

ЗАТВЕРДЖУЮ

Керівник підприємства/установи/організації

(Грантоотримувача)

(посада)

Директор ІРЕ ім. О.Я.Усикова НАН України

Мележиків Дмитро Миколайович



АНОТОВАНИЙ ЗВІТ

про виконану роботу у 2020 році в рамках реалізації проєкту із виконання наукових досліджень і розробок

Електромагнітне моделювання мікро та нано лазерів з резонансними графеновими елементами, на порозі стаціонарного випромінювання

Назва конкурсу: Підтримка досліджень провідних та молодих учених

Реєстраційний номер Проєкту: 2020.02.0150

Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок

(реєстраційний номер та назва Проєкту) 2020.02.0150, «Електромагнітне моделювання мікро та нано лазерів з резонансними графеновими елементами, на порозі стаціонарного випромінювання»

Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу «Підтримка досліджень провідних та молодих учених» (назва конкурсу) протокол від «16-17» вересня 2020 року № 21

1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Тривалість виконання Проєкту

Початок – 04.11.2020 р. дата укладання Договору про виконання наукових досліджень і розробок;

Закінчення – 2022 рік.

Загальна вартість Проєкту, 3467200 грн.

Вартість Проєкту по роках, грн.:

1-й рік 457600 грн.

2-й рік 1504800 грн.

3-й рік 1504800 грн.

2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту буде залучено 7 виконавців, з них:

доктори наук 0;

кандидати наук 5;

інші працівники 2.

3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ(І) СУБВИКОНАВЦЯ(ІВ) ПРОЄКТУ

Субвиконавців немає.

4. ОПИС ПРОЄКТУ

4.1. Мета Проєкту

Побудова електродинамічних моделей нанолазерів з різними квантово-активними зонами і графеновими елементами, які характеризують власні моди лазерів на порозі стаціонарного випромінювання.

4.2. Основні завдання Проєкту

Введення базових інтегральних та алгебраїчних рівнянь для моделей нанолазерів на порозі стаціонарного випромінювання у вигляді кругових активних ниток, повністю та частково вкритих графеном, нитки із графеновою стрічкою всередині, активного шару з решіткою з графенових стрічок на поверхні, та графенового диску на підкладці.

4.3. Детальний зміст Проєкту:

- Сучасний стан проблеми

Плазмонні наноласери з графеновими резонансними елементами, замість металевих, поки що досліджуються як пасивні структури, без урахування наявності активної зони. Це дозволяє оцінити частоти мод, що випромінюють, але пороги випромінювання мод не можна вивчати в принципі. Інший напрямок – урахування нелінійних квантових ефектів, при нехтуванні точними граничними умовами для електромагнітного поля.

- Новизна Проєкту

Графен, або моноатомний шар графіту, є новітнім матеріалом, який має високу та контрольовану провідність. Електродинамічне моделювання власних мод нанолазерів, особливо з резонансними графеновими елементами, на порозі їх сталого випромінювання, за допомогою спеціальних задач на власні значення для відкритих резонаторів – це зовсім новий напрямок в електромагнітній теорії.

- Методологія дослідження

Наноласери з графеновими елементами розглядаються як відкриті електромагнітні резонатори, що містять в собі активну зону. Їх власні моди, на порозі їх сталого випромінювання, розглядаються як рішення спеціальних граничних задач на власні значення, до складу яких входять пороги посилення матеріалу активної зони. Ці задачі зводяться до детермінантних рівнянь, які можна розв'язати з заданою точністю.

5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ (до 2 сторінок) в поточному році/ в рамках реалізації Проєкту, зокрема:

5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, отриманих в рамках виконання Проєкту (із зазначенням їх якісних та кількісних (технічних) характеристик)

Отримані результати - це нові електродинамічні моделі, які адекватно описують електромагнітні поля власних мод, на порозі їх сталого випромінювання, для нанолазерів з резонансними графеновими елементами на плоских та криволінійних підкладках з активного матеріалу та решітками з графенових елементів. Ці моделі визначаються тим, що вони засновані на граничних задачах класичної електродинаміки для електромагнітного поля у повній хвилевій постановці, без обмежень на розміри та довжину хвилі, та квантовому формалізмі Кубо для електронної провідності графену. Вони мають вигляд задач на власні значення для відкритих резонаторів з активними зонами. Власні значення – це впорядковані пари чисел, де перше число – це частота випромінювання даної моди, а друге – порогове значення показника підсилення матеріалу активної зони, теж для даної моди. В залежності від конфігурації всі розглянуті граничні задачі було зведено до відповідних трансцендентних рівнянь (активні кругові нитки з повним графеновим покриттям), інтегральних рівнянь (активні кругові нитки з частковим

графеновим покриттям або з графеновою стрічкою всередині), або рівнянь у парних рядах (активний шар з решіткою з графенових стрічок на поверхні) та парних інтегральних рівнянь (графеновий диск на підкладці). Ці рівняння надалі були аналітично регуляризовані та зведені до алгебраїчних (тобто, матричних) рівнянь Фредгольма другого роду, або дискретизовані квадратурним методом Найстрьома. Тому лазерні задачі на власні значення в будь-якому разі зведені до пошуку алгебраїчних власних значень, наприклад, як коренів детермінантних рівнянь. У всякому випадку чисельне рішення таких алгебраїчних рівнянь має математично гарантовану збіжність.

Для трьох з розглянутих конфігурацій розроблені моделі було частково верифіковано шляхом розрахунку відповідних задач розсіяння електромагнітних хвиль заданої частоти. Такі задачі представляють незалежний інтерес у мікро і нано оптиці і фотоніці. Було надіслано до редакцій міжнародних журналів 3 статті на ці теми, з яких 2 вже пройшли рецензування та прийняті до друку у 2021 році у журналі з Q-1. В цих статтях висловлено подяку НФДУ за підтримку досліджень.

1. S.V. Dukhopelnykov, M. Lucido, R. Sauleau, A.I. Nosich, "Circular dielectric rod with conformal strip of graphene as tunable terahertz antenna: interplay of inverse electromagnetic jet, whispering gallery and plasmon effects," *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 27, 2021, will be published. DOI: [10.1109/JSTQE.2020.3022420](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2020.3022420)

2. D.O. Herasymova, S.V. Dukhopelnykov, M. Lucido, A.I. Nosich, "Optical sensing of electron-beam position with twin silver nanotube antenna tuned to hybrid surface plasmon resonance," *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 27, 2021, will be published. DOI: [10.1109/JSTQE.2020.3024114](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2020.3024114)

3. F.O. Yevtushenko, S.V. Dukhopelnykov, T.L. Zinenko, "E-polarized plane-wave scattering from a PEC strip grating on a dielectric substrate: analytical regularization and lattice-mode resonances," *J. of Electromagnetic Waves and Applications*, 2020, submitted (#203852131).

5.2. За наявності науково-технічної продукції обґрунтування її переваг у порівнянні з існуючими аналогами

Основними перевагами електродинамічних моделей, що були розроблені на 1-му етапі, є гарантована збіжність, контрольована точність та швидкість, що в сотні разів перевершує існуючі комерційні коди, тих алгоритмів, що будуть на них засновані та реалізовані на наступному етапі.

5.3. Практична цінність отриманих результатів реалізації Проєкту для економіки та суспільства (стосується проєктів, що передбачають проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок)

Практична цінність запланованих результатів 1-го етапу полягає в тому, що на наступних етапах роботи буде розроблено відповідні алгоритми чисельного аналізу та, на їх основі, вироблено рекомендації щодо зниження порогів стаціонарного випромінювання плазмонних нанолазерів з резонансними графеновими елементами та решітками з них.

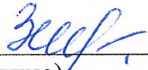
5.4. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проєкту в суспільній практиці.

Отримані у 2020 р. результати дуже важливі насамперед з точки зору фундаментальних досліджень, тобто для поглиблення розуміння потенційних можливостей нанолазерів взагалі та переваг, що надаються за рахунок використання резонансних графенових елементів, у порівнянні з іншими нанолазерами, де такі елементи вироблені з благородних металів. Вони можуть увійти до спеціальних курсів університетських лекцій для студентів та аспірантів по спеціальностям, пов'язаним з математичним моделюванням, класичною електродинамікою та теорією лазерів.

Можливо використання результатів цієї роботи для розробки нових теорій у рамках резонансної квантової електродинаміки. Вони знайдуть також використання в якості наукової основи для створення нових нанорозмірних лазерів з покращеними характеристиками

Науковий керівник Проекту

с.н.с. , к.ф.-м.н. Т.Л. Зіненко



(підпис)