



УДК 621.371
doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-2-6



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Модели и выбор параметров плазмонных графеновых антенн ТГц и дальнего ИК диапазонов

Михаил Сергеевич Никитин

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
nikitin-m.s@mail.ru, Russi4nBear@yandex.ru

Галина Степановна Макеева

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

Аннотация. В программном комплексе CST Microwave Studio 2023 построены модели плазмонных графеновых антенн с возбуждением дискретным и волноводными портами падающей *TEM*-волной *S*- и *P*-поляризации. Рассчитаны характеристики прямоугольной и квадратной плазмонных графеновых антенн с диэлектрической и металлизированной подложкой: элементы матрицы рассеяния, диаграммы направленности для различных параметров графена и значений химического потенциала.

Ключевые слова: плазмонные графеновые антенны, дискретный порт, химический потенциал, элементы матрицы рассеяния

Для цитирования: Никитин М. С., Макеева Г. С. Модели и выбор параметров плазмонных графеновых антенн ТГц и дальнего ИК диапазонов // Инжиниринг и технологии. 2024. Т. 9 (2). С. 1–5. doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-2-6

Models and choice of parameters of thz and far-ir plasmonic graphene antennas

Mikhail S. Nikitin

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
nikitin-m.s@mail.ru, Russi4nBear@yandex.ru

Galina S. Makeeva

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

Abstract. Using the CST Microwave Studio 2023 models of plasmonic graphene antennas (PGA) with excitation by discrete and waveguide ports by an incident *TEM*-wave of *S*- or *P*-polarization are developed. The performances of rectangular and square PGA with dielectric and metallized substrates: elements of the scattering matrix, radiation patterns for various graphene parameters and chemical potential values are calculated.

Keywords: plasmonic graphene antennas, discrete port, chemical potential, scattering matrix elements

For citation: Nikitin M.S., Makeeva G.S. Models and choice of parameters of thz and far-ir plasmonic graphene antennas. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2024;9(2):1–5. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-2-6

Введение

В программном комплексе CST Microwave Studio 2023 [1] разработана модель плазмонной графеновой антенны (ПГА) на основе прямоугольной графеновой полоски (длиной l и шириной w) на металлизированной диэлектрической подложке (S_iO_2 , $\epsilon = 2,2$; геометрические размеры – a , b , h) с возбуждением дискретным портом (рис. 1,а). Эта модель с сосредоточенным источником возбуждающей волны использована для решения электродинамической задачи с помощью программного комплекса CST Microwave Studio 2023 методом конечного интегрирования во временной области [2]. Проведен



расчет частотных зависимостей элемента матрицы рассеяния $|S_{11}|$ на входе прямоугольной ПГА для различных значений химического потенциала μ_c (0,01–1 эВ), результаты которого представлены на рис. 1,б. Определены рабочие частоты антенны как частоты плазмонных резонансов $f_{рез}$ основной и высших мод поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) графеновой полоски [3].

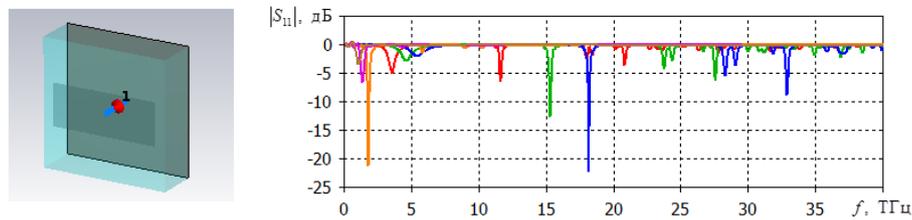


Рис. 1. Модель прямоугольной ПГА с металлизированной диэлектрической подложкой с возбуждением дискретным портом (а) и частотные зависимости элемента матрицы рассеяния $|S_{11}|$ на входе ПГА в ТГц и дальнем ИК диапазонах при изменении химического потенциала μ_c (б):

коричневый $\mu_{c1} = 0,01$ эВ, розовый $\mu_{c2} = 0,05$ эВ, оранжевый $\mu_{c3} = 0,1$ эВ, $\mu_{c4} = 0,3$ эВ, красный $\mu_{c4} = 0,4$ эВ, зеленый $\mu_{c5} = 0,7$ эВ, синий $\mu_{c6} = 1$ эВ; $l = 2,5$ мкм, $w = 1$ мкм, $a = 3$ мкм, $b = 3$ мкм, $h = 1$ мкм

Исследована зависимость частотных характеристик элемента матрицы рассеяния $|S_{11}|$ от параметра рассеяния τ графена (рис. 2). Показано, что минимальное значение $|S_{11}|$ наблюдается на резонансной частоте $f_{рез}^1$ основной моды ППП графеновой полоски при $\tau = 0,1$ пс (рис. 2).

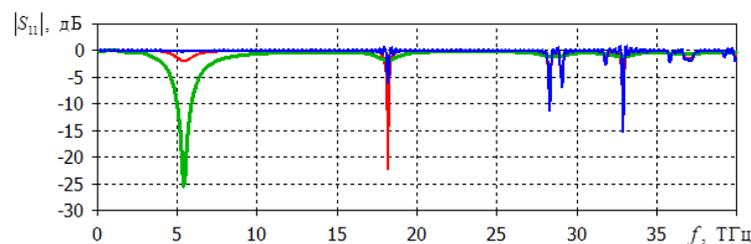


Рис. 2. Частотные зависимости элемента матрицы рассеяния $|S_{11}|$ на входе ПГА с металлизированной диэлектрической подложкой в ТГц и дальнем ИК диапазонах при изменении параметра рассеяния графена τ : зеленый $\tau = 0,1$ пс, красный $\tau = 1$ пс, синий $\tau = 10$ пс

Проведено моделирование диаграмм направленности (ДН) прямоугольной ПГА для различных значений химического потенциала μ_c на резонансных частотах $f_{рез}^1$ основной моды ППП. Результаты расчета ДН ПГА в E -плоскости при изменении μ_c в интервале (0,01–0,1 эВ) приведены на рис. 3,а, в интервале (0,4–1 эВ) – на рис. 3,б.

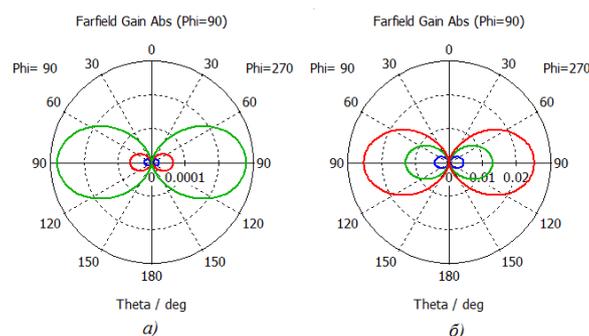


Рис. 3. Диаграммы направленности прямоугольной ПГА с металлизированной диэлектрической подложкой в E -плоскости ($\varphi = 90^\circ$) в полярной системе координат при изменении химического потенциала μ_c :



a – синий $\mu_{c1} = 0,01$ эВ $f_{рез1}^1 = 1,1$ ТГц, красный $\mu_{c2} = 0,05$ эВ $f_{рез2}^1 = 1,38$ ТГц, зеленый $\mu_{c3} = 0,1$ эВ $f_{рез3}^1 = 1,82$ ТГц, b – синий $\mu_{c4} = 0,4$ эВ $f_{рез4}^1 = 3,57$ ТГц, зеленый $\mu_{c5} = 0,7$ эВ $f_{рез5}^1 = 4,6$ ТГц, красный $\mu_{c6} = 1$ эВ $f_{рез6}^1 = 5,4$ ТГц

Из результатов моделирования (см. рис. 3) следует, что при увеличении значений химического потенциала μ_c в интервале (0,01–0,1 эВ) коэффициент усиления ПГА значительно изменяется.

На рис. 4 приведены модель с возбуждением дискретным портом (рис. 4,*a*) и результаты расчёта частотной зависимости элемента матрицы рассеяния $|S_{11}|$ (рис. 4,*б*) и ДН (рис. 4,*в,з,д*) квадратной ПГА, а также распределения вектора плотности поверхностного электрического тока j_s на графеновом элементе (рис. 4,*e*) на резонансной частоте основной моды ППП $f_{рез}^1 = 4,21$ ТГц, при $\mu_c = 1$ эВ.

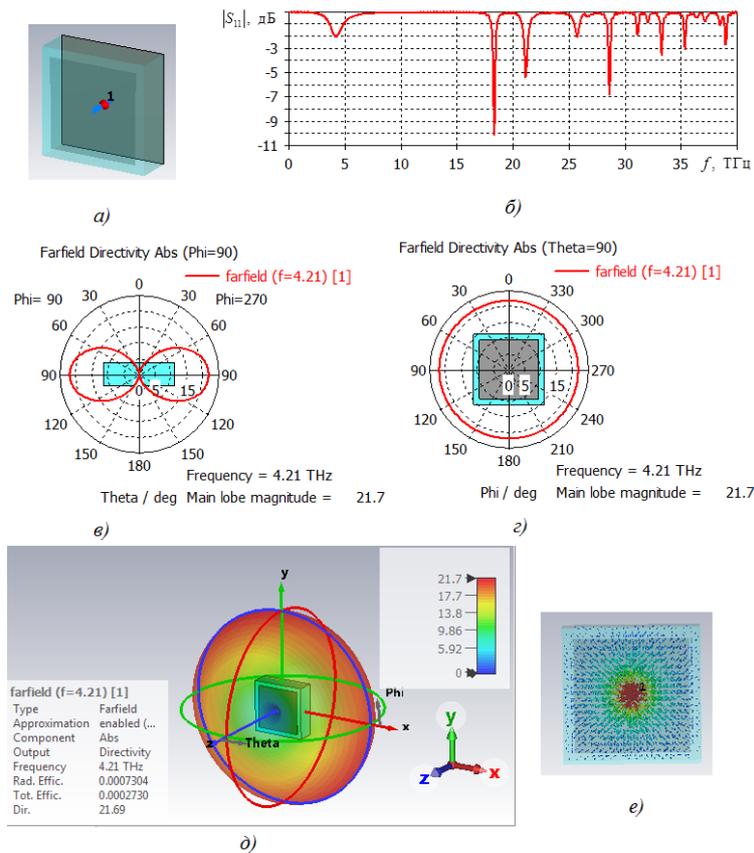


Рис. 4. Модель квадратной ПГА на металлизированной диэлектрической подложке (*a*); частотная зависимость элемента матрицы рассеяния $|S_{11}|$ в ТГц и дальнем ИК диапазонах при $\mu_c = 1$ эВ (*б*); 2D ДН в полярной системе координат в H -плоскости ($\theta = 90^\circ$) (*в*); E -плоскости ($\varphi = 90^\circ$) (*з*); 3D ДН в сферической системе координат (*д*) $f_{рез}^1 = 5,4$ ТГц, при $\mu_c = 1$ эВ, и распределение вектора j_s на квадратной графеновой полоске (*e*);

$$l = w = 2,5 \text{ мкм}, a = 3 \text{ мкм}, b = 3 \text{ мкм}, h = 1 \text{ мкм}$$

Недостатком модели ПГА с возбуждением дискретным портом является невозможность исследования характеристик антенны в зависимости от поляризации возбуждающей волны.

В программном комплексе CST Microwave Studio 2023 разработаны модели прямоугольных ПГА с диэлектрической подложкой с возбуждением волноводным портом падающей TEM -волной s - и p -поляризации (рис. 5). Рисунок 5,*a* демонстрирует ориентацию вектора напряженности электрического поля E падающей TEM -волны относительно графеновой полоски: вектор E параллелен полоске при s -поляризации и перпендикулярен при p -поляризации. Эти модели с возбуждением волноводным портом использованы для решения электродинамической задачи с помощью программного комплекса CST Microwave Studio 2023 методом конечного интегрирования во временной области [3].



Результаты расчета частотных зависимостей элемента матрицы рассеяния $|S_{12}|$ на входе прямоугольной ПГА при возбуждении падающей TEM -волной s - и p -поляризации для различных значений химического потенциала μ_c представлены на рис. 5, в, з. Резонансные частоты $f_{рез}$, определяемые плазмонными резонансами мод графеновой полоски, зависят от поляризации падающей TEM -волны (рис. 5, в, з), так как плазмонные резонансы определяются числом стоячих полувольт ППП по широкой стороне графеновой полоски для s -поляризации, а для p -поляризации – по узкой [3].

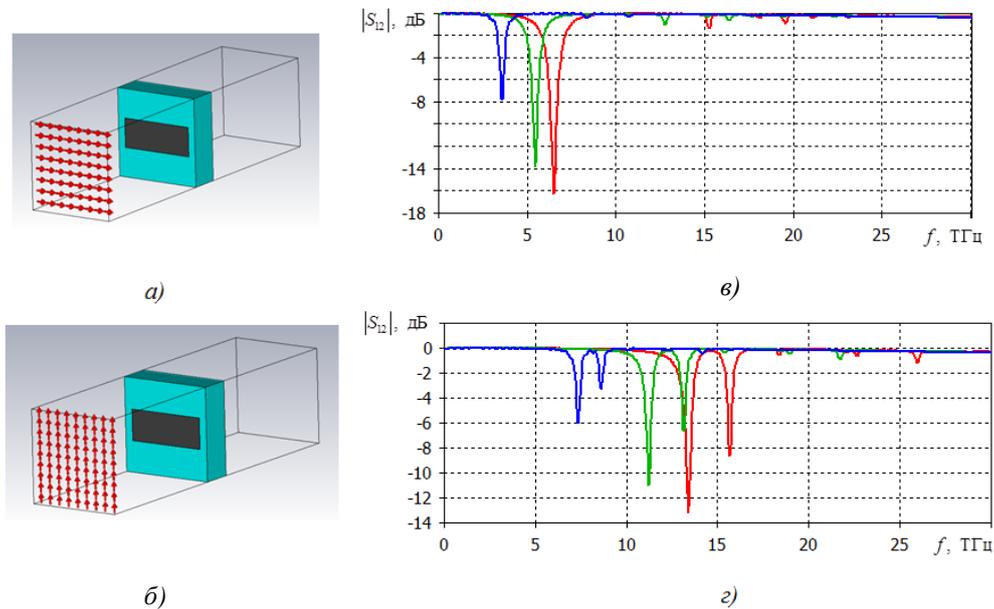


Рис. 5. Модели прямоугольных ПГА с диэлектрической подложкой с возбуждением волноводным портом падающей TEM -волной s -поляризации (а), p -поляризации (б); частотные зависимости элемента матрицы рассеяния $|S_{12}|$ в ТГц и дальнем ИК диапазонах при изменении химического потенциала μ_c : синий $\mu_{c1} = 0,3$ эВ, зеленый $\mu_{c2} = 0,7$ эВ, красный $\mu_{c3} = 1$ эВ для s -поляризации (в) и p -поляризация (з)

На рис. 6.1, 6.2 приведены результаты моделирования ДН ПГА с диэлектрической и распределения вектора плотности поверхностного электрического тока j_s на графеновом элементе на резонансных частотах основной моды ППП при s -поляризация $f_{рез1}^s = 6,62$ ТГц (рис. 6,а) и p -поляризации $f_{рез1}^p = 13,39$ ТГц (рис. 6,б) для $\mu_c = 1$ эВ.

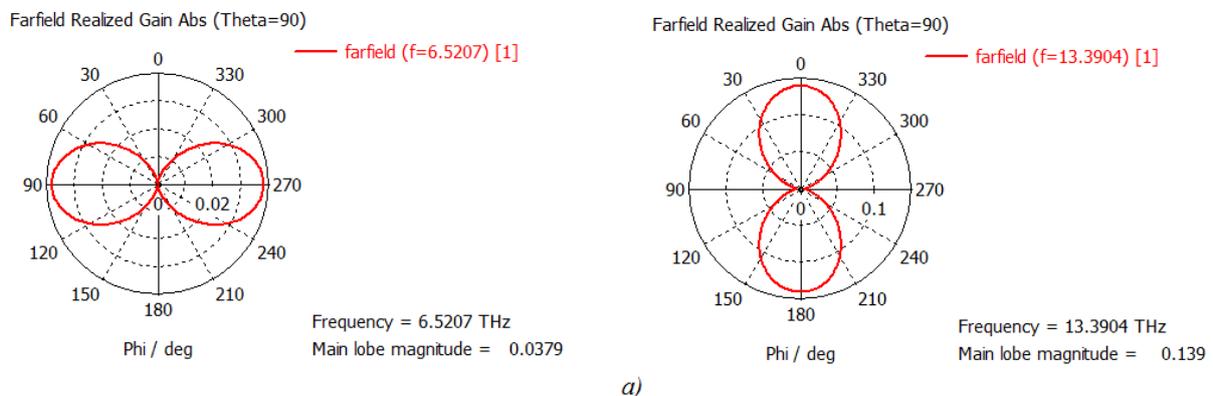


Рис. 6. Диаграммы направления прямоугольной ПГА с диэлектрической подложкой на частоте $f_{рез1}^s = 6,62$ ТГц при s -поляризация (6.1) и $f_{рез1}^p = 13,39$ ТГц при p -поляризация (6.2): 2D ДН в полярной системе координат в H -плоскости ($\theta = 90^\circ$) (а) и E -плоскости ($\varphi = 90^\circ$) (б); 3D ДН в сферической системе координат (в) и распределение вектора j_s на графеновой полоске (з) (начало)

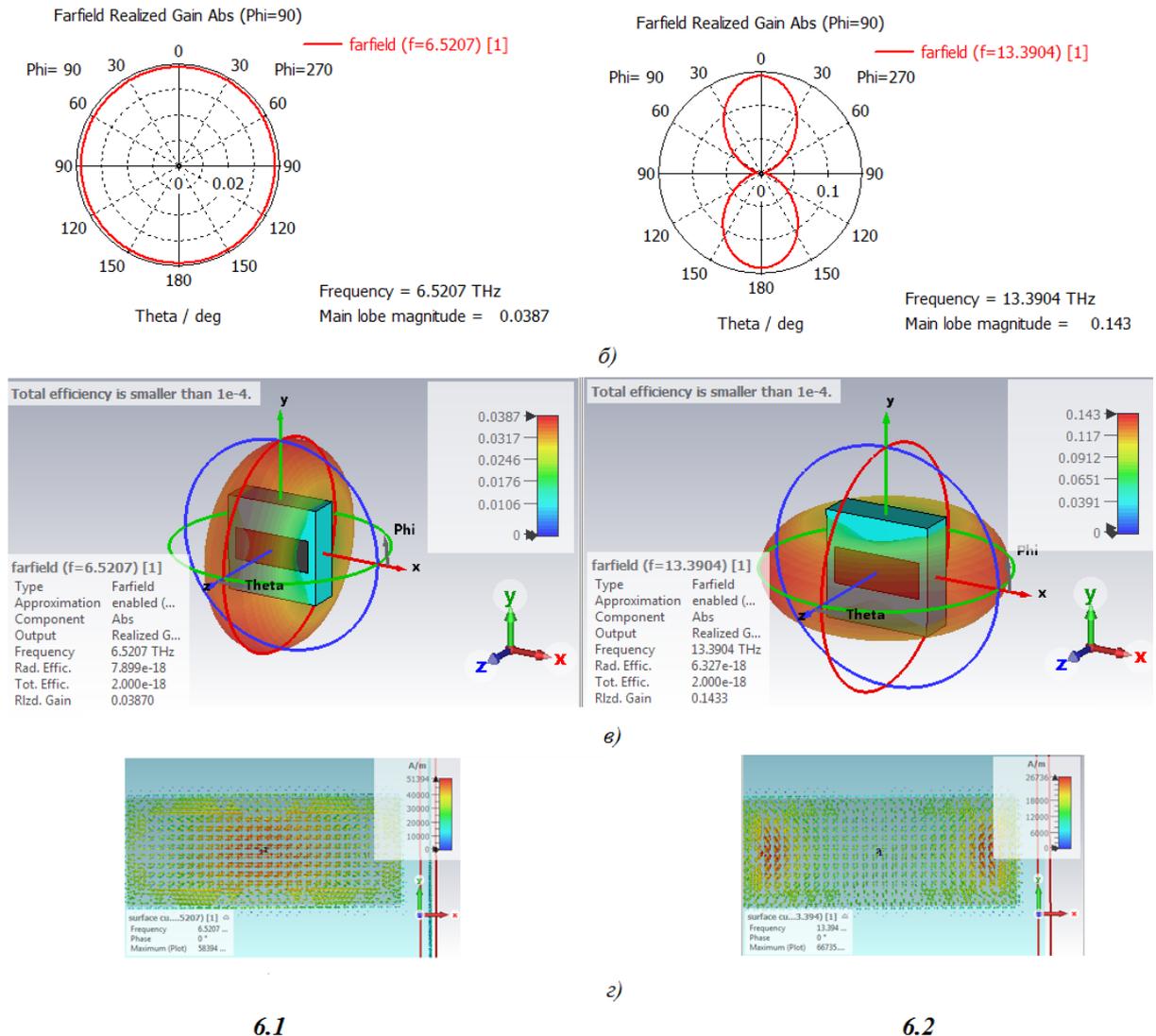


Рис. 6. Окончание

Таким образом, показана управляемость характеристик ПГА и поляризации излучения в зависимости от выбора параметров графена и химического потенциала (при приложении внешнего электрического поля), а также геометрии антенны и типа подложки в ТГц и дальнем ИК диапазонах частот.

Список литературы

1. CST Microwave Studio 2023. URL: <https://www.3ds.com/products/simulia>
2. Курушин А. А. Школа проектирования СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE. М. : One-Book, 2014. 433 с.
3. Макеева Г. С., Голованов О. А. Математическое моделирование электронноуправляемых устройств терагерцового диапазона на основе графена и углеродных нанотрубок. Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. 304 с.

References

1. CST Microwave Studio 2023. Available at: <https://www.3ds.com/products/simulia>
2. Kurushin A.A. *Shkola proektirovaniya SVCh ustrojstv v CST STUDIO SUITE = Microwave Device Design School in CST STUDIO SUITE*. Moscow: One-Book, 2014:433. (In Russ.)
3. Makeeva G.S., Golovanov O.A. *Matematicheskoe modelirovanie jelektronnoupravljaemyh ustrojstv teragercovogo diapazona na osnove grafena i uglerodnyh nanotrubok = Mathematical modeling of electronically controlled terahertz devices based on graphene and carbon nanotubes*. Penza: Izd-vo PGU, 2018:304. (In Russ.)

Поступила в редакцию / Received 18.03.2024

Принята к публикации / Accepted 18.04.2024