

УДК 519.63

Решение интегродифференциального уравнения Максвелла и распространение электромагнитного излучения в графеновых структурах

Артемов Д.Д.¹, Дюбуа А.Б.¹, Кучерявый С.И.², Сафoshкин А.С.¹

Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина¹,
Обнинский институт атомной энергетики Национального исследовательского
ядерного университета МИФИ²

Аннотация: В работе получено решение интегродифференциального уравнения Максвелла для планарной структуры волновода с графеновым слоем.

Ключевые слова: графен, интегродифференциальное уравнение Максвелла, модовый метод.

Открытие графена и создание терагерцовых лазеров на графене [1] стимулировали теоретические [2] и экспериментальные [3] исследования процессов перераспределения электромагнитных волн на планарных структурах. Однако даже в самом простом приближении решение уравнений Максвелла при заданных граничных и краевых условиях приводит к громоздким интегродифференциальным уравнениям [4], которые имеют строго аналитическое решение только для определенных геометрий структур [5].

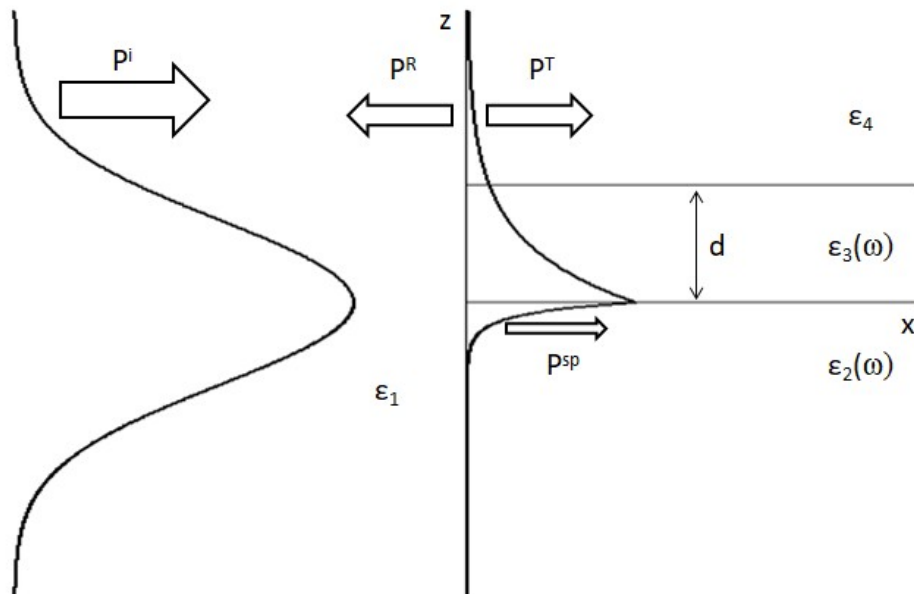


Рис. 1. Геометрия структуры и процесс возбуждения поверхностного поляритона. P^i – падающее излучение, P^R – отраженное объемное излучение, P^T – прошедшее излучение и P^{sp} – поверхностный поляритон

В работе [5] был развит модовый метод исследования задач дифракции электромагнитного излучения на диэлектрическом барьере. Основным достоинством этого

метода является сведение интегральных дифракционных уравнений к системе алгебраических, которые дают информацию, как о поверхностных, так и объемных полях, возбуждаемых в структуре [6]. В данной работе этот метод был использован для расчета процессов отражения поверхностной волны от вертикального диэлектрического барьера.

Рассматриваемая структура представляет собой четыре области, характеризующиеся диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 – вакуум, $\epsilon_2(\omega)$ – металл, $\epsilon_3(\omega)$ – графен, ϵ_4 – диэлектрик.

Уравнения Максвелла $i\omega\mathfrak{H} = \text{crot}\mathfrak{E}$ и $i\omega\epsilon_i(\omega)\mathfrak{E} = -\text{crot}\mathfrak{H}$ в декартовой системе в совокупности с гармоническим характером распространения каждой моды вдоль оси X $\{\mathfrak{H}(x, z), \mathfrak{E}(x, z)\} = \{H(z), E(z)\} \exp(ik_x x)$ связывают компоненты мод ТМ-поляризованного излучения (E_x, E_z, H_y) . Огибающие моды $H(z)$, а также волновое число kx определяются из волнового уравнения и граничных условий. Волновое уравнение дает зависимость поля $H_y(z)$ для каждого из квадрантов с граничными условиями $H_y(z = -0) = H_y(z = +0)$, $E_x(z = -0) = E_x(z = +0)$, которые полностью определяют структуру каждой моды при $x < 0$ и $x > 0$ в каждой из областей.

Литература

1. Chakraborty S., Marshall O. P., Folland T. G., Kim Y. J., Grigorenko A. N., Novoselov K. S. Gain modulation by graphene plasmons in aperiodic lattice lasers // *Science*. 2016. Vol. 351, no. 6270. P. 246-248.
2. Shah S., Lin X., Shen L., Renuka M., Zhang B., Chen H. Interferenceless polarization splitting through nanoscale van der Waals heterostructures // *Physical Review Applied*. 2018. Vol. 10, no. 3. P. 034025.
3. Afinogenov B. I., Kopylova D. S., Abrashitova K. A., Bessonov V. O., Anisimov A. S., Dyakov S. A., Gippius N. A., Gladush Yu. G., Fedyanin A. A., Nasibulin A. G. Midinfrared surface plasmons in carbon nanotube plasmonic metasurface // *Physical Review Applied*. 2018. Vol. 9, no. 2. P. 024027.
4. Бухенский К. В., Дюбуа А. Б., Конюхов А. Н., Кучерявый С. И., Машнина С. Н., Сафошкин А. С. Особенности решения интегродифференциальных уравнений Максвелла и возбуждения поверхностного поляритона на планарной структуре // *Журнал Средневолжского математического общества*. 2017. Т. 19, № 3. С. 73-81.
5. Bukhensky K. V., Dubois A. B., Konukhov A. N., Kucheryavyy S. I., Safoshkin A. S. Surface polariton propagation in structure with a graphene layer // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. 2022. Vol. 15, no. 6. P. 742-752.
6. Бухенский К. В., Дюбуа А. Б., Конюхов А. Н., Кучерявый С. И., Сафошкин А. С. Распространение электромагнитного излучения в графеновых структурах // *Ученые записки Физического факультета Московского университета*. 2023. № 1. С. 2310301.

MSC 78A25, 45J05

Solution of Maxwell's integrodifferential equation and propagation of electromagnetic radiation in graphene structures

D.D. Artemiev¹, A.B. Duboi¹, S.I. Kucheryavyy², A.S. Safoshkin¹

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin¹,
Obninsk Institute of Atomic Energy of the
National Research Nuclear University MEPhI²

Abstract: In this paper, a solution to Maxwell's integro-differential equation for a planar waveguide structure with a graphene layer is obtained.

Keywords: graphene, Maxwell's integro-differential equation, mode method.

References

1. Chakraborty S., Marshall O. P., Folland T. G., Kim Y. J., Grigorenko A. N., Novoselov K. S. Gain modulation by graphene plasmons in aperiodic lattice lasers // *Science*. 2016. Vol. 351, no. 6270. P. 246-248.
2. Shah S., Lin X., Shen L., Renuka M., Zhang B., Chen H. Interferenceless polarization splitting through nanoscale van der Waals heterostructures // *Physical Review Applied*. 2018. Vol. 10, no. 3. P. 034025.
3. Afinogenov B. I., Kopylova D. S., Abrashitova K. A., Bessonov V. O., Anisimov A. S., Dyakov S. A., Gippius N. A., Gladush Yu. G., Fedyanin A. A., Nasibulin A. G. Midinfrared surface plasmons in carbon nanotube plasmonic metasurface // *Physical Review Applied*. 2018. Vol. 9, no. 2. P. 024027.
4. Bukhensky K. V., Dubois A. B., Konukhov A. N., Kucheryavyy S. I., Mashnina S. N., Safoshkin A. S. Osobennosti resheniya integrodifferentsialnykh uravneniy Maksvella i возбуждения поверхностного поларитона на планарной структуре [Features of solving Maxwell integro-differential equations and excitation of surface polaritons on a planar structure] // *Zhurnal Srednevolzhskogo matematicheskogo obshchestva*. 2017. Vol. 19, no. 3. P. 73-81. (in Russian)
5. Bukhensky K. V., Dubois A. B., Konukhov A. N., Kucheryavyy S. I., Safoshkin A. S. Surface polariton propagation in structure with a graphene layer // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. 2022. Vol. 15, no. 6. P. 742-752.
6. Bukhensky K. V., Dubois A. B., Konukhov A. N., Kucheryavyy S. I., Safoshkin A. S. Rasprostraneniye elektromagnitnogo izlucheniya v grafetovykh strukturakh [Propagation of electromagnetic radiation in graphene structures] // *Uchenye zapiski Fizicheskogo fakulteta Moskovskogo universiteta*. 2023. No. 1. P. 2310301. (in Russian)