами.

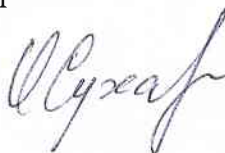
Слід відзначити надзвичайно широку **апробацію роботи** на наукових семінарах у провідних наукових установах України та Європи, а також на відомих міжнародних конференціях та симпозіумах.

8. Загальні висновки

Дисертаційна робота Белоброва Володимира Олександровича виконана на досить високому науковому рівні, є завершеним науковим дослідженням, в якому отримані нові науково обґрунтовані результати, що у сукупності вирішують актуальну наукову задачу розробки лінійної електродинамічної моделі, здатної описати частоти і пороги самозбудження власних електромагнітних полів в періодичних відкритих резонаторах з діелектричних та металевих нанониток з активними зонами у вигляді квантових нанониток.

Дисертація і автореферат якісно оформлені. Автореферат в повній мірі відбиває зміст дисертаційної роботи, містить методику досліджень та основні результати дисертаційної роботи. Зміст дисертаційної роботи і отримані результати відповідають паспорту спеціальності 01.04.03 – радіофізика та задовольняє вимогам "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.13 року № 567, що пред'являються до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент
 провідний науковий співробітник
 наукового центру Повітряних Сил
 Харківського національного університету Повітряних Сил
 імені Івана Кожедуба
 Заслужений діяч науки і техніки України
 доктор технічних наук професор



О.І. СУХАРЕВСЬКИЙ

03 .10.2017

Підпис професора О. І. Сухаревського засвідчую.

Заступник начальника
 Харківського національного університету Повітряних Сил
 імені Івана Кожедуба
 з наукової роботи
 Заслужений діяч науки і техніки України
 доктор технічних наук професор



Т.В. ДВІЦОВ

07 .10.2017

