

07

Управляемые поглотители терагерцевого диапазона на основе резонансно поглощающих многослойных графеновых периодических структур

© А.М. Лерер¹, Г.С. Макеева²¹ Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия² Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

E-mail: lerer@sfedu.ru

Поступило в Редакцию 28 мая 2018 г.

Исследованы 2D-периодические решетки из графеновых прямоугольных полосок на подложках, содержащих диэлектрические и графеновые слои, в терагерцевом (THz) диапазоне. Показано, что на частотах резонанса поверхностного плазмон-поляритона эти графеновые структуры являются электрически управляемыми поглотителями почти 100% падающей на них энергии в широком интервале THz-частот.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.18.46618.17406

В графеновом слое, расположенном на поверхности диэлектрического слоя, в терагерцевом (THz) диапазоне может распространяться поверхностный плазмон-поляритон (ППП). В ограниченном графеновом элементе наблюдается резонанс ППП, при котором резко возрастают плотность энергии вблизи слоя, плотность тока и потери. Из-за большого коэффициента замедления ППП резонансные размеры этого элемента много меньше длины волны в вакууме. Этот эффект используется в ряде THz-устройств, в том числе поглощающих метаповерхностях [1–8]. Обычно они являются однопериодическими структурами, образованными графеновыми лентами, и содержат поглощающие слои, например металлические пленки. Аналогичные устройства, содержащие плазмонные материалы, используются и в оптическом диапазоне [9–12]. Роль поглощающих слоев очевидна. Периодические элементы и диэлектрические слои, на которые нанесены эти элементы, обеспечивают согласование, т. е. минимизацию отражения при резонансе, а в некоторых структурах и

дополнительные потери. Выбор размеров и параметров элементов позволяет получить резонанс в заданном частотном диапазоне. Применение графеновых элементов позволяет добиться резонанса в ТГц-диапазоне. Кроме того, в графеновых структурах положение резонанса поглощения можно изменять внешним электрическим полем.

Целью настоящей работы является теоретическое исследование принципов построения и характеристик управляемых электрическим полем поглотителей ТГц-диапазона на основе графеновых метаповерхностей, содержащих решетки из прямоугольных нанолент графена, с использованием электродинамического моделирования.

В работе исследуются многослойные поглощающие структуры, отличительной особенностью которых является применение 2D-периодических решеток из графеновых прямоугольных полосок на планарных многослойных подложках, содержащих диэлектрические и графеновые слои (на вставке к рис. 1, *a* — вид сбоку, одна элементарная ячейка, на вставке к рис. 1, *b* — вид сверху).

Решена задача о дифракции плоской однородной электромагнитной волны на 2D-решетке из графеновых полосок прямоугольной формы. Нормаль к поверхности — ось z . Размеры полосок по оси x — A_x , по оси y — A_y . Периоды d_x и d_y . Плоскость падения повернута на угол φ к оси x , угол падения θ .

Ранее эта задача была решена в [13,14]. В этих работах развит декомпозиционный метод на основе автономных блоков в виде прямоугольных параллелепипедов с графеновыми нановключениями и виртуальными каналами Флоке, в спектре которых существуют ТЕМ-волны, и разработан вычислительный алгоритм решения краевой задачи 3D-дифракции проекционным методом Галеркина.

В настоящей работе используются два более специализированных метода для расчета 1D- и 2D-решеток более сложной конфигурации.

В первом методе графеновые слои как обычно заменяются бесконечно тонкими импедансными слоями, импеданс которых определяется формулой Кубо. В этом приближении задача сводится к решению парных сумматорных уравнений относительно плотности тока на полосках [15]. Эти уравнения решены методом Галеркина, в котором базисные функции — полиномы Гегенбауэра [15].

Второй метод основан на численно-аналитическом методе решения объемного интегродифференциального уравнения для диэлектрических тел [16]. Неизвестными в нем являются компоненты напряженности

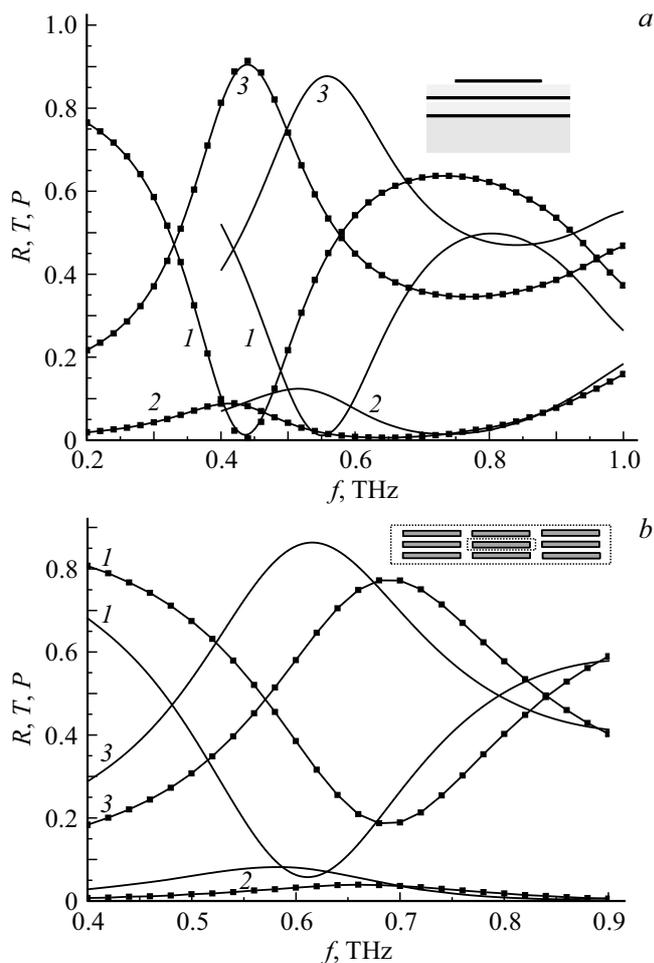


Рис. 1. Характеристики 2D-периодических решеток из квадратных графеновых полосок. *a* — для различных размеров полосок; химический потенциал $\mu = 0.25$ eV. Линии с символами — размеры полосок $A_x = A_y = 60 \mu\text{m}$, без символов — $A_x = A_y = 50 \mu\text{m}$. *b* — для различных значений химического потенциала μ ; $A_x = A_y = 50 \mu\text{m}$. Линии с символами — $\mu = 0.55$ eV, без символов — $\mu = 0.35$ eV. 1 — R , 2 — T , 3 — P . $d_x = d_y = 70 \mu\text{m}$. $h_d = 25 \mu\text{m}$, $n_d = 1.77$. Параметры графена: температура $T = 300$ К, время релаксации $\tau = 1$ ps.

электрического поля внутри диэлектрических полосок. Для интеграции графеновых слоев в программы расчета дифракционных решеток [10–12,16,17], волноводов и фотонных кристаллов [18] введены эквивалентная „диэлектрическая проницаемость“ ε_e и эквивалентная „толщина“ t_e графена

$$\varepsilon_e = 1 - \frac{Z_0(i\sigma' + \sigma'')}{kt_e},$$

где k, Z_0 — волновое число и волновое сопротивление свободного пространства, проводимость графена $\sigma = \sigma' - i\sigma''$, определяемая формулой Кубо. Параметр t_e может быть любой при условии $t_e \ll \lambda$, где λ — длина волны в вакууме. При введении ε_e, t_e мы использовали аналогию с тонким диэлектрическим слоем. Как хорошо известно, при решении электродинамических задач этот слой можно заменить бесконечно тонким импедансным слоем. При больших ε и толщине слоя $t \ll \lambda$ импеданс определяется через произведение ε на его толщину. Приравнявая импедансы диэлектрического и графенового слоя, вводим эквивалентные параметры графена. Это не значит, что графен имеет такую введенную толщину и такую диэлектрическую проницаемость. Это указывает лишь на то, что свойства графена для данного круга задач можно описать как свойства диэлектрического слоя с введенными параметрами.

Для графена в диапазоне [0.1–80] THz $\text{Re } \varepsilon < 0$. Таким образом, условие существования ППП выполняется.

Расчеты графеновых структур двумя методами расширяют круг решаемых задач электродинамики графеновых структур, позволяют перейти к решению нелинейных задач. Кроме того, расчет устройств двумя независимыми методами подтверждает достоверность теоретических результатов.

Рассмотрим некоторые результаты исследований периодических поглощающих структур: квадратных графеновых полосок (рис. 1, 2) и прямоугольных полосок (рис. 3). $R, T, P = 1 - R - T$ — соответственно коэффициенты отражения, прохождения (по мощности) и потерь. На рис. 1 и 3 приведены результаты при нормальном падении. Угол поворота плоскости падения $\varphi = 0$.

Толщины диэлектрических слоев h_d и их показатель преломления n_d влияют как на согласование, так и на положение резонанса. Они выбраны из условий минимума коэффициента отражения и максимума

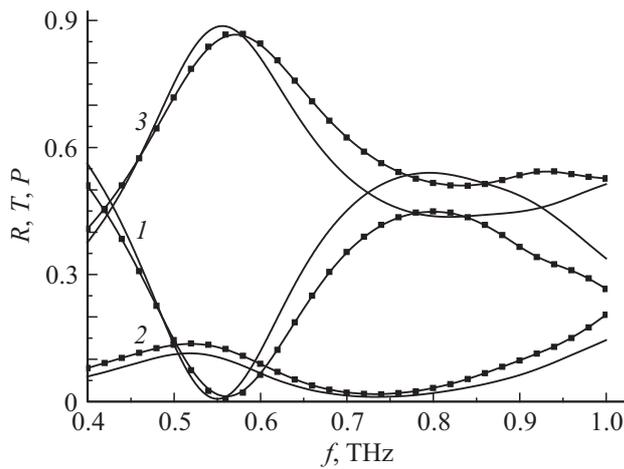


Рис. 2. Характеристики 2D-периодических решеток при угле падения 30° . $A_x = A_y = 50 \mu\text{m}$. Линии с символами — p -поляризация, без символов — s -поляризация падающей волны. Остальные параметры те же, что на рис. 1, a .

потерь. Небольшое изменение h_d на $\pm 5 \mu\text{m}$ приводит к изменению резонансной частоты приблизительно на $\mp 0.3 \text{ THz}$.

Максимум поглощения обусловлен резонансом ППП в периодической системе графеновых полосок. Поэтому резонансная частота зависит как от размера полосок (рис. 1, a), так и от параметров графена (рис. 1, a, b) и диэлектрика, на котором лежат полоски. С уменьшением показателя преломления диэлектрического слоя n_d и увеличением химического потенциала μ уменьшается длина волны ППП, поэтому резонансная частота растет. Существует оптимальное значение μ , при котором наблюдается максимум поглощения.

Следует отметить, что размер графеновых полосок составляет величину порядка 0.1λ , а толщина диэлектрических слоев приблизительно равна 0.05λ .

Эффект резонансного поглощения наблюдается в достаточно широком диапазоне углов падения θ : при $\theta = 30^\circ$ характеристики практически такие же, как и при нормальном падении (рис. 2). Следует отметить, что для квадратных графеновых полосок эффект наблюдается для обеих поляризаций падающей волны (p — $H_\uparrow = 0$, s — $E_\uparrow = 0$,

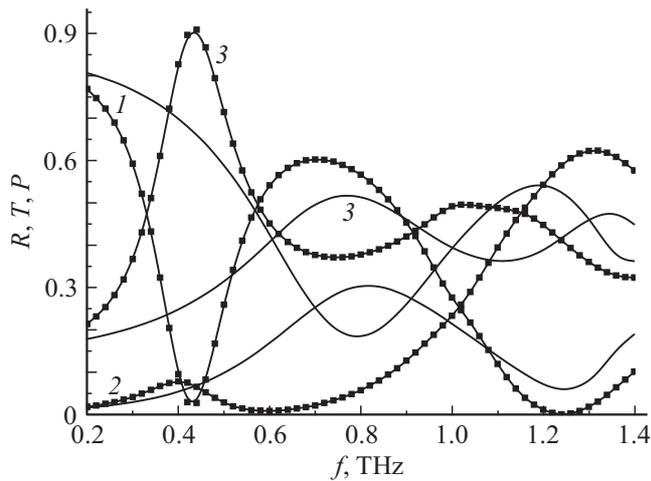


Рис. 3. Характеристики 2D-периодических решеток из прямоугольных графеновых полоск при нормальном падении волн с различной поляризацией. Линии с символами — p -поляризация, без символов — s -поляризация падающей волны. $A_x = 60 \mu\text{m}$, $A_y = 20 \mu\text{m}$, $d_x = 70 \mu\text{m}$, $d_y = 30 \mu\text{m}$. Остальные параметры те же, что на рис. 1, а.

символ „ \uparrow “ означает компоненту поля, перпендикулярную плоскости падения), причем резонансная частота слабо зависит от поляризации.

Для решетки из прямоугольных полосок можно получить эффект резонансного поглощения только для одной поляризации падающей волны (рис. 3).

При увеличении числа диэлектрических и графеновых слоев (мы теоретически исследовали структуры с двадцатью и более слоями) резонансная частота не меняется, коэффициент поглощения, естественно, возрастает.

Таким образом, из результатов математического моделирования следует, что 2D-решетка из квадратных графеновых полосок на подложке, содержащей графеновые и диэлектрические слои, является эффективным поглотителем в THz-диапазоне частот, поглощающим почти 100% падающей на нее энергии при резонансе ППП. Характеристики THz-поглотителя эффективно управляются изменением как размеров графе-

новых полосок, периода решетки и параметров диэлектрических слоев, так и значения химического потенциала μ (внешнего электрического поля) в широком интервале THz-частот.

Работа выполнена в рамках реализации базовой части госзадания (проект № 3.5398.2017/8.9).

Список литературы

- [1] Yao G., Ling F., Yue J., Luo C., Ji J., Ya J. // Opt. Express. 2016. V. 24. N 2. P. 1518–1527.
- [2] He X., Yao Y., Zhu Z., Chen M., Zhu L., Yang W., Yang Y., Wu F., Jiang J. // Opt. Mater. Express. 2018. V. 8. N 4. P. 1031–1042.
- [3] Xu Z., Wu D., Liu Y., Liu C., Yu Z., Yu L., Ye H. // Nanoscale Res. Lett. 2018. V. 13. P. 143.
- [4] Chen D., Yang J., Zhang J., Huang J., Zhang Z. // Sci. Rep. 2017. V. 7. P. 15836.
- [5] Huidobro P.A., Maier S.A., Pendry J.B. // EPJ Appl. Metamater. 2017. V. 4. P. 6 (1–5).
- [6] Mou N., Sun S., Dong H., Dong S., He Q., Zhou L., Zhang L. // Opt. Express. 2018. V. 26. N 9. P. 11728–11736.
- [7] Cen C., Chen J., Lin H., Liang C., Huang J., Chen X., Tang Y., Yi Z., Xu X. arXiv preprint arXiv: 1802.10285, 2018.
- [8] Chen J., Zeng Y., Xu X., Chen X., Zhou Z., Shi P., Yi Z., Ye X., Xiao S., Yi Y. // Nanomaterials. 2017. V. 8. N 3. P. 175.
- [9] Cui Y., He Y., Jin Y., Ding F., Yang L., Ye Y., Zhong S., Lin Y., He S. // Laser Photon. Rev. 2014. V. 8. N 4. P. 495–520.
- [10] Лерер А.М., Цветянский Е.А. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 21. С. 77–86.
- [11] Иванова И.Н., Клещенков А.Б., Лерер А.М., Махно В.В., Махно П.В., Тимошенко П.Е. // Физические основы приборостроения. 2016. Т. 5. № 5 (22). С. 90–98.
- [12] Кайдашев Е.М., Лерер А.М., Головачева Е.В., Кайдашев В.Е., Лянгузов Н.В., Цветянский Е.А. // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62. № 12. С. 1173–1183.
- [13] Голованов О.А., Макеева Г.С., Ринкевич А.Б. // ЖТФ. 2016. Т. 86. В. 2. С. 119–126.
- [14] Makeeva G.S., Golovanov O.A. // Proc. of the 45th Eur. Microwave Conf. (EuMC). Eur. Microwave Week 2015 (EuMW2015). Paris, France, 2015. P. 1155.
- [15] Лерер А.М., Иванова И.Н. // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 5. С. 435–441.

- [16] *Лерер А.М.* // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 11. С. 1160–1169.
- [17] *Кайдашев Е.М., Лянгузов Н.В., Лерер А.М., Распопова Е.А.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 7. С. 79–86.
- [18] *Lerer A.M., Donets I.V., Kalinchenko G.A., Makhno P.V.* // Photon. Res. 2014. V. 2. N 1. P. 31–37.