

## ВІДГУК

офіційного опонента **Фітьо Володимира Михайловича** на дисертаційну роботу ***“Плазмонні та ґраткові моди в розсіянні, поглинанні та випромінюванні світлових хвиль скінченними решітками з нанониток”*** Натарова Дениса Михайловича, поданої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03– радіофізика

**Актуальність теми дисертаційної роботи.** В наш час велику зацікавленість викликають різноманітні періодичні структури, які функціонують в оптичному діапазоні. На їх основі розроблені різноманітні пристрої, що мають практичне застосування: дифракційні ґратки для спектральних приладів, оптичні фільтри, ґраткові поляризатори, подільники хвильових фронтів, сенсори фізичних величин і т.п. Більш детальне дослідження таких ґраткових структур виявило цікаві особливості, наприклад резонанс поверхневих локалізованих плазмонів в періодично розташованих нанодротах на діелектричній підкладці. В ґраткових структурах з металевою підкладкою при певних умовах виникає збудження поверхневої плазмон-поляритонної хвилі, і при виникненні резонансу можна отримати коефіцієнт відбиття, що буде близьким до нуля, причому резонанс порушується при зміні параметрів ґратки або навколишнього середовища. Резонанс є доволі вузькосмуговим, якщо підкладка є срібною чи золотою. В діелектричних ґратках може виникати резонанс хвилеводних мод, причому коефіцієнт відбиття може бути рівним одиниці. Хвилеводна мода дуже повільно загасає при своєму поширенні, особливо при малій модуляції показника заломлення ґратки. В такому випадку розміри ґратки, реально виготовлених, можуть бути меншими ніж відстань, на якій амплітуда хвилеводної моди зменшується в  $e$  раз. Очевидно, що в цьому випадку традиційні методи аналізу, наприклад метод зв'язаних хвиль (RCWA в англомовній літературі) не можуть привести до успіху. Тобто в даній ситуації необхідно проводити аналіз ґратки зі скінченним числом періодів. Чисельне моделювання дозволяє досить швидко провести аналіз різноманітних періодичних структур, навіть таких, які існуючі технології не дають можливості виготовити їх. Чисельними експериментами ми можемо оптимізувати структуру для досягнення необхідних параметрів, а вже тоді виготовити. З цієї точки зору розрахунок ґраток зі скінченним числом періодів та розроблення відповідних нових чисельних методів аналізу є важливим та сприяє створенню нових пристроїв нанооптики.

Деякі вчені прогнозують, що засобами нанооптики, можна створити процесори, які по своїй швидкодії будуть перевищувати на два порядки швидкодію процесорів на основі

кремнію. Мабуть для таких процесорів необхідно створити наноласери, квантові нанопідсилювачі, нанохвилеводи та інші необхідні елементи. Також наноласери можуть бути чутливим елементом наносенсорів, адже частота їх генерації визначається сталими поширення хвилеводної моди, що поширюються в нанонитках з підсилювальними властивостями

Тому наукові результати теоретичних досліджень та комп'ютерного моделювання по даній проблематиці, що відображені в дисертації Натарова Д.М., є актуальними та своєчасними, і мають як фундаментальне так і прикладне значення.

Необхідно відзначити, що великою мірою наукові результати дисертаційної роботи отримані в результаті проведення досліджень в рамках держбюджетних тем, які виконувались в ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України: конкурсна наукова тема Міністерства освіти і науки України «Інноваційне чисельне моделювання квазіоптичних фокусуючих систем» (шифр «Фокус», номер держреєстрації 0109U005351, 2009-2010, виконавець); державна конкурсна цільова програма "Нанотехнології та наноматеріали": «Фундаментальні математичні та чисельні дослідження оптичних електромагнітних полів окремих та зв'язаних мікрорезонаторних лазерів з нанорозмірними активними кулями, нитками та стрічками» (шифр «Світло», номер держреєстрації 0110U004737 2010 -2014, виконавець); держбюджетна науково-дослідна робота ІРЕ ім. А. Я. Усикова НАН України: «Розробка методів оптики та квазіоптики для встановлення закономірностей та особливостей взаємодії терагерцевого випромінювання з фізичними та біологічними об'єктами» (шифр «Ореол», номер держреєстрації 0111U001079, 2012-2016, виконавець); держбюджетна науково-дослідна робота ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України: «Розвиток та застосування оптичних і квазіоптичних методів для дослідження процесів генерації і перетворення електромагнітних хвиль терагерцевого, інфрачервоного і видимого діапазонів» (шифр «Ореол-1», номер держреєстрації 0117U004036, 2017-2019, виконавець).

Потрібно наголосити, що дисертант також підвищував свою кваліфікацію під час співпраці з закордонними науковими установами: програма наукового обміну НАН України з Держкомітетом з наукових і технічних досліджень Туреччини, спільно з Університетом Бількент, Анкара ( «Innovative electromagnetic modeling of multielement quasioptical focusing systems-mm and terahertz ranges», № 106E209, 2007-2009); програма європейського наукового фонду «New frontiers in millimeter and sub-millimeter wave integrated dielectric focusing systems» спільно з Інститутом електроніки та телекомунікацій Університету м. Ренн 1, Франція. Тема «Resonances in the scattering and focusing of waves by periodically structured

ensembles of metal and dielectric wires» («Newfocus», 2010); програма європейського наукового фонду «New approaches to biochemical sensing with plasmonic nanobiophotonics» спільно з Інститутом фотоніки та електроніки АНЧР, Прага, Чеська республіка. Тема: «Modes of core-shell nanowire and nanotube plasmonic lasers» («Plasmon-Bionanosense», 2015).

Робота також була частково підтримана наступними конкурсними міжнародними стипендіями: «Resonant scattering of electromagnetic waves by finite periodic configurations of sub-wavelength circular wires», IEEE APS стипендія для аспірантів, 2011; «Broadband resonance absorption and scattering of light for ultrathin plasmonic solar cells and biosensors: modelling and optimization», Міжнародний Вишеградський фонд, Європейський Союз, спільно з Інститутом телекомунікацій, м. Варшава, Польща, 2012-2013; «Plasmon and periodicity assisted wideband absorbers for solar cells and biosensors», Rennes Metropole Mobility Grant спільно з Інститутом електроніки та телекомунікацій Університету м. Ренн 1, Франція, 2013. Тобто дисертант має великий довід у проведенні наукових досліджень як в Україні так і за кордоном. Також враховуючи, те що наукові дослідження, результати яких наведені в дисертаційній роботі, проводились практично на протязі десяти років, можна стверджувати, що Натаров Д.М. є кваліфікованим спеціалістом високого рівня в області радіофізики.

**Наукова новизна.** В дисертаційній роботі переконливо показана наукова новизна отриманих результатів. До найбільш значущих та цікавих можна віднести наступне:

- Вперше виявлено та досліджено два типи резонансів на плазмонних та ґраткових модах при розсіянні та поглинанні Н-поляризованих електромагнітних хвиль скінченними ґратками з металевих нанониток в оптичному діапазоні, вивчено їхній взаємний вплив та вплив геометричних і матеріальних параметрів на характеристики розсіяння та поглинання.
- Вперше проведено порівняння коефіцієнтів відбиття скінченних ґраток з металевих нанониток з відповідними нескінченними; встановлено, що навколо частот ґраткових резонансів для зменшення різниці коефіцієнтів відбиття скінченної та нескінченної ґраток потрібно значно більше елементів скінченної ґратки (не менше 100), ніж у поза резонансній області (близько 10).
- Показана можливість фокусування хвиль оптичного діапазону дискретними параболічними рефлекторами з металевих нанониток при збудженні плазмонного резонансу на нитках, також встановлено, що ґраткові резонанси не грають істотної ролі у фокусуванні.

- Розроблено метод пошуку генерованих частот нанолазерів, на основі чого вперше знайдено та класифіковано генеровані частоти нанолазерів на основі срібної нанонитки та нанотрубки з активними оболонкою та сердечником; вивчено вплив геометричних параметрів таких нанолазерів на частоти та пороги генерації.
- Визначено та класифіковано ґраткові лазерні моди ґраток зі скінченного числа діелектричних та срібних нанониток; продемонстровано, що їхні пороги самозбудження є істотно нижчими за пороги мод інших типів, а довжини хвиль генерації дуже близькі до ґраткових резонансів у відповідній задачі розсіяння.

**Обґрунтованість та достовірність наукових висновків.** Наукові дослідження, результати яких викладені в дисертаційній роботі, проводились по крайній мірі з 2010 р. до 2019 р. Цей висновок можна зробити на основі виходу з друку перших публікацій у 2011 році. Робота виконувалась в ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України під керівництвом відомого вченого Носіча О.Й. Був достатній час для отримання необхідного досвіду для наукових досліджень, детального ознайомлення з науковими досягненнями в даній проблематиці та їх аналізу (проаналізовано 162 наукові публікації), планування та проведення наукових досліджень.

Задача дифракції на ґратках ставилась як строга математична задача, рівняння якої формувались точними математичними перетвореннями рівнянь Максвелла з врахуванням точних крайових умов. Внаслідок коректних математичних перетворень отримано блочне матричне рівняння Фредгольма другого роду. Кожен блок такого рівняння є нескінченним, але його усічення до числа  $N$  дає збіжність до точного розв'язання з ростом  $N$ . Розв'язок матричного рівняння Фредгольма є чисельно стабільним при заданих параметрах ґраток.

Дискретний параболічний рефлектор з нанониток, судячи з рис. 3.27, формує пляму у фокусі приблизно шириною 100 нм, що узгоджується з розміром плями, розрахованої у відповідності до дифракційної теорії традиційних вгнутих дзеркал.

Генеровані частоти та пороги генерації нанолазерів на основі нанониток та періодично розташованих нанониток з підсиленням визначалася за відсутності падаючого поля як корені відповідного детермінантного рівняння. Результати числових експериментів, які стосуються нанолазерів, не суперечать основним положенням квантової електроніки та лазерної техніки, зокрема загальним висновкам теорії лазерів з розподіленим зворотнім зв'язком.

Результати досліджень обговорювались з цілим рядом провідних науковців, що працюють у даній тематиці, на наступних наукових семінарах: Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України (кер. акад. П.М. Мележик); Інституту досліджень з електромагнітної теорії ім. Дж. Гріна Університету м. Ноттінгем,

Великобританія (кер. проф. Т.М. Бенсон); Інституту телекомунікацій, м. Варшава, Польща (кер. проф. М. Марчіняк); Інституту фотоніки та електроніки АН Чеської республіки, м. Прага (кер. проф. І. Чтирокі), Токійського технологічного університету, м. Токіо, Японія (кер. проф. Т. Ямасакі). Крім того, вони доповідалися на численних міжнародних наукових конференціях, воркшопах та симпозіумах.

**Практична цінність дисертаційної роботи полягає в наступному:** розроблений числовий метод є надійним науковим підґрунтям для вивчення та аналізу характеристик розсіювання і поглинання електромагнітних хвиль, ближніх та дальніх полів, а також частот та порогів самозбудження лазерних мод матеріальних ниток круглого перерізу та періодично розташованих скінченного числа нанониток, при умові, що нанонитки мають підсилювальні властивості; розроблені чисельні методи можуть мати ефективне застосування для розроблення та проектування різноманітних пристроїв нанооптики, що складаються з нанониток та періодично розташованих нанониток; закономірності, що знайдено у даній дисертаційній роботі при дослідженні нанолазерів на основі нанониток та нанотрубок, а також ґраток з нанониток, є корисними при розробленні нанолазерів з низькими порогоми самозбудження.

**Повнота викладення здобувачем основних результатів.** Матеріали дисертації викладені в 37 наукових працях. З них: 7 статей у періодичних виданнях (серед них одна стаття без співавторів), при цьому 6 статей у закордонних виданнях, які входять до наукометричних баз даних Web of Science і Scopus, і 1 стаття у фаховому виданні України. Також результати досліджень викладені у 30 публікаціях, що наведені в збірниках міжнародних конференцій. Дисертаційна робота повністю викладена в наукових публікаціях дисертанта, які відповідають встановленим вимогам.

**Оцінка мови, стилю та оформлення дисертації й автореферату.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку використаних літературних джерел та двох додатків. Дисертація викладена на 187 сторінках друкованого тексту, містить 88 рисунків та 1 таблицю в Додатку Б. Бібліографія складає 162 джерел.

В цілому дисертаційна робота написана нормативною українською мовою і на доброму стилістичному рівні. Застосована наукова термінологія є загальноновживаною, стиль викладу результатів наукових досліджень, наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечує адекватне сприйняття прочитаного. Результати об'ємних досліджень викладені стисло та конкретно.

Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації, написаний грамотно та з використанням сучасної наукової термінології. Оформлення дисертаційної роботи та автореферату відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів Міністерства освіти та науки України, зокрема вимогам, що наведені в документі з назвою “Порядок присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”

В цілому дисертаційна робота справляє на читача гарне враження своєю актуальністю, новизною, практичним значенням, і показує, що автор освоїв широкий спектр теоретичних та прикладних знань, а також вміє складати комп'ютерні програми доволі високої складності, і, саме головне, здатний поставити нові важливі задачі і успішно їх розв'язати. При виконанні дисертаційної роботи використані сучасні методи теоретичних досліджень.

**Зауваження до дисертаційної роботи.** Попри високу якість дисертаційної роботи можна знайти недоліки різноманітного характеру.

1. До першого розділу дисертаційної роботи немає висновків.
2. В роботі наведено результати аналізу багатьох важливих періодичних і не періодичних структур шляхом розв'язання рівняння (2.21), у якому кожен блок усічений до скінченного числа  $N$ , причому розв'язок повинен збігатися до точного розв'язку, якщо  $N \rightarrow \infty$ , проте не наведено ціле число  $N$ , що визначає розмірність обрізаних матриць для забезпечення необхідної точності. Наведення числа  $N$  є важливим при практичному використанні результатів дисертації, адже  $N$  може бути значним при наявності плазмонних резонансів в ґратках з тонкими нанонитками срібла. Слід зазначити, що в четвертому розділі лише для однієї задачі наведено  $N$ . Важливим також є час розрахунку і як він залежить від  $N$ .
3. У висновках другого розділу вказано, що при розсіянні Н-поляризованої плоскої хвилі на решітці зі срібних ниток у випадку збігові дійсних частот плазмонного і ґраткового резонансів спостерігається явище електромагнітної індукованої прозорості. Проте у розділі 2 немає згадки про явище електромагнітної індукованої прозорості.
4. Моделювання дискретного параболічного рефлектору зі срібних нанониток показало, згідно рис. 3.27, формування яскравої плями у фокальній площині рефлектора, проте не наведено поперечний розмір фокальної плями і чи її розмір узгоджується з дифракційною теорією, що використовується для традиційних фокусуючих елементів.

Також не досліджено функціональної поведінки такого рефлектора при відхиленні падаючої плоскої хвилі від нормалі.

5. Граткові лазери, які досліджуються в даній дисертаційній роботі, фактично є лазерами з розподіленим зворотнім зв'язком, що додатково підтверджується рис. 4.16 та рис. 4.23. Проте в дисертаційній роботі про це не згадується. В лазерах з розподіленим зворотнім зв'язком генерація може відбуватися поблизу умов Бреґґа першого, другого або вищих порядків, які визначають напрям поширення генерованого випромінювання. В дисертаційній роботі про умови Бреґґа нічого не сказано, а також про напрями поширення генерованого випромінювання.
6. В дисертаційній роботі використано не стандартне позначення показника заломлення  $v = \alpha - i\gamma$ . В оптиці прийнято позначати показник заломлення середовища буквою  $n$ , який для середовищ, що поглинають чи підсилюють, є комплексним. Буквою  $\nu$  прийнято позначати частоту (кількість коливань в одиницю часу). В квантовій електроніці та лазерній техніці буквою  $\gamma$  позначають показник підсилення, причому інтенсивність хвилі при поширенні в підсилювальному середовищі зростає за правилом  $\exp(\gamma z)$ .
7. Осі на деяких рисунках підписані англійською мовою, особливо в 2 та 3 розділах, наприклад: рис. 2.5, рис. 2.14, рис. 3.11, рис. 3.12, рис. 3.29.
8. Написи на деяких рисунках написані надто дрібними буквами, наприклад, рис. 2.8, рис. 2.9, рис. 3.20, рис. 3.23.
9. В тексті дисертації наявні стилістичні та граматичні помилки, наприклад: на стор. 26 «...полягають в дискретизації рівнянь Максвела на просторово-часовій або просторовій сітці за допомогою скінченних **прирощень**»; на стор. 30 «...все одно дає **впливову помилка** при 400 нм...»; стор. 32 «...ці значення є результатом ділення періоду решітки до **решти**...»; стор. 37 «...у прямому **напрмі**...»; стор. 38 «...заломлення **уміщального** середовища...»; стор. 113 «...скінченна решітка **понурена** в хмару...»; стор. 120 «Аналіз ППР дає інформацію о фундаментальних... Частина світла **уходить** в ковзних напрямках...»

Проте, наведені недоліки не приводять навіть до невеликого помилкового сприйняття змісту дисертації, не зменшують наукову новизну та практичну цінність, тому не мають принципового впливу на остаточний висновок про дисертаційну роботу. Більшість з недоліків появились через неуважність автора дисертації.

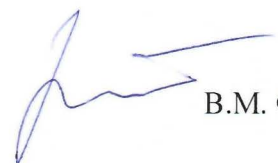
**Загальні висновки.** Викладені думки дають можливість стверджувати, що дисертаційна робота Натарова Дениса Михайловича є завершеним науковим дослідженням, в якій описані науково обгрунтовані результати: розроблено чисельний збіжний метод для дослідження розсіяння оптичних хвиль на матеріальних нитках кругового перерізу, який також використаний для чисельного аналізу різноманітних ґраток зі скінченним числом періодів; розробленим методом за допомогою детермінантних рівнянь досліджено власні моди та пороги генерації плазмонних нанолазерів на основі срібної нанонитки та нанотрубки, а також ґраток з нанониток, що мають у своєму складі срібло та діелектрик з підсилювальними властивостями. В роботі переконливо показана наукова новизна і достовірність отриманих результатів та їх практична цінність.

За актуальністю розглянутих задач, обсягом досліджень, науковим рівнем і практичною цінністю отриманих результатів дисертаційна робота повністю відповідає вимогам які пред'являється до кандидатських дисертацій, а її тема та зміст відповідають паспорту спеціальності 01.04.03 – радіофізика.

Дисертація відповідає вимогам МОН України, які висуваються до робіт поданих на здобуття наукового ступеня кандидата наук, зокрема вимогам Департаменту атестації кадрів Міністерства освіти та науки України, що наведені у документі з назвою “Порядок присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, а її автор Натаров Денис Михайлович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент

Лауреат премії ім. І.П. Пулюя Президії НАН України,  
доктор фіз.-мат. наук, професор, професор кафедри фотоніки  
Національного університету “Львівська політехніка”

  
В.М. Фітьо

Підпис Фітьо В.М. засвідчую,

Вчений секретар

Національного університету “Львівська політехніка”





Р.Б. Брилинський