

ЗАТВЕРДЖУЮ
Керівник підприємства/установи/організації
(Грантоотримувача)
(посада)

В.О. Директора ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України
Петро Мележик



АНОТОВАНИЙ ЗВІТ
про виконану роботу у 2021 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» протокол від «16-17» вересня 2020 року № 21

1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Загальна тривалість виконання проєкту 2020 рік – 2022 рік
Тривалість виконання Проєкту у 2021 році

Початок – «28» квітня 2021 року
(дата укладання Договору про виконання наукового дослідження і розробки)

Закінчення – «15» грудня 2021 року

Загальна вартість Проєкту, грн. 3391700 грн. 00 коп.

Вартість Проєкту по роках, грн.:

1-й рік 457600 грн. 00 коп.
2-й рік 1429300 грн. 00 коп.
3-й рік 1504800 грн. 00 коп.

2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту 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)

Було розроблено комп'ютерні програми розрахунку задач розсіяння і на власні значення для мікро і нано-структур, що досліджуються. Це нові власні продукти, які адекватно розраховують електромагнітні поля як для задач розсіяння так і задач на власні моди, на порозі їх сталого випромінювання, для мікро і нанолазерів з резонансними графеновими елементами на плоских та криволінійних підкладках з активного матеріалу та решітками з графенових елементів. Було проведено розрахунки помилок та характеристик розсіяння, що дозволило верифікувати алгоритми та оптимізувати програмні коди. Під час верифікації було досліджено та описано актуальні проблеми, пов'язані з задачами розсіяння хвиль на таких структурах, що представляє значний інтерес у мікро і нано оптиці і фотоніці. Комп'ютерні розрахунки підтвердили збіжність алгоритмів та довели свою швидкодію. Отримано аналітичні формули наближених значень власних частот та порогів, які також підтверджують правильність розроблених програм.

Протягом 2021 р. було опубліковано у міжнародних журналах 7 статей на ці теми, з кварталів Q-1 та Q-2-3. 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, no 1, art. no 4600908, 2021, 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, no 1, art. no 4601008, 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*, , vol. 35, no 10, pp. 1388–1405, 2021. (Q2 y 2019, Q3 y 2020) DOI: [10.1080/09205071.2021.1887001](https://doi.org/10.1080/09205071.2021.1887001)

4. F.O. Yevtushenko, S.V. Dukhopelnykov, T.L. Zinenko, Y.G. Rapoport, “Electromagnetic characterization of tuneable graphene-strips-on-substrate metasurface over entire THz range: Analytical regularization and natural-mode resonance interplay,” *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 15, no 10, pp. 1225-1239, 2021. (Q2 y 2020) DOI: [10.1049/mia2.12158](https://doi.org/10.1049/mia2.12158)

5. M. Lucido, M.V. Balaban, and A.I. Nosich, “Plane wave scattering from thin dielectric disk in free space: generalized boundary conditions, regularizing Galerkin technique and whispering-gallery mode resonances,” *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 15, no 10, pp. 1159-1170, 2021. (Q2 y 2020) DOI: [10.1049/mia2.12106](https://doi.org/10.1049/mia2.12106)

6. M.P. Tikhenko, V.V. Radchenko, S.V. Dukhopelnykov, A.I. Nosich, “Radiation characteristics of a double-layer spherical dielectric lens antenna with a conformal PEC disk fed by on-axis dipoles,” *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 15, no 10, pp. 1249-1269, 2021. (Q2 y 2020) DOI: [10.1049/mia2.12162](https://doi.org/10.1049/mia2.12162)

7. D.O. Herasymova, S.V. Dukhopelnykov, A.I. Nosich, “Infrared diffraction radiation from twin circular dielectric rods covered with graphene: plasmon resonances and beam position sensing,” *Journal of Optical Society of America B*, 2021 38(9), pp. 183–190. (Q1 y 2019, Q2 y 2020) DOI: [10.1364/JOSAB.428037](https://doi.org/10.1364/JOSAB.428037)

Також було надіслано до редакцій міжнародних журналів з кварталів Q-1, ще 3 статті, дві про розв’язок задачі розсіяння, а третю з пошуку власних значень для лазерних наноструктур з однією ниткою, оберненою графеном, та двома такими нитками.

8. F.O. Yevtushenko, S.V. Dukhopelnykov, Y.G. Rapoport, T.L. Zinenko, A.I. Nosich, “ Spoiling of tunability of on-substrate graphene strip grating by the lattice-mode-induced transparency,” *RSC Advance*, 2021 (#RA-ART-11-2021-008287). (Q1 y 2020)

9. A.Y. Svezhentsev, S.V. Dukhopelnykov, V. Volski, G. Vandenbosch, and A.I. Nosich, “Microsized graphene Helmholtz resonator on circular dielectric rod: a tunable sub-THz scatterer,” *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol 70, 2022. (Q1 y 2020). DOI: [10.1109/TAP.2021.3118840](https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3118840)

10. D.O. Herasymova, D.M. Natarov, S.V. Dukhopelnykov, T.L. Zinenko, A.I. Nosich, “ Threshold conditions for transversal modes of tunable plasmonic nanolasers shaped as single and twin graphene-

coveredcircularquantumwires,” IEEE JournalofQuantumElectronics, 2021 (#JQE-135894-2021). (Q1 у 2020)

Крім того, протягом 2021 р. було зроблено 7 доповідей на 3 міжнародних конференціях, праці яких індексуються у наукометричній базі Scopus.

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

Основними перевагами розроблених програм, що були розроблені протягом 2021 р., є гарантована, досліджена збіжність, контрольована точність та швидкість розрахунків, що в десятки разів перевершує існуючі комерційні коди.

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 отриманих у 2021 р. полягає в тому, що на наступних етапах роботи буде досліджено та 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 2021 р. результати дуже важливі насамперед з точки зору фундаментальних досліджень, тобто для поглиблення розуміння потенційних можливостей мікро і 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 мікро і нанорозмірних лазерів з покращеними характеристиками

Науковий керівник Проєкту

с.н.с., к.ф.-м.н. Тетяна ЗІНЕНКО

(підпис)

