

ВІДГУК

офіційного опонента **Фітьо Володимира Михайловича** на дисертаційну роботу Євтушенка Федора Олександровича на тему: **“Резонансне розсіювання та поглинання електромагнітних хвиль нескінченними решітками з графенових стрічок на діелектричних підкладках”**, подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – фізика та астрономія (10 – природничі науки).

Актуальність теми дисертаційної роботи. В наш час в основному вивчені різноманітні періодичні структури, які функціонують у видимій та інфрачервоній областях спектру. На їх основі розроблені різноманітні пристрої, що мають практичне застосування: дифракційні ґратки для спектральних приладів, різноманітні фільтри, ґраткові поляризатори, подільники хвильових фронтів, сенсори фізичних величин і т.п. 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 хвильоводних мод, причому коефіцієнт відбиття може бути рівним одиниці.

Останнім часом почалися інтенсивні дослідження структур на основі періодичного розташування стрічок графену на діелектричній підкладці з/без посилення. Завдяки фізичним властивостям моношарового графену такі структури мають цікаві властивості в інфрачервоному і терагерцевому діапазонах. Це пов'язано з тим, що графен має високу рухливість електронів, що може перестроюватися електростатичним чином (через хімічний потенціал графену), і проявляє плазмонні ефекти. Для ефективного дослідження періодичних структур на основі графену необхідно “пристосувати, точніше модифікувати” надійні теоретичні методи, які добре себе зарекомендували в дослідженні періодичних структур без графену, а також розробити відповідний код для чисельного моделювання. Чисельне моделювання дозволяє досить швидко провести аналіз різноманітних періодичних структур, навіть таких, які існуючі технології не дають можливості їх виготовити в теперішній час. Чисельними експериментами ми можемо оптимізувати структуру для досягнення необхідних параметрів, а вже тоді виготовити. З цієї точки зору дослідження ґраток на основі графенових

стрічок на діелектричній чи посилювальній підкладці та розроблення відповідних нових чисельних методів аналізу є важливим та сприяє створенню нових пристроїв в терагерцевому діапазоні електромагнітних хвиль.

Тому наукові результати теоретичних досліджень та комп'ютерного моделювання по даній проблематиці, що відображені в дисертації Євтушенка Ф.О., 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 наукових програм, проектів і грантів, зокрема:

1. Фундаментальний науковий проект НАНУ «Розробка та застосування оптичних та квазіоптичних методів дослідження процесів генерації та перетворення електромагнітні хвилі терагерцевого, інфрачервоного та видимого діапазонів», шифр «Ореол-1», №0117U004036, (2019-2022).
2. Фундаментальний науковий проект НАНУ «Дослідження процесів взаємодії електромагнітного випромінювання терагерцевого, інфрачервоного та видимого діапазонів з різними матеріалами, середовищами та конструкціями природного та штучного походження.», шифр «Ореол-2», № 0122U001710 (2022-2026).
3. Конкурсний науковий проект НАНУ «Радіофізичні явища в нанoeлектронних системах, що містять графен, нетрадиційні надпровідники та намагнічені напівпровідники», шифр «Нанограф», № 0122U200724 (2022).
4. Науковий проект Національного фонду досліджень України (НФДУ) «Електромагнітне моделювання мікро- та нанолазерів з резонансними графеновими елементами на порозі стаціонарного випромінювання», шифр «Соната», № 2020-02-0150 (2020-2022).
5. Спільний дослідницький проект з університетом місто Ренн 1, програма «Дніпро», Міністерство освіти і науки України та Міністерство європейських і закордонних справ Франції, шифр "Vilen" № 0119U102172 (2019), № 0120U104419, (2020).
6. Тендерний науково-дослідний проект з КНУ імені Тараса Шевченка, Київ, шифр "Універсум", № 0120U104925 (2020), № 0121U113145 (2021).

Також частково підтримано грантом IEEE Antennas and Propagation Society Doctoral Research Award для проекту "Резонансне розсіювання та поглинання терагерцевих хвиль нескінченними ґратками графенових смужок на діелектричній підкладці: аналіз на основі аналітичної регуляризації" (2021 р.).

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

- Встановлено існування високо-добротних резонансів на хвильоводних модах ґраток обох поляризацій, що пов'язані з аномаліями Релея, але не існують на ґратках з ідеально провідних чи графенових стрічок “нульової товщини”, розміщених у вільному просторі. Для Н-поляризації появляються резонанси на плазмонних модах, яких немає для Е-поляризації.
- Для Н-поляризації плоскої хвилі при певних параметрах ґратки та підкладки виявлено ефект електромагнітно індукованої прозорості, який можна отримати завдяки переналаштуванню плазмонних мод за допомогою хімічного потенціалу графену.
- Показано, що коли ґратка з графенових стрічок розміщена на посилювальній підкладці, то можлива лазерна генерація. Чисельними методами визначені частоти випромінювання та порогові значення показника посилення підкладки. Показано, що найнижчі пороги генерації можливі для ґраткових мод кожної поляризації з непарною симетрією, причому найкращу переналаштуваність виявляють плазмонні моди Н-поляризації.

Обґрунтованість та достовірність наукових висновків. Наукові дослідження, результати яких викладені в дисертаційній роботі, проводились по крайній мірі з 2019 р. до 2023 р. Цей висновок можна зробити на основі виходу з друку перших публікацій у 2019 році. Був достатній час для отримання необхідного досвіду для наукових досліджень, детального ознайомлення з науковими досягненнями в даній проблематиці та їх аналізу (проаналізовано 120 наукові публікації), планування та проведення наукових досліджень.

Задача дифракції на ґратках з **графенових стрічок на діелектричних підкладках** ставилась як строга математична задача, рівняння якої формувались строгими математичними перетвореннями рівнянь Максвелла з врахуванням точних крайових умов. Внаслідок коректних математичних перетворень отримано матричні рівняння Фредгольма другого роду. Ці рівняння є нескінченним, але їх 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.

Генеровані частоти та пороги генерації **нанолазерів на основі графенових ґраток на підкладці 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.

Слід також відзначити, що розроблені методи аналізу дифракції в дисертаційній роботі перевірялись на типових задачах, які описані в літературних джерелах. Результати такого чисельного аналізу показали добре співпадіння, по крайній мірі з графічною точністю.

Результати досліджень обговорювались з цілим рядом провідних науковців, що працюють у даній тематиці, на науковому семінарі Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України (кер. акад. П. М. Мележик), а також доповідалися на численних міжнародних наукових конференціях:

- IEEE Ukrainian Conferences on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, 2019, 2021;

- IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas, and Electronic Systems (COMCAS), Tel Aviv, 2019, 2021;

- IEEE International Conference Ukrainian Microwave Week (UKRMW), Kharkiv, 2020, 2 доповіді;

- IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, Proceedings, (UkrMiCo) Kyiv, 2021;

- European Microwave Conferences (EuMC), Milan, 2022, Berlin, 2023;

- IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, 2022;

- International Conference on Applied Electromagnetics and Communications (ICECOM), Dubrovnik, 2023.

Практична цінність дисертаційної роботи полягає в наступному: розроблений числовий метод є надійним науковим інструментом для вивчення та аналізу характеристик розсіяння і поглинання електромагнітних хвиль, ближніх та дальніх полів, а також частот та порогів самозбудження лазерних мод ґраток з графенових стрічок, нанесених на активну підкладку; розроблені чисельні методи можуть мати ефективне застосування для розроблення та проектування різноманітних пристроїв в терагерцевому діапазоні; закономірності, що знайдено у даній дисертаційній роботі можуть бути корисними при розробленні мікро- і нанолазерів терагерцевого та інфрачервоного діапазонів, які можуть переналаштовуватися з допомогою керованої зміни хімічного потенціалу; виявлений ефект електромагнітно індукованої прозорості, який виникає завдяки переналаштуванню плазмонних мод за допомогою хімічного потенціалу графену, можна використати для створення у терагерцевому діапазоні фільтрів нового типу, модуляторів та поглиначів, зокрема модулятори можуть мати

частоту переключення більше 100 ГГц завдяки тому, що час релаксації електронів у графені може бути меншим 1нс.

Повнота викладення здобувачем основних результатів. Результати досліджень опубліковано в 16 реферованих статтях, які індексуються в Scopus, включаючи 5 статей у міжнародних журналах [A1-A5] та 11 статей у матеріалах міжнародних конференцій [A6-A16].

Оцінка мови, стилю та оформлення дисертації. Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків та рекомендацій, переліку використаних літературних джерел та одного додатку. Дисертація викладена на 163 сторінках друкованого тексту, містить 62 рисунків та 3 таблиці. Бібліографія налічує 120 джерел.

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

Зміст анотації ідентичний основним положенням дисертації, написаний з використанням сучасної наукової термінології. Оформлення дисертаційної роботи відповідає вимогам МОН України, які висуваються до робіт, поданих на здобуття наукового ступеня доктора філософії у відповідності до “Тимчасового порядку присудження ступеня доктора філософії”, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 року № 167 та зі змінами згідно Постанови КМ № 608 від 09.06. 2021.

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.

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

1. В дисертації вказано, що хімічний потенціал графену можна міняти в широких межах електростатичним полем, але в дисертації не вказано як подавати напругу на ґратку з графенових стрічок.
2. 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 v прийнято

позначати частоту (кількість коливань в одиницю часу). В квантовій електроніці та лазерній техніці буквою γ позначають показник підсилення, причому амплітуда хвилі при поширенні в підсилювальному середовищі зростає за правилом $\exp(\gamma z)$.

3. Рис. 3.4 низької якості, важко розібрати умови розрахунку.
4. На рис. 2.4-а та рис. 2.3-d приблизно при $N = 50$ маємо суттєве зменшення похибки обчислень на кілька порядків. В дисертації цей ефект не пояснений.
5. В тексті дисертації зустрічаються описки через неуважність, наприклад: у формулі (1.4) повинно бути $T_{mm}(\theta)$?, с.41; в поясненнях після формули (1.5) важко зрозуміти вираз $P_s - u$, може має бути $P_s(-u)$. Також не зрозумілі формули (1.4), (1.7), (1.8); у формулі (2.25) маємо $A_{m,n}^H$ і B_m^H , а у формулі (2.26) $A_{m,n}$ і B_m ; що буде коли у формулі (2.27) $m - n + 1 = 0$, незрозуміло; на рис.3.5-а наведено позначення піку L_{20} , а позначення цього ж піку на рис.3.5d — $L_{106.738}$; На рис.4.5 наведено мапу магнітного поля на одному періоді, а в підписі до рисунку "... on three periods for...", та сама помилка на рис.4.6; складається враження, що присутня описка формулі (4.14).
6. Не пояснено з яких міркувань вибрано $\kappa = p/\lambda = 14.1$ і $\kappa = p/\lambda = 100.1$, а не 14 і 100 відповідно (с. 62). Такий вибір κ ускладнював чи спрощував обчислення?

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

Загальні висновки. Викладені вище думки дають можливість стверджувати, що дисертаційна робота Євтушенка Федора Олександровича є самостійним завершеним науковим дослідженням. 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 дисертаційна робота повністю відповідає вимогам, які пред'являється до дисертацій для отримання наукового ступеня доктора філософії, а її тема та зміст відповідають паспорту спеціальності 104 – фізика та астрономія (10 – природничі науки).

Дисертація відповідає вимогам МОН України, які висуваються до робіт, поданих на здобуття наукового ступеня доктора філософії, зокрема п. 9,10,11,12 "Тимчасового порядку присудження ступеня доктора філософії", затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 року № 167 та зі змінами згідно Постанови КМ № 608 від 09.06.

2021, а її автор Євтушенко Федір Олександрович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – фізика та астрономія (10 – природничі науки).

Офіційний опонент

Лауреат премії ім. І.П. Пулюя Президії НАН України,
д. ф.-м. н., проф., професор кафедри електронної інженерії
Національного університету "Львівська політехніка"

Підпис Фітьо В.М. засвідчую,
Вчений секретар університету



Володимир ФІТЬО

Роман БРИЛИНСЬКИЙ