

## **РЕЦЕНЗІЯ**

на дисертацію Євтушенка Федора Олександровича

«Резонансне розсіяння та поглинання електромагнітних хвиль нескінченними решітками з графенових стрічок на діелектричних підкладках»

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

### **Актуальність тематики дослідження**

Навіть одного факту, що в роботі досліджуються електродинамічні структури з графеновими елементами, вже достатньо щоб вважати цю дисертацію актуальною. Більш детальний погляд на роботу тільки посилить це враження: для комп'ютерного моделювання одномірно-періодичних решіток із графенових стрічок на підкладці розроблено алгоритми з гарантованою збіжністю та контрольованою похибкою, за допомогою цих алгоритмів отримано нові наукові результати, досліджувані періодичні структури вивчались не тільки як дифракційні решітки, але і в ролі нанолазерів терагерцового та інфрачервоного діапазонів. Усі ці пункти роблять роботу актуальною в рамках світового наукового процесу.

Хоча доступність технологій для роботи з мікро- та наноструктурами зростає, лабораторні експерименти з ними все ще надзвичайно високовартісні. Тому розроблені в роботі алгоритми комп'ютерного моделювання мають велику цінність, особливо для України де практично відсутні умови для експериментальних досліджень таких структур.

### **Структура, зміст та оформлення дисертації**

Дисертаційна робота є логічно побудованим дослідженням, що послідовно описує науковий процес починаючи з огляду літератури та визначення підходів, потім йде постановка математичної проблеми та розв'язання її за допомогою чисельних методів, після цього розроблені алгоритми використовуються для моделювання та аналізу досліджуваних електродинамічних структур. Дисертація написана гарною англійською, її приємно та цікаво читати.

Дисертація складається з анотації (українською та англійською мовами), вступу (де визначено актуальність, мету і завдання дослідження, описані використані методи, новизна та цінність отриманих результатів), чотирьох розділів із висновками до кожного з них, загальних висновків, списку використаної літератури та додатку з переліком наукових публікацій та доповідей на конференціях за матеріалами роботи.

Робота оформлена згідно чинних вимог.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційна робота була виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України (Відділ квазіоптики, Лабораторія мікро- і нанооптики). Дисертація відповідає науковому напрямку Інституту. Робота виконувалась в межах шести держбюджетних та конкурсних науково-дослідних проектів, у тому числі спільних з французьким Університетом Ренн 1 та Київським національним університетом ім. Т. Шевченка. Також виконання роботи було частково підтримано нагородою від IEEE Antennas and Propagation спільноти у 2021 р.

### **Основні наукові результати дисертації, їх новизна**

В дисертації містяться наступні нові наукові результати. (i) Для Н-поляризації виявлено ефект електромагнітно індукованої прозорості, який виникає завдяки переналаштуванню плазмонних мод за допомогою хімічного потенціалу графену. (ii) Показано існування високодобротних резонансів на решіткових модах, що пов'язані з аномаліями Релея, які не існують для решіток з ідеально провідних чи графенових стрічок без підкладки. (iii) Розраховано частоти випромінювання і порогові значення показника посилення підкладки та змодельовано ближні поля випромінювання розглянутих структур в ролі нанолазерів. (iv) Для Е-поляризації отримано аналітичні вирази для комплексних частот решіткових мод. (v) Вивчено швидкість збіжності розроблених чисельних алгоритмів та її залежність від різних параметрів підкладки та решітки, в тому числі від параметрів графена.

### **Обґрунтованість одержаних результатів**

Достовірність одержаних результатів впливає з математично строго формулювання задач, використання надійного метода аналітичної регуляризації для підготовки до чисельного розв'язання, та чисельного розв'язання за допомогою методів з гарантованою збіжністю та контрольованою похибкою. Перш ніж використовуватись для досліджень, розроблені алгоритми були протестовані. За матеріалами дисертації опубліковано п'ять статей у рецензованих фахових журналах (усі Q2 та Q3) та зроблено 11 доповідей на міжнародних конференціях. Це також є свідомством високого наукового рівня дисертації та публікацій.

### **Значення одержаних результатів**

Практичне значення розроблених алгоритмів полягає в їх здатності забезпечувати достовірні результати при комп'ютерному моделюванні пристроїв на основі графенових смужкових решіток у

терагерцовому та інфрачервоному діапазонах. У порівнянні з комерційними програмними пакетами, розроблені програми можуть забезпечити необхідну точність навіть для вивчення резонансів на решіткових модах. Крім того, розроблені алгоритми можуть служити основою для багатопараметричних програм оптимізації завдяки своїй високій швидкості та точності.

Аналіз можливості електростатичного налаштування плазмонних мод та їх гібридизації з решітковими модами, а також ефект електромагнітно індукованої прозорості, можуть бути корисні при проектуванні нових фільтрів, модуляторів, поглиначів та інших пристроїв з можливістю налаштування по частоті.

Інформація про порогові умови для мод випромінювання графенових смужкових решіток на підкладці із матеріалу з посиленням може бути використана при проектуванні низькопорогових нанолазерів з можливістю переналаштування в терагерцовому та інфрачервоному діапазонах.

### **Виконання наукового завдання, оволодіння методологією наукової діяльності**

Методи дослідження, що використані в роботі, відповідають сучасним вимогам до наукових досліджень. Поставлене наукове завдання було успішно виконано, для цього здобувачем було (i) опановано метод аналітичної регуляризації, а саме, за допомогою методу задачі Рімана-Гільберта (у випадку Н-поляризації) або за допомогою зворотного дискретного перетворення Фур'є (у випадку Е-поляризації) отримувались нескінченні матричні рівняння Фредгольма другого роду, чисельний розв'язок яких має гарантовану збіжність. (ii) На основі цих рівнянь були створені повнохвильові безсіткові коди та вивчено поведінку їх похибки. (iii) Ці програми були використано для аналізу характеристик розсіювання та поглинання хвиль на графенових стрічкових решітках. (iv) Виведено формули для частот і добротностей плазмонних мод, решіткових мод та мод діелектричної підкладки. (v) Проведено ітераційний пошук коренів детермінантних рівнянь та строгий аналіз порогових умов для власних мод нескінченної графенової решітки на підкладці з матеріалу із посиленням. Розв'язання цих задач свідчить про високий рівень виконання поставленого наукового завдання, та оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності.

### **Зауваження до дисертації**

Як і до будь-якої роботи такого об'єму, до цієї дисертації є ряд зауважень:

1. Можливо реалізація розроблених алгоритмів не у системі MatLab, а за допомогою мови програмування С зробить їх навіть більш швидкими.
2. Формула (2.39) для Е-поляризації має зліва ваговий коефіцієнт  $|n|$ , так само як і для Н-поляризації. А у розділі 1 (стор. 41, перший абзац) написано що так не має бути.

3. Цікаво знати яка швидкість збіжності, як зменшується похибка.
4. Було б непогано порівняти розроблені алгоритми також і з аналітичними результатами для сценаріїв де вони існують.
5. Не зрозуміло чи є новими результати дослідження резонансів на стор. 65–68, чи це продовження валідації алгоритмів.

Ці зауваження є суто косметичними та ніяк не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації.

#### **Відомості про дотримання академічної доброчесності**

У дисертації та наукових публікаціях Євтушенка Ф. О. не виявлено фактів порушення академічної доброчесності.

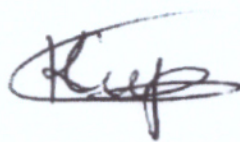
#### **Висновки щодо дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота Євтушенка Ф. О. на тему «Резонансне розсіяння та поглинання електромагнітних хвиль нескінченними решітками з графенових стрічок на діелектричних підкладках» є завершеною науковою працею, що за рівнем виконання, актуальністю, обсягом та повнотою викладу, новизною та значенням отриманих результатів, ґрунтовністю їх аналізу повністю відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України №40 від 12.01.2017 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (з наступними змінами) та постанови Кабінету Міністрів України №44 від 12.01.2022 «Про затвердження порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», а її автор, Євтушенко Федір Олександрович, заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Рецензент

кандидат фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник

Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України



Костянтин Сіренко

Підпис к.ф.-м.н. Сіренка К. Ю.  
В.о. вченого секретаря Інституту



Підпис Кувшинова О.В.