



УДК 621.371

doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-4



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Численное моделирование диаграмм рассеяния терагерцовых волн на решетках графеновых нанолент в магнитном поле

Михаил Сергеевич Никитин

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
Russi4nBear@yandex.ru

Галина Степановна Макеева

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
radiotech@pnzgu.ru

Аннотация. Проведено моделирование эффективной поверхности рассеяния, т.е. параметра RCS решетки графеновых нанолент, облучаемой нормально падающей терагерцовой *ТЕМ*-волной (*p*-поляризации), при приложении внешнего перпендикулярного магнитного поля, с помощью программного комплекса CST MWS. Проведено численное исследование отношения амплитуд горизонтальной E_x и вертикальной E_y компонент рассеянного поля в точках сечения главного лепестка диаграммы рассеяния в отсутствие и при приложении внешнего магнитного поля. Показано, что в результате дифракции линейно-поляризованной волны на решетке графеновых нанолент при приложении магнитного поля прошедшая и отраженная волны имеют эллиптическую поляризацию (при этом поляризационный эллипс сильно вытянут) в отличие от случая отсутствия внешнего магнитного поля, когда прошедшая и отраженная волны имеют линейную поляризацию.

Ключевые слова: численное моделирование, терагерцовые волны, магнитное поле, *p*-поляризация

Для цитирования: Никитин М. С., Макеева Г. С. Численное моделирование диаграмм рассеяния терагерцовых волн на решетках графеновых нанолент в магнитном поле // Инжиниринг и технологии. 2025. Т. 10 (1). С. 1–6. doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-4

Numerical simulation of scattering patterns of terahertz waves on graphene nanoribbon arrays in a magnetic field

Mikhail S. Nikitin

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
Russi4nBear@yandex.ru

Galina S. Makeeva

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
radiotech@pnzgu.ru

Abstract. The effective scattering surface, i.e. the RCS parameter of the graphene nanoribbon array irradiated by a normally incident terahertz wave (*p*-polarization) with an external perpendicular magnetic field was simulated using the CST MWS software package. A numerical study was performed of the ratio of the amplitudes of the horizontal E_x and vertical E_y components of the scattered field at the points of the main lobe cross-section of the scattering diagram in the absence and with an external magnetic field. It is shown that as a result of diffraction of a linearly polarized *TEM*-wave on the graphene nanoribbon array with applied magnetic field the transmitted and reflected waves have an elliptical polarization (with the polarization ellipse being strongly elongated), in contrast to the case of the absence of an external magnetic field, when the transmitted and reflected waves have a linear polarization.

Keywords: numerical simulation, terahertz waves, magnetic field, *p*-polarization

For citation: Nikitin M.S., Makeeva G.S. Numerical simulation of scattering patterns of terahertz waves on graphene nanoribbon arrays in a magnetic field. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2025;10(1):1–6. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-4

Благодаря своей необычной зонной структуре и двумерной (2D) природе графен проявляет множество исключительных электрических и оптических свойств, которые могут динамически перестраиваться приложением статических электрического и магнитного полей, что является еще одной важной особенностью графена [1]. При приложении магнитного поля графен становится гиротропным, что приводит ко многим магнитооптическим (МО) явлениям, таким как «гигантский» эффект Фарадея и эффекты Керра [2, 3]. Возбуждение поверхностных магнитоплазмонов-поляритонов (МППП) значительно усиливает МО-эффекты в графеновых структурах, сильные магнитоплазмонные резонансы наблюдаются в решетках графеновых нанолент (ГНЛ) [1–3].

Целью работы является численное исследование методами автоматизированного моделирования свойств рассеяния терагерцовых (ТГц) волн на решетках ГНЛ под действием магнитного поля, зависящих от падающей волны (поляризации, рабочей частоты) и облучаемого объекта (геометрии решетки, гиротропии графена в магнитном поле).

Графен при приложении перпендикулярного постоянного магнитного поля характеризуется тензором комплексной поверхностной проводимости [4]:

$$\hat{\sigma} = \begin{pmatrix} \dot{\sigma}_{xx} & \dot{\sigma}_{xy} & 0 \\ \dot{\sigma}_{yx} & \dot{\sigma}_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\sigma}_d \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где компоненты тензора имеют следующий вид

$$\dot{\sigma}_{xx} = \dot{\sigma}_{yy} = \frac{e^2 |E_f|}{\pi h^2} \cdot \frac{i(\omega + i/\tau)}{(\omega + i/\tau)^2 - \omega_c^2}, \quad \dot{\sigma}_{xy} = -\dot{\sigma}_{yx} = \frac{e^2 |E_f|}{\pi h^2} \cdot \frac{\omega_c}{(\omega + i/\tau)^2 - \omega_c^2}, \quad \dot{\sigma}_{xx} = \dot{\sigma}_d \quad (\dot{\sigma}_d \text{ при } B = 0);$$

здесь E_f – уровень Ферми, τ – время релаксации $\tau = \mu E_f / e V_f^2$, μ – плотность носителей заряда $\mu = 105 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, ω_c – циклотронная частота $\omega_c = e B V_f^2 / E_f$, V_f – скорость Ферми $V_f = 10^6 \text{ м/с}$.

Для создания модели анизотропной графеновой решетки в магнитном поле, включающей тензор комплексной диэлектрической проницаемости графена:

$$\hat{\varepsilon} = \hat{I} + \frac{i}{\omega t \varepsilon_0} \begin{pmatrix} \dot{\sigma}_{xx} & \dot{\sigma}_{xy} & 0 \\ \dot{\sigma}_{yx} & \dot{\sigma}_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\sigma}_d \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где t – толщина графена, $t = 1 \text{ нм}$, ε_0 – электрическая постоянная, действительные и мнимые части компонент тензора $\hat{\varepsilon}$ (2) вводились в виде формул в программу MWS CST [5].

Для решения электродинамической задачи дифракции с помощью программного комплекса CST MWS выбран метод падающей волны [6]. Электродинамическая задача решается в частотной области численным методом конечных элементов (FEM) [5]. В программе MWS CST разработана модель решетки (период d) ГНЛ (ширина w , длина l , число $N = 21$) на диэлектрической подложке ($\varepsilon = 4$) (рис. 1). Для описания границы раздела сред используем граничное условие Open (add space) [6], условные обозначения которого показаны на рис. 1. Эта опция рекомендуется для антенных задач [6].

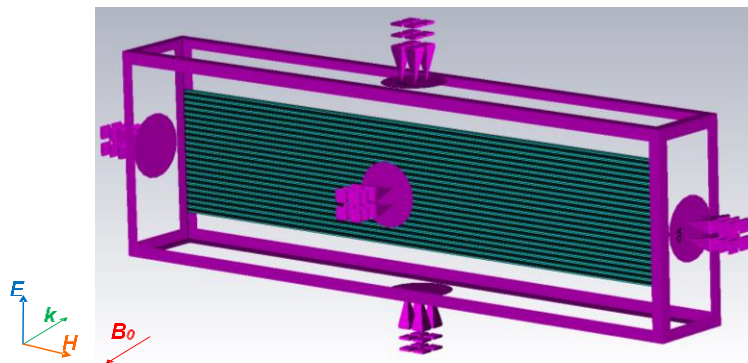


Рис. 1. Модель решетки (период d) ГНЛ (ширина w , длина l , число $N = 21$) на диэлектрической подложке в CST MWS: нормально падающая TEM-волна (p-поляризации) и ориентация вектора индукции B_0 постоянного магнитного поля



С помощью программы *MWS CST* проведено моделирование дифракции нормально падающей линейно-поляризованной *TEM*-волны (*p*-поляризации) на решетку ГНЛ при приложении постоянного магнитного поля перпендикулярно графену (см. рис. 1). Вектор электрического поля *E* падающей вертикально линейно-поляризованной *TEM*-волны перпендикулярен оси ГНЛ (*p*-поляризация) (см. рис. 1).

Рассчитаны частотные зависимости модуля коэффициента прохождения $|S_{21}|$ *TEM*-волны (*p*-поляризации) через решетку ГНЛ для различных значений индукции B_0 постоянного магнитного поля и уровня Ферми E_f графена в ТГц и дальнем ИК диапазонах частот. Результаты расчета $|S_{21}|$ для решетки ($d = 2$ мкм) ГНЛ ($w = 0,5$ мкм, $l = 100$ мкм) при отсутствии ($B_0 = 0$) и приложении постоянного магнитного поля для значений индукции B_0 (0, 1, 2, 4, 7, 10 Тл) приведены на рис. 2. Параметры графена $E_f = 0,2$ эВ, $\tau = 0,1$ пс и $T = 300$ К.

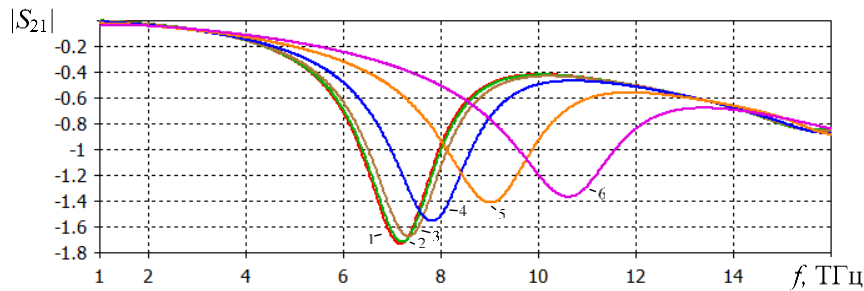


Рис. 2. Частотные зависимости модуля коэффициента прохождения $|S_{21}|$ через решетку ГНЛ для различных значений индукции B_0 постоянного магнитного поля: кривая 1 – $B_0 = 0$, 2–1 Тл, 3–2 Тл, 4–4 Тл, 5–7 Тл, 6–10 Тл; $w = 0,5$ мкм, $d = 1$ мкм, $l = 100$ мкм; $E_f = 0,2$ эВ, $\tau = 1$ пс, $T = 300$ К

В отсутствие внешнего магнитного поля ($B_0 = 0$) на частотной зависимости имеется минимум $|S_{21}|$ (рис. 2), обусловленный резонансом основной моды поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) на частоте плазмонного резонанса f_{0res} , зависящей от значений уровня Ферми E_f .

При приложении постоянного магнитного поля положение и глубина минимумов $|S_{21}|$, обусловленных резонансом основной моды МППП на частотах магнитоплазмонных резонансов f_{res} , зависят от индукции B_0 (рис. 2). С увеличением значений B_0 (от 0 до 10 Тл) положение резонансных минимумов $|S_{21}|$ на каждой из частотных зависимостей смещается в сторону более высоких ТГц-частот.

В *MWS CST* проведено моделирование характеристики дальнего поля – эффективной поверхности рассеяния, т.е. параметра *RCS* (radar cross section) [6], который определяет свойства рассеяния конкретной цели облучения – решетки ГНЛ (рис. 1). Проведено численное исследование *RCS* решетки ГНЛ в магнитном поле, зависящего от падающей волны (поляризации, угла падения, рабочей частоты) и облучаемой цели самой по себе (геометрии решетки, характеристик графена в магнитном поле). Результаты моделирования 3D *RCS* на резонансных частотах решетки ГНЛ f_{0res} в отсутствие ($B_0 = 0$) и f_{res} при приложении внешнего перпендикулярного магнитного поля ($B_0 = 4$ Тл) приведены на рис. 3 а,б, соответственно.

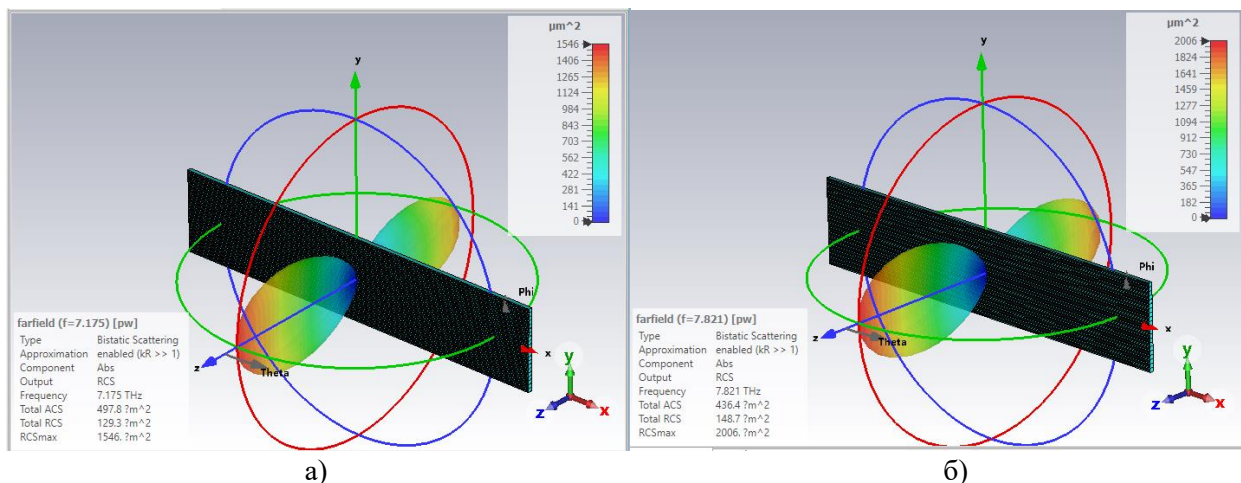


Рис. 3. Эффективная поверхность рассеяния 3D *RCS*(мкм²) решетки ГНЛ: а – $f_{0res} = 7,175$ ТГц, $B_0 = 0$; б – $f_{res} = 7,821$ ТГц, $B_0 = 4$ Тл



Рассчитанные 3D RCS (рис. 3) показывают, как рассеивается p -поляризованная TEM -волна, нормально падающая на решетку ГНЛ, на частотах плазмонного резонанса $f_{0res} = 7,175$ ТГц, (при $B_0 = 0$) и магнитоплазмонного резонанса $f_{res} = 7,821$ ТГц (при $B_0 = 4$ Тл).

Проведено моделирование характеристик дальнего поля 3D e -Field [6], т.е. величины E -поля в дальнем поле на заданном расстоянии, для вертикальной E_y и горизонтальной E_x составляющих рассеянного поля в зависимости от угловых сферических координат θ , φ для различных значений индукции B_0 , результаты которого представлены на рис. 4, 5 на частотах $f_{0res} = 7,175$ ТГц (при $B_0 = 0$) и $f_{res} = 7,821$ ТГц (при $B_0 = 4$ Тл). Вертикальная E_y и горизонтальная E_x составляющие рассчитываются следующим образом [5]:

$$E_x = E_\theta \cos \varphi - E_\varphi \sin \varphi, \quad E_y = E_\theta \sin \varphi + E_\varphi \cos \varphi. \quad (3)$$

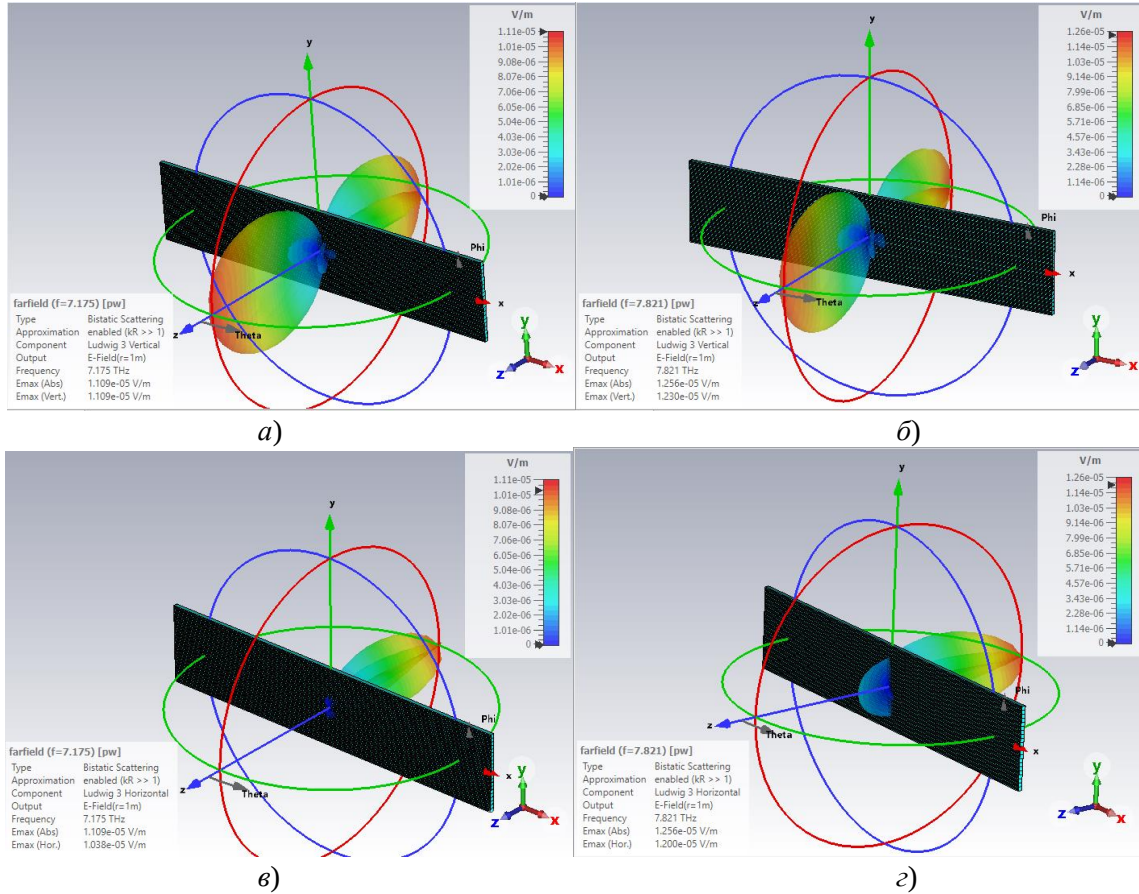
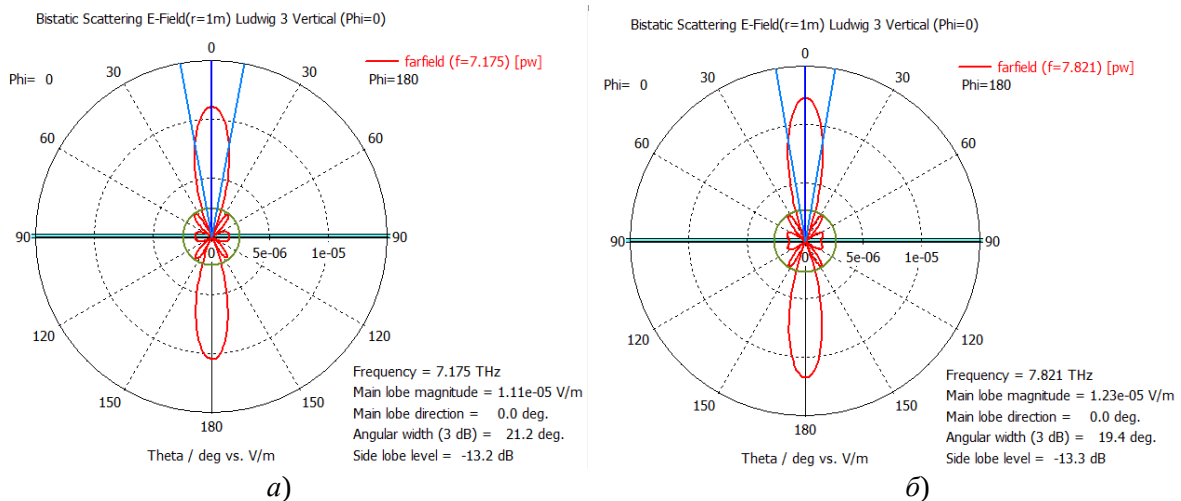


Рис. 4. 3D-диаграммы рассеяния 3D e -Field решетки ГНЛ: $a, б$ – для вертикальной E_y , $в, г$ – горизонтальной E_x , составляющих рассеянного поля: $a, в$ – $B_0 = 0$, $f_{0res} = 7,175$ ТГц; $б, г$ – $B_0 = 4$ Тл, $f_{res} = 7,821$ ТГц



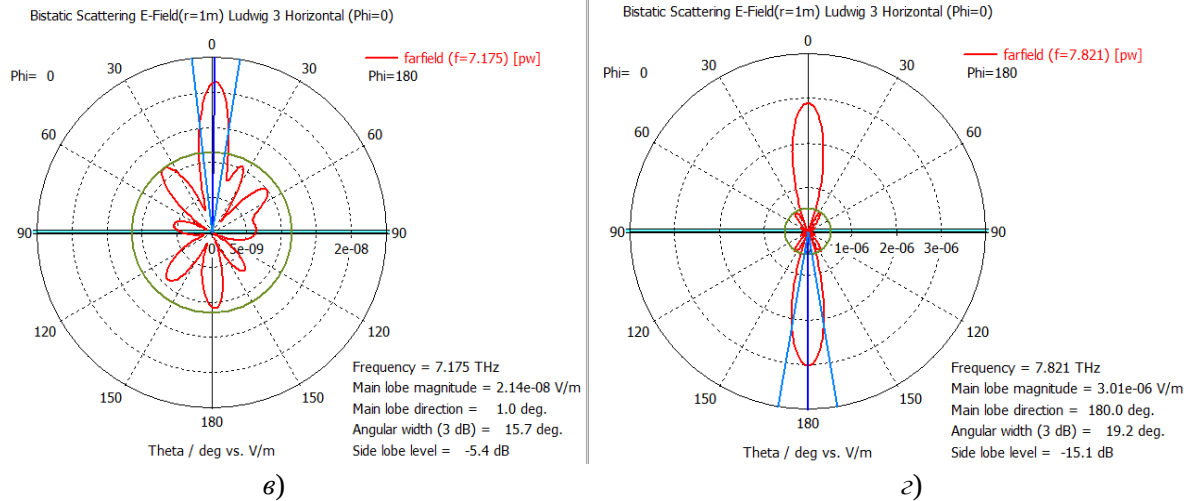


Рис. 5. 2D-диаграммы рассеяния 2D e -Field решетки ГНЛ в зависимости от θ ($\varphi = 0$) для вертикальной E_y (а, б) горизонтальной E_x (в, г) составляющих рассеянного поля: $B_0 = 0$, $f_{\text{ores}} = 7,175$ ТГц (а, в), $B_0 = 4$ Тл, $f_{\text{res}} = 7,821$ ТГц (б, г)

Как следует из результатов моделирования, при дифракции на решетке ГНЛ нормально падающей линейно-поляризованной TEM -волны (p -поляризации), имеющей только вертикальную компоненту E_y (см. рис. 1), при приложении перпендикулярного постоянного магнитного поля ($B_0 = 4$ Тл) появляется горизонтальная компонента E_x рассеянного поля с амплитудой (порядка 10^{-6} В/м (см. рис. 5,г)), соизмеримой с амплитудой вертикальной компоненты E_y рассеянного поля (порядка 10^{-5} В/м (рис. 5,б)).

Для сравнения при отсутствии внешнего магнитного поля ($B_0 = 0$) появляется горизонтальная компонента E_x рассеянного поля малой амплитуды (порядка 10^{-8} В/м (рис. 5,в)) по сравнению с амплитудой вертикальной компоненты E_y рассеянного поля (порядка 10^{-5} В/м (рис. 5,а)), обусловленная незначительной анизотропией проводимости графена при приложении электрического поля смещения.

Результаты расчета отношения амплитуд горизонтальной и вертикальной составляющих E_x/E_y рассеянного поля в точках сечения ($\varphi = 0$) главного лепестка диаграммы рассеяния ($\varphi = 0$) представлены на рис. 6 а,б,в в отсутствие ($B_0 = 0$, $f_{\text{ores}} = 7,175$ ТГц) и при приложении внешнего магнитного поля ($B_0 = 4$ Тл, $f_{\text{res}} = 7,821$ ТГц), соответственно.

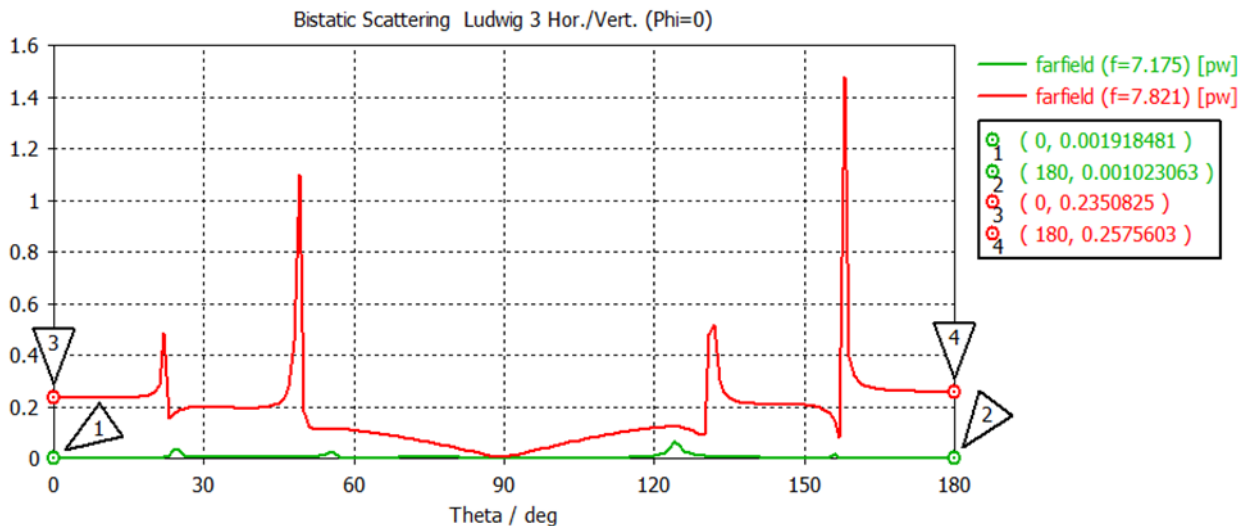


Рис. 6. Отношение амплитуд горизонтальной и вертикальной компонент E_x/E_y в точках сечения ($\varphi = 0$) главного лепестка диаграммы рассеяния решетки ГНЛ в зависимости от угла θ : а – $B_0 = 0$, $f_{\text{ores}} = 7,175$ ТГц; б – $B_0 = 4$ Тл, $f_{\text{res}} = 7,821$ ТГц

Из результатов моделирования следует, что в отсутствие внешнего магнитного поля ($B_0 = 0$) отношение E_x/E_y в точках сечения ($\varphi = 0$) главного лепестка диаграммы рассеяния (рис. 6, кривая 1) равно:



в точке 1 ($\theta = 0^\circ$) $E_x / E_y = 0,0019$, в точке 2 ($\theta = 180^\circ$) $E_x / E_y = 0,001$ и, следовательно, прошедшая и отраженная от решетки ГНЛ волны имеют линейную поляризацию. При приложении постоянного магнитного поля ($B_0 = 4$ Тл) отношение E_x / E_y в точках сечения ($\varphi = 0$) главного лепестка диаграммы рассеяния (рис. 6, кривая 2) равно: в точке 3 ($\theta = 0^\circ$) $E_x / E_y = 0,235$, в точке 4 ($\theta = 180^\circ$) $E_x / E_y = 0,257$ и, следовательно, прошедшая и отраженная от решетки ГНЛ волны имеют эллиптическую поляризацию, при этом поляризационный эллипс сильно вытянут.

Появление горизонтальной компоненты E_x рассеянного поля (достаточно большой амплитуды) при приложении перпендикулярного постоянного магнитного поля к решетке ГНЛ обусловлено гиротропией проводимости (1) графена и возникающими при этом МО-эффектами: эффектом Фарадея, заключающимся в повороте плоскости поляризации прошедшей линейно-поляризованной волны [7], и МО-эффектом Керра, который может заключаться в повороте плоскости поляризации отраженной волны [7].

Список литературы

1. Rhouma M. Ben, Guizal B., Bonnet P. [et al.]. Semi-analytical model for the analysis of a magnetically biased 1D subwavelength graphene-strip-grating // *Optics Continuum*. 2022. № 1 (5). P. 1144–1156.
2. Padmanabhan P., Boubanga-Tombet S., Fukidome H. [et al.]. A graphene-based magnetoplasmonic metasurface for actively tunable transmission and polarization rotation at terahertz frequencies // *Appl. Phys. Lett.* 2020. № 116, P. 221107. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0006448>
3. Poumirol J. M., Liu P., Slipchenko T. [et al.]. Electrically controlled terahertz magneto-optical phenomena in continuous and patterned graphene // *Nat. Commun.* 2017, № 8. P. 14626. URL: <https://doi.org/10.1038/ncomms14626>
4. Ferreira A., Viana-Gomes J., Bludov A. H. [et al.]. Faraday effect in graphene enclosed in an optical cavity and the equation of motion method for the study of magneto-optical transport in solids // *Phys. Rev. B*. 2011. № 84. P. 235410.
5. CST Microwave Studio. URL: <https://www.3ds.com/products/simulia>.
6. Курушин А. А. Проектирование СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE. М., 2016. 433 с.
7. Калиш А. Н. Магнитооптические эффекты в периодических наноструктурированных средах: дисс. ... канд. физ.-мат. наук МГУ. М., 2013.

References

1. Rhouma M. Ben, Guizal B., Bonnet P. et al. Semi-analytical model for the analysis of a magnetically biased 1D subwavelength graphene-strip-grating. *Optics Continuum*. 2022;(1):1144–1156.
2. Padmanabhan P., Boubanga-Tombet S., Fukidome H. et al. A graphene-based magnetoplasmonic metasurface for actively tunable transmission and polarization rotation at terahertz frequencies. *Appl. Phys. Lett.* 2020;(116):221107. Available at: <https://doi.org/10.1063/5.0006448>
3. Poumirol J.M., Liu P., Slipchenko T. et al. Electrically controlled terahertz magneto-optical phenomena in continuous and patterned graphene. *Nat. Commun.* 2017;(8):14626. Available at: <https://doi.org/10.1038/ncomms14626>
4. Ferreira A., Viana-Gomes J., Bludov A. H. et al. Faraday effect in graphene enclosed in an optical cavity and the equation of motion method for the study of magneto-optical transport in solids. *Phys. Rev. B*. 2011;(84):235410.
5. CST Microwave Studio. Available at: <https://www.3ds.com/products/simulia>.
6. Kurushin A.A. *Proektirovanie SVCH ustrojstv v CST STUDIO SUITE = Designing microwave devices in the CST STUDIO SUITE*. Moscow, 2016:433. (In Russ.)
7. Kalish A.N. Magneto-optical effects in periodic nanostructured media: PhD dissertation. Moscow, 2013. (In Russ.)

Поступила в редакцию / Received 25.04.2025

Принята к публикации / Accepted 16.05.2025