

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Белоброва Володимира Олександровича "Електромагнітні поля та пороги самозбудження періодичних резонаторів з кругових діелектричних, металевих та квантових ниток у шаруватому середовищі", подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика

1. Актуальність дослідження та зв'язок з науковими програмами, темами.

Створені в останні роки відкриті мікро- і нанорезонатори привертають до себе велику увагу як з точки зору фундаментальних досліджень взаємодії світла з речовиною, так і з точки зору можливості створення на їх основі економічних малопотужних і високошвидкісних приладів для цілей телекомунікацій і оптичної обробки сигналів. Однією з актуальних задач фотоніки сьогодні є розробка і створення мікро- і нанолазерів – оптичних пристроїв, що дозволяють генерувати когерентне електромагнітне поле, локалізоване на субхвильовому масштабі. Мініатюризація лазерів до субхвильового масштабу є вкрай перспективним напрямком в світлі різних прикладних застосувань. У їх число входить створення оптичних каналів зв'язку між електронними компонентами обчислювальної схеми. Іншою потенційною сферою застосування мікро- і нанолазерів може стати томографія біологічних тканин і окремих клітин, в тому випадку, якщо такі лазери стануть біосумісними і легко впроваджуваними. З точки зору приладових застосувань резонатори з активною областю на основі квантових точок і ниток відкривають можливості для створення джерел окремих фотонів та інших пристроїв, заснованих на принципах квантової електродинаміки. Проте, створення мікро- і нанолазерів і демонстрація лазерної генерації на субхвильовому масштабі утруднюються високим рівнем омичних втрат в плазмонних елементах, що призводить до підвищення порогу лазерної генерації. З цієї причини, актуальною є задача розробки мікро- і нанолазерів з низьким порогом генерації, що дозволило б отримати субхвильову лазерну генерацію при кімнатних температурах.

Усі завдання дисертації спрямовано на вирішення важливої наукової задачі – встановлення фізичних механізмів і закономірностей власних електромагнітних полів, їх частот і умов самозбудження періодичних відкритих резонаторів, що містять діелектричні, металеві та квантові нитки і знаходяться, в загальному випадку, в шаруватому діелектричному середовищі. Важливість проведених досліджень обумовлена як їх суто науковою цінністю, так і великим значенням для прикладних застосувань. Тому тематика дисертації Белоброва В.О. є актуальною як в теоретичному, так і в прикладному плані і становить інтерес для розробників апаратури мікрохвильового, терагерцового і оптичного діапазонів хвиль.

Про актуальність, наукову та практичну значимість дисертації переконливо свідчить і те, що вона виконувалася в рамках 2 держбюджетних науково-дослідних робіт ІРЕ ім. О.Я.Усикова НАН України, Конкурсної цільової програми НАН України "Наноструктурні системи, наноматеріали, нанотех-

нології", Конкурсної наукової теми Міністерства освіти і науки України, Програм наукового обміну НАН України з науковими організаціями Великобританії, Туреччини, Чехії (дивись список тем в авторефераті Белоброва В.О.).

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.

Представлені наукові положення, висновки і рекомендації, що виносяться на захист, є досить обґрунтованими. Постановка дослідницького завдання виконана аргументовано та переконливо. Дисертація Белоброва В.О. складається зі вступу, який містить загальну характеристику роботи, п'яти розділів основного тексту, висновків до роботи і списку використаних джерел.

У першому розділі проведено огляд літератури, присвяченої дослідженню дифракції хвиль на нескінченних ґратах з круглих ниток. Проаналізовано недоліки та обмеження, які характерні для задач розрахунку характеристик власних мод пасивних відкритих резонаторів. Сформульовано лінійна задача на власні значення для активних резонаторів. Наведена оптична теорема для відкритих резонаторів з активними зонами.

У другому розділі автором розглянуто задачу на власні значення для одновимірних плоскошаруватих діелектричних резонаторів. На основі аналізу даного завдання з використанням апарату матриць перенесення досліджені моди лазерів на основі мікрорезонатора, що складається з діелектричного шару з активним середовищем, і вертикального оптичного резонатора типу VCSEL з квантової ямою, розташованою між двома відбивачами Брегга. В рамках лінійної задачі вперше проведено пряме кількісне визначення частот і порогів самозбудження мод активних резонаторів замість раніше вивчених добротностей мод пасивних резонаторів. Показана можливість зниження порогів генерації для мод, частоти самозбудження яких знаходяться в зоні запирання відбивачів Брегга.

Третій розділ дисертації стосується досліджень фізичних закономірностей розсіювання плоскої хвилі на решітці з діелектричних нанониток. Вперше показана можливість виникнення ґраткових резонансів поблизу аномалій Релея і викликаних періодичністю структури. З використанням цих результатів вивчені двовимірні моделі періодичних активних резонаторів, утворених одною решіткою з квантових ниток. Показано, що в таких резонаторах ґраткові моди мають наднизькі пороги збудження. Зниження порогів самозбудження ґраткових мод можна домогтися збільшенням відстані між квантовими нитками, зменшуючи їх показник заломлення, а також розміщуючи квантові нитки між розподіленими відбивачами Брегга. Отримано асимптотичні вирази для порогів і частот самозбудження ґраткових мод.

У четвертому розділі показано, що при розсіюванні і поглинанні хвиль на решітці з металевих нанониток і на бінарної решітці з діелектричних і металевих нанониток в оптичному діапазоні спостерігаються резонанси на плазмонних модах, що пов'язані з дисперсійними властивостями матеріалу, і на ґраткових модах, що пов'язані з періодичністю решітки. Вперше виявлено,

що в лазерному резонаторі на основі бінарної решітки з квантових і металевих нанониток спільно існують плазмонні і ґраткові моди, причому пороги самозбудження останніх можуть бути нижче порогів самозбудження плазмонних мод.

У п'ятому розділі вивчені моди періодичних відкритих резонаторів, що складаються з діелектричного шару з вбудованою в нього ґраткою з квантових або срібних ниток. Показано, що в діелектричному шарі з решіткою з квантових ниток з показником заломлення, близьким до показника заломлення шару, ґраткова мода може мати низький поріг самозбудження.

3. Достовірність та наукова новизна отриманих результатів.

Достовірність і обґрунтованість результатів, наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в даній дисертаційній роботі, не викликає сумнівів і визначається коректністю постановки задач, а також тим, що при їх розв'язанні використовувалися строгі фізико-математичні моделі, апробовані методи обчислювальної математики. Достовірність отриманих результатів підтверджується також їх несуперечністю при зведенні до окремих випадків.

Наукова новизна отриманих у дисертації результатів природно впливає з актуальності й новизни вибору об'єкта досліджень, а фізично обґрунтований підхід до вибору й рішення необхідних для його повного вивчення завдань дозволяє автору переконливо це підтвердити. Наукова новизна представлених в дисертації результатів також обумовлена тим, що всі вони отримані вперше і раніше не були відомі. Цей висновок впливає з проведеного Белобровим В.О. огляду літератури. Ознакою наукової новизни є також те, що більшість результатів опубліковано в провідних міжнародних журналах, в яких всі статті проходять ретельне експертне рецензування.

4. Завершеність і стиль викладу, повнота відображення результатів у публікаціях.

Аналіз сукупності наукових результатів і положень, характеристика яких наведена в пунктах 1-2, дозволяє зробити висновок про їх внутрішню єдність і визначити особистий внесок автора в науку. Він полягає в тому, що здобувач запропонував, математично обґрунтував новий підхід для вирішення актуального завдання радіофізики, який складається в розробці лінійної електродинамічної моделі, здатної описати не тільки частоти, але і пороги самозбудження власних електромагнітних полів в періодичних відкритих резонаторах з круглих квантових ниток в шаруватому середовищі. В рамках цієї моделі вирішені модифіковані завдання на власні значення для одновимірних шаруватих діелектричних резонаторів, резонаторів, утворених ґратами з квантових ниток і плоскошаруватих діелектричних структур, що містять решітки з срібних або квантових ниток.

Зауважимо, що дана робота має серйозний потенціал для подальшого розвитку. Тому є досить актуальним, використовуючи запропоновані в роботі методи і підходи, вивчити можливості побудови тривимірних моделей періо-

дичних резонаторів з урахуванням впливу активного середовища і запропонувати нові резонансні системи мікро- і нанолазерів.

Дисертація написана цілком зрозуміло й грамотно, науково-технічна термінологія використовується достатньо коректно, структура роботи є логічною.

Основні результати опубліковані в 8 статтях у профільних наукових виданнях. Основні положення дисертації пройшли апробацію на 28 міжнародних наукових конференціях, а також на наукових семінарах. Результати роботи повністю відображені в зазначених публікаціях. Опубліковані статті за своїм змістом не дублюють одна одну. Всі опубліковані наукові праці відповідають темі дисертації. Зміст автореферату відповідає тексту дисертації.

5. Науково-практична значимість отриманих результатів і можливі шляхи їхнього застосування.

Наукова і практична значимість результатів дисертаційної роботи Белоброва В.О. полягає в тому, що в ній розроблені і реалізовані нові чисельні алгоритми і комп'ютерні програми для електродинамічного аналізу і оптимізації характеристик мод лазерних резонаторів, які містять періодично структуровані активні зони з квантових нанониток або ж ґрати з металевих нанониток. Встановлені характеристики мод в таких резонаторах значно поглиблюють розуміння поведінки порогів їх самозбудження при наявності періодичності. Тим самим вони можуть використовуватися для інтерпретації експериментальних даних і для пошуку перспективних конфігурацій шляхом попереднього моделювання мікро- і нанолазерів.

Дисертаційна робота представляє наукову і практичну цінність для фахівців в області обчислювальної електродинаміки, квантової радіофізики, оптоелектроніки та ін. Результати, отримані при її виконанні, можна рекомендувати для застосування в різних установах як дослідницького, так і науково-виробничого напрямків.

6. Недоліки та зауваження.

Дисертація Белоброва В.О. "Електромагнітні поля та пороги самозбудження періодичних резонаторів з кругових діелектричних, металевих та квантових ниток у шаруватому середовищі" має ряд недоліків. Серед них є насамперед такі:

1. У першому розділі проведено огляд літератури, присвяченої дослідженню періодичних відкритих резонаторів, але досить в конспективній формі. Бажано було б провести більш детальний і ґрунтовний огляд цих досліджень. Для попередньої оцінки порогів самозбудження розглянутих резонаторів з урахуванням обраного напрямку досліджень автору слід було б привести типові характеристики активних середовищ лазерів, в яких передбачається використовувати дані резонатори.

2. При вивченні частот і порогів самозбудження плоского багатопаруватого резонатора доцільно було б провести порівняння результатів розрахунків автора, виконаних в рамках одновимірної електродинамічної моделі, з ре-

зультатами відомих розрахунків з використанням тривимірних моделей і результатами експериментів.

3. При розгляді умов збудження ґраткових мод в періодичному резонаторі з квантових ниток важливим є аналіз залежності стабільності їх частот і порогів самозбудження від порушення періодичності ниток. Це питання автор не ставить в дисертації.

4. У розділі 4 відсутній аналіз фізичних закономірностей існування плазмонних резонансів. Для повноти досліджень бажано було б привести результати розрахунків для бінарної решітки при Е-поляризації випромінювання.

5. Не завжди наводиться аргументація для вибору значень фізичних параметрів при знаходженні кількісних характеристик досліджуваних закономірностей (див., наприклад, стор.97 – чим обумовлений даний вибір коефіцієнта заломлення для ниток; значення деяких параметрів наводяться з точністю до 17 знаків - стор. 111).

6. Автор не завжди акуратно підходить до застосування наукової термінології і використовує дослівні переклади англомовних термінів, замість прийнятих у вітчизняній науковій літературі: "матеріальний поріг випромінювання" - стор. 53, "спектр діаметрів повного розсіювання" - стор.130. Англомовні терміни також використовуються в позначеннях параметрів на рисунках, що ускладнює знайомство з роботою.

7. У тексті дисертаційної роботи використовується лабораторний жаргон і невдалі звороти типу "лазерна задача" - стор. 31, "від товщини ядра резонатора" - стор. 67.

7. Загальні висновки.

Ці зауваження не зменшують загальну позитивну оцінку рецензованої роботи та не стосуються принципових результатів і висновків дисертації. Детальний аналіз дає змогу зробити висновок, що подана до захисту робота є завершеним дослідженням та містить важливі наукові результати.

Здобувач виконав значний обсяг цікавих і актуальних досліджень, запропонував і обґрунтував новий підхід і чисельні алгоритми для електродинамічного аналізу частот і порогів самозбудження власних електромагнітних полів в періодичних відкритих резонаторах. Дисертант отримав науково-обґрунтовані результати дослідження фізичних процесів, що виникають в одновимірних шаруватих діелектричних резонаторах, в резонаторах, утворених ґратами з діелектричних, металевих або квантових ниток і в плоскошаруватих діелектричних структурах, що містять решітки з срібних або квантових ниток. Ці результати є новими і мають як наукове, так і прикладне значення для розробників елементної бази в мікрохвильовому, терагерцовому і оптичному діапазонах хвиль.

За тематикою проведених досліджень, змістом і наслідками дисертація Білоброва В.А. повністю відповідає спеціальності 01.04.03 – радіофізика. Матеріали дисертації повністю опубліковані в реферованих провідних наукових журналах і були своєчасно подані на конференціях і симпозіумах, що проводилися за тематикою досліджень.

Автореферат повністю відповідає змісту дисертації. Виклад матеріалу в дисертації відповідає сучасним вимогам, вона написана чітко, хорошою науково-літературною мовою.

Вважаю, що за актуальністю, обсягом та новизною рецензована дисертаційна робота “Електромагнітні поля та пороги самозбудження періодичних резонаторів з кругових діелектричних, металевих та квантових ниток у шаруватому середовищі” відповідає вимогам, зазначених у п. 11 “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567, які висуваються до кандидатських дисертацій, а її автор, Белобров Володимир Олександрович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук із спеціальності 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач кафедри квантової радіофізики
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна



В. О. Маслов

4 жовтня 2017 року

