

REVIEW

of the official opponent to the dissertation of Fedir O. Yevtushenko
“Resonant scattering and absorption of electromagnetic waves by infinite
gratings of graphene strips on dielectric substrates,”
submitted to the award of scientific degree of Doctor of Philosophy in
specialty 104 – Physics and Astronomy

Timeliness of Dissertation Topic

Periodically structured strip collections, or gratings, are widely used in microwave and optical technologies and show promise for creation and improvement of devices in the terahertz and infrared ranges. Therefore, further study of such periodic structures, identification of the resonances they can support, and the study of related physical effects are **timely**. Here, the grating-mode (or lattice-mode) resonances exhibit extremely high Q factors. In their vicinity, a sharply pronounced extremums of scattering characteristics are observed in the extremely narrow frequency band. However, the use of inefficient methods, which, when computing the frequency dependences, require the selection of too large frequency steps, or incorrect interpretation of results, can lead to failures in real-life existing devices. This is particularly relevant to the appearance of blindness zones in phased antenna arrays and narrow transparency zones in absorbers.

Among the variety of methods for studying the scattering of waves from strip gratings, it is not possible to single out a universal method that allows to analyze the electromagnetic characteristics of complex objects from a single perspective. This is especially true for open systems. Purely numerical methods, distinguished by universality, take into account the radiation condition at infinity in approximate way, limiting the accuracy of the obtained results to a few digits. Neglecting the edge condition, as known, hinders the existence of a unique solution. Consequently, a non-physical solution may be obtained. Therefore, the **timely** task is the development of methods that have the guaranteed convergence, satisfy the conditions of the uniqueness theorems, and allow obtaining results within acceptable computer time.

Graphene is a relatively new material with unique properties. It is strong enough, absorbs electromagnetic fields, and can support surface the plasmon-polariton waves and corresponding plasmon resonances at the frequencies two orders of magnitude lower than the noble metals. The conductivity of graphene, and therefore the properties of the entire structure containing graphene inclusions, can be dynamically controlled by applying electrostatic or magnetostatic doping. This opens significant prospects for using the graphene in tunable devices.

In connection with this, the choice of the purpose and tasks of the research, objects, mathematical methods, means of analyzing the electromagnetic characteristics of the gratings, determination of the general laws of electromagnetic wave scattering allows us to assert that the topic of the presented dissertation is timely both in fundamental and applied sense.

Scientific Novelty of Obtained Results

In this work, a full-wave meshless mathematically grounded approach is used to analyze the fundamental effects in the scattering, absorption, and radiation of electromagnetic fields by the gratings of graphene strips on a substrate. A unified approach to the study of structures based on infinite periodic gratings of perfectly electric conducting or material graphene strips on a dielectric substrate has been developed.

In the dissertation, the author obtained a number of new scientific results. Let us highlight some of them as follows:

1. The results of long-term studies on the wave scattering from infinite gratings of perfectly electric conducting strips on the dielectric substrate were generalized. Solutions to the corresponding diffraction problems were formulated using the Riemann-Hilbert problem method in a form suitable for direct programming. The positions of the grating-mode resonances on the frequency axis were determined, and the regularities of their variation with changes in parameters were described. Effects related to the excitation of these resonances, such as anomalous transmission and reflection, were investigated.

2. For the first time, the Riemann-Hilbert problem method was adapted to the H -polarized plane wave scattering from the infinite graphene strip grating located on a dielectric substrate. This rigorous approach allowed for a detailed study of resonance effects in the scattering and absorption of the plane electromagnetic wave and their variations with changes in geometric and material parameters. The physical regularities that are important for practical applications were determined. It was found that due to the excitation of plasmon resonances on graphene strips, the structure can serve as a polarizer, allowing the transmittance of the E -polarized waves while partially reflecting and absorbing the H -polarized waves. It was shown that the position of the stopband can be controlled by changing the chemical potential of graphene. The presented asymptotic expressions for the plasmon resonance frequencies are undoubtedly novel.

3. During the investigation of physical phenomena arising from the simultaneous excitation of plasmon resonances and grating-mode resonances on graphene strip gratings, the effect of electromagnetically induced transparency was revealed. It was shown that the tunability of periodic graphene structures due to the application of an electrostatic field to the strips can be disrupted. The change in the chemical potential of graphene does not significantly affect the position of the minimum of the transmittance coefficient on the frequency axis.

4. Based on the developed mathematical model, the threshold conditions of the modes of a laser consisting of the infinite graphene strip grating on a dielectric substrate were studied. It was demonstrated that three types of modes are present: strip plasmon modes, grating modes, and dielectric substrate modes. A successful combination of the lasing eigenvalue problem approach, the Riemann-Hilbert Problem method, and a numerical iterative procedure for finding the zeros of the corresponding determinant was achieved. This combination allowed the development of an efficient numerical analysis method. It was shown that the positions of the plasmon modes at the frequency axis and their substrate material

gain threshold values can be controlled by changing the chemical potential of graphene. The grating modes have much lower threshold gain values but are almost insensitive to dynamic tuning of frequency and threshold.

The reliability and correctness of the results are beyond doubt. The problems are considered in full-wave (i.e. rigorous) mathematical formulation. The obtained infinite matrix equations are Fredholm equations of the second kind, ensuring their numerical solution to have guaranteed convergence. Additionally, the convergence is confirmed by conducting relevant studies on the error at different parameters. A comparison is made between the results obtained in the work and specific results known from the literature. The models of the studied electromagnetic structures are constructed using widely accepted idealizations, such as the two-dimensionality of the problems, infinitely small thickness of the strips, neglect of nonlocal effects and anisotropy when determining the graphene conductivity, and others. The obtained results do not contradict known physical laws. Furthermore, the fulfilment of the energy conservation law is systematically verified.

Practical Significance of Obtained Results

1. The development of the theory and methods for mathematical modelling of resonance phenomena in periodic structures with graphene strips provides an efficient tool for studying the characteristics of a number of electromagnetic devices that contain such gratings.

2. The information gathered in the research about the significant influence of the chemical potential of graphene, dynamically controllable through the application of electrostatic field, on the characteristics of the scattered fields allows, on the one hand, to use the arising effects in implementing control functions and, on the other hand, to conduct the analysis and optimization of parameters of electromagnetic devices incorporating such gratings.

3. The identified properties of the infinite graphene gratings on the substrate, allowing the transmission of the E -polarized waves and reflection or absorption of the H -polarized waves, can enable the creation of tunable polarizers and filters based on such a structure.

4. The physical results regarding graphene strip gratings allow for the investigation and optimization of parameters of corresponding absorbing surfaces, which are crucial in stealth technology.

5. The author's work makes a significant contribution to the antenna technology. The results regarding the grating-mode resonances can be applied to predict so-called regimes of scan blindness in large phased array antennas.

6. The obtained results regarding threshold values of the active substrate material gain and corresponding eigenmode frequencies have undeniable practical significance for designing new terahertz and infrared range plasmonic micro- or nanolasers.

Comments and Drawbacks

Unfortunately, the work is not without certain flaws.

1. In Chapter 1, the author states that non-local effects can be neglected for the strip widths greater than 100 nm. However, a strip width of 35 nm is chosen for

Figure 4.7. It is necessary to justify the use of formulas (1.11), (1.12), or the integral representation for the graphene conductivity as a complex-valued function, as well as the application of the boundary conditions derived for infinite graphene plane to such a graphene strip.

2. The parameter α , which corresponds to the incidence angle, is present in the expressions for the matrix equations of the plane wave diffraction problem from the infinite graphene strip grating on the dielectric substrate. However, in Chapter 4, this parameter disappears from the expressions. Apparently, it is assumed that α equals zero. It would be worthwhile to study the case where α is different from zero or provide an explanation why only the case where α equals zero is considered.

3. On pages 96 and 97, analyzing Figure 3.3, the author notes that the rate of convergence is the highest in the case of normal incidence and the absence of dielectric layer. However, this case is not presented here.

4. On pages 63 and 64, it is stated that the error decreases with an increase in the order of matrix reduction. However, in the case of $\kappa=100.1$, some curves for the error exhibit oscillations and do not show a noticeable decrease.

5. There are some inaccuracies in the work. On page 115, while analyzing Figure 3.20, it is mentioned that the resonance frequency of the substrate mode S_0 does not depend on the chemical potential. This statement is too general. Graphene strips are not at the electric field zeros and still introduce perturbations to the resonance frequency. On page 96, Figure 2a is referenced instead of Figure 3a. In Figure 4.17, the units of measurement for h are not indicated.

These points are not related to the fundamental aspects, results, and conclusions of the work and do not impact the positive assessment of the study.

The dissertation of Fedir O. Yevtushenko "Resonant scattering and absorption of electromagnetic waves by infinite gratings of graphene strips on dielectric substrates" represents a comprehensive scientific investigation conducted at the high level. The results presented in the dissertation contribute to a new scientific direction in modern physics, specifically in the field of electrodynamics of periodic graphene structures in the terahertz and infrared ranges. The work demonstrates internal consistency, and its primary findings, fully documented in scientific publications and presented at academic conferences, have been personally obtained by the author. Fedir O. Yevtushenko has thoroughly mastered the methodology of scientific research.

Considering the arguments presented above, I believe that in terms of the timeliness of the dissertation topic, the level of the execution of the formulated scientific tasks, the obtained scientific results, their novelty, and the practical significance, the dissertation of Fedir O. Yevtushenko, "Resonant scattering and absorption of electromagnetic waves by infinite gratings of graphene strips on dielectric substrates," fully meets the requirements outlined in the decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated January 12, 2022, No. 44, titled "Procedure for awarding the degree of Doctor of Philosophy and cancellation of the decision of the one-time specialized academic council of a higher education institution, scientific institution to award the degree of Doctor of Philosophy," thus, the author,

Fedir Oleksandrovykh Yevtushenko, deserves to be awarded the degree of Doctor of Philosophy in specialization #104 – Physics and Astronomy.

Актуальність теми дисертації

Періодично сруктуровані стрічкові решітки широко застосовуються зараз та перспективні в майбутньому при створення нових і удосконаленні існуючих пристроїв у терагерцевому та інфрачервоному діапазонах хвиль. Тому **важливим** є подальше дослідження таких періодичних структур, ідентифікація резонансів, які вони здатні підтримувати, а також вивчення пов'язаних з ними фізичних ефектів. Резонанси на решіткових модах демонструють надзвичайно високу добротність. Поблизу них у надзвичайно вузькій смузі частот спостерігається ярко виражений екстремум характеристик розсіяння. Проте використання неефективних методів, яке вимагає при побудові частотних залежностей вибору занадто великого кроку за частотою, чи невірне пояснення ефектів може виливатись у недоліки у реально існуючих пристроях. Наприклад, це стосується появи сліпих зон у фазованих антенних решітках та надвузьких зон прозорості у поглиначах.

Серед всього різноманіття методів дослідження стрічкових решіток неможливо виділити якийсь один універсальний, який би дозволяв з єдиних позицій аналізувати електродинамічні характеристики складних об'єктів. Особливо це стосується відкритих систем. Чисто числові методи, які відрізняються універсальністю, наближено враховують умову випромінення на нескінченності, що обмежує точність отриманих результатів декількома знаками. Неврахування умови на ребрі, як відомо, перешкоджає наявності єдиного розв'язку. Як наслідок, може бути отримано нефізичний розв'язок. Тому **актуальною задачею** є розробка методів, які мають гарантовану збіжність, відповідають теоремам про єдиність розв'язку та дозволяють отримувати результати за прийнятний комп'ютерний час.

Графен є відносно новим матеріалом з унікальними властивостями. Він є достатньо міцним, поглинає електромагнітне поле, здатен підтримувати поверхневі плазмон-поляритонні хвилі і відповідні плазмонні резонанси на частотах на два порядки нижче, ніж благородні метали. Провідністю графена, а значить і властивостями всієї структури, до якої входять графенові включення, можна керувати динамічно, за рахунок прикладення електростатичного чи магнітостатичного поля. Це відкриває значні перспективи для використання графену у перестроюваних пристроях.

У зв'язку з цим вибір мети та задач дослідження, об'єктів, математичних методів, засобів аналізу електродинамічних характеристик решіток, встановлення загальних закономірностей розсіяння

електромагнітних хвиль дозволяє стверджувати, що тематика наведеної дисертаційної роботи є актуальною, як в загальнонауковому, так і в прикладному сенсі.

Наукова новизна отриманих результатів

У роботі в рамках строгого математично обґрунтованого підходу визначено фундаментальні основи розсіяння, поглинання та випромінювання електромагнітного поля решітками з графенових стрічок на підкладці. Розвинений єдиний підхід до дослідження структур на базі нескінченної періодичної решітки з ідеально провідних чи матеріальних графенових стрічок на діелектричній підкладці.

В дисертації отримано низку нових наукових результатів. Вкажемо на деякі з них.

1. Узагальнено результати багатолітніх досліджень розсіяння хвиль нескінченними решітками з ідеально провідних стрічок на діелектричній підкладці. Розв'язки відповідних задач дифракції записано з використанням методу задачі Рімана-Гільберта у вигляді, придатному для їх безпосереднього програмування. Встановлено положення резонансів на решіткових модах на частотній осі, описано закономірності їх зміни при варіації параметрів. Досліджено ефекти, які пов'язані з виникненням цих резонансів, наприклад, ефекти аномального проходження та відбиття.

2. Вперше метод задачі Рімана-Гільберта у випадку H -поляризації розвинений на нескінченну графенову стрічкову решітку, розташовану на діелектричній пластині-підкладці. Запропонований строгий підхід дозволив детально дослідити резонансні ефекти у розсіянні та поглинанні плоскої електромагнітної хвилі та їх варіації при зміні геометричних та матеріальних параметрів структури. При цьому встановлено деякі фізичні закономірності, які мають важливе значення для практичних застосувань. Зокрема встановлено, що за рахунок збудження плазмонних резонансів на графенових стрічках наведена структура може слугувати поляризатором, який пропускає E -поляризовані хвилі, частково відбиваючи і частково поглинаючи H -поляризовані хвилі. Показано, що за рахунок зміни хімічного потенціалу графену положенням смуги запирання можна керувати. Безсумнівну новизну становлять і наведені асимптотичні вирази для частот плазмонних резонансів.

3. При дослідженні фізичних явищ, які виникають за рахунок одночасного збудження плазмонних резонансів та резонансів на решіткових модах у графенових решітках, розкрито ефект електромагнітно індукованої прозорості. Показано, що настроюваність періодичних графенових структур за рахунок прикладення електростатичного поля до стрічок може бути порушена. Зміна хімічного потенціалу тут не впливає суттєво на положення мінімуму коефіцієнта проходження на частотній осі.

4. На базі побудованої математичної моделі досліджено порогові умови мод лазера, який складається з періодичної графенової решітки з діелектричною підкладкою. Показано, що у наведеному лазері існують моди трьох типів: плазмонні моди, ґраткові моди і моди діелектричної підкладки.

Вдало поєднано підхід до лазерної задачі на власні значення, метод задачі Рімана-Гільберта і числову ітераційну процедуру знаходження нулів відповідного детермінанту. Таке поєднання дозволило розробити ефективний метод чисельного аналізу. Показано, що положенням плазмонних мод на частотній осі та їх пороговими значеннями посилення у підкладці вдається керувати за рахунок зміни хімічного потенціалу графену. Решіткові моди мають набагато нижчі порогові значення посилення, проте майже не піддаються динамічному настроюванню частоти та порогу.

Достовірність і обґрунтованість результатів не викликає сумнівів. Задачі розглянуто в строгій математичній постановці. Отримані нескінченні матричні рівняння є рівняннями Фредгольма другого роду, тому їх чисельний розв'язок має гарантовану збіжність. Додатково, збіжність підтверджено при проведенні відповідних досліджень похибки при різних значеннях параметрів. Проведено порівняння результатів, отриманих у роботі з окремими результатами, відомими з літератури. Моделі електродинамічних структур, що досліджуються, виконано з використанням прийнятих ідеалізацій, таких як двовимірність задач, нескінченна мала товщина стрічок, нехтування нелокальними ефектами та анізотропією при визначенні провідності графену та інше. Отримані результати не суперечать відомим фізичним закономірностям. Додатково, систематично перевіряється виконання закону збереження енергії.

Практичне значення отриманих результатів

1. Розроблено теорію і методи математичного моделювання резонансних явищ в періодичних структурах з графенових стрічок. Це дозволяє казати про створення ефективного інструмента досліджень характеристик цілої низки електродинамічних систем, які мають у своєму складі такі решітки.

2. Зібрана під час виконання досліджень інформація о суттєвості впливу хімічного потенціалу графену, який можна змінювати динамічним чином за рахунок прикладення електростатичного поля, на характеристики розсіяних полів дозволяє, з одного боку, використовувати виникаючі при цьому ефекти у якості ключових при реалізації функції керування, а з іншого боку – проводити аналіз і оптимізацію параметрів електродинамічних систем, які мають у своєму складі такі решітки.

3. Завдяки виявленим властивостям нескінченної решітки з графенових стрічок на підкладці пропускати E -поляризовані хвилі та відбивати або поглинати H -поляризовані хвилі можливе створення на основі такої структури настроюваних поляризаторів та фільтрів.

4. Фізичні результати стосовно графенових стрічкових решіток дозволяють досліджувати та оптимізувати параметри відповідних поглинаючих поверхонь, що є ключовим у технологіях типу стелс.

5. Робота автора робить значний внесок у напрям, пов'язаний зі створенням антенної техніки. Отримані результати стосовно резонансів на решіткових модах можуть бути використані при усуненні недоліків у фазованих антенних решітках, пов'язаних з появою сліпих зон.

6. Отримані результати стосовно порогових значень посилення матеріалу активної підкладки та відповідних значень частот власних мод мають безсумнівне практичне значення для проектування нових плазмонних мікро- чи нанолазерів терагерцевого та інфрачервоного діапазонів.

Зауваження та недоліки

На жаль, робота не позбавлена недоліків.

1. У розділі 1 автор вказує, що нелокальними ефектами можна знехтувати при ширині стрічки більше за 100 нм. Водночас для рис. 4.7 вибрано ширину стрічок 35 нм. Необхідно пояснити правомірність використання формул (1.11), (1.12) або інтегрального подання для провідності графену як комплексно-значної функції, а також правомірність застосування граничних умов, записаних для нескінченної графенової площини, до такої графенової стрічки.

2. У виразах для матричних рівнянь задачі дифракції плоскої хвилі на нескінченній графеновій решітці на діелектричній підкладці присутній параметр альфа, який відповідає куту падіння. Проте у розділі 4 цей параметр з виразів зникає. Вочевидь, покладено, що альфа дорівнює нулю. Варто було б також дослідити випадок, коли кут альфа є відмінним від нуля або надати пояснення, чому розглянуто лише випадок, коли кут альфа дорівнює нулю.

3. На с. 96, 97 аналізуючи рис. 3.3, автор зазначає, що найбільша швидкість збіжності досягається у випадку нормального падіння і відсутності діелектричного шару. Проте цей випадок тут не наведено.

4. На с. 63, 64 вказується, що похибка спадає при збільшенні порядку редукції матриці. Проте у випадку $k=100.1$ деякі криві для похибки мають осцилюючий характер і не демонструють помітного спадання.

5. У роботі присутні деякі неточності. На с. 115 при аналізі рис. 3.20 вказується, що частота резонансу на моді підкладки S_0 не залежить від значення хімічного потенціалу. Це твердження є занадто загальним. Графенові стрічки не знаходяться у нулі електричного поля і все ж таки вносять збурення до резонансної частоти. На с. 96 згадується рис. 2а замість рис. 3а. На рис. 4.17 не вказано одиниці вимірювання h .

Надані зауваження не торкаються принципіальних положень, результатів та висновків роботи та не впливають на позитивну оцінку проведених досліджень.

Дисертація Євтушенка Федора Олександровича "Resonant scattering and absorption of electromagnetic waves by infinite gratings of graphene strips on dielectric substrates" є закінченим науковим дослідженням, виконаним на високому рівні. Сукупність наданих у дисертації результатів розвиває новий науковий напрямок сучасної фізичної науки, пов'язаний з електродинамікою періодичних графенових структур у терагерцевому та інфрачервоному діапазонах. Робота має внутрішню єдність. Основні її результати, які у повній мірі відображено у наукових публікаціях та представлено на наукових конференціях, отримані особисто автором. Здобувач повною мірою оволодів методологією проведення наукових досліджень.

Враховуючи надані вище аргументи, вважаю, що за рівнем актуальності тематики, рівнем виконання поставленого наукового завдання, отриманих наукових результатів та їх новизни, практичної значущості дисертаційна робота Євтушенка Федора Олександровича "Resonant scattering and absorption of electromagnetic waves by infinite gratings of graphene strips on dielectric substrates" повністю відповідає вимогам постанови Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 "Порядок 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 присудження ступеня доктор філософії за спеціальністю 104 - Фізика та астрономія.

Офіційний опонент
кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри фізики надвисоких
частот факультету радіофізики,
біомедичної електроніки та
комп'ютерних систем
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна

Ка

Мстислав КАЛІБЕРДА



В. Грешин