



УДК 535.372
doi:10.21685/2587-7704-2021-6-2-6



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Модели и характеристики электронноуправляемых плазмонных наноантенн терагерцового диапазона на основе графена

Андрей Александрович Сарайкин

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
Saraykin977@mail.ru

Галина Степановна Макеева

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

Аннотация. Проведено моделирование характеристик (элемента S_{11} матрицы рассеяния и диаграмм направленности (ДН)) плазмонных графеновых наноантенн и фазированных антенных решеток (ФАР) из графеновых элементов прямоугольной геометрии в зависимости от числа излучателей для различных значений химического потенциала в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот с помощью пакета прикладных программ CST Studio Suite. Показана возможность управляемости их характеристик при изменении химического потенциала (внешнего электрического поля) на ТГц частотах плазмонного резонанса: изменение направления главного лепестка ДН и уменьшение его ширины по уровню половинной мощности $\Theta_{0,5}$, а также уменьшение уровня боковых лепестков.

Ключевые слова: плазмонные наноантенны, графен, терагерцовый диапазон частот, плазмонный резонанс

Для цитирования: Сарайкин А. А., Макеева Г. С. Модели и характеристики электронноуправляемых плазмонных наноантенн терагерцового диапазона на основе графена // Инжиниринг и технологии. 2021. Т. 6(2). С. 1–5. doi:10.21685/2587-7704-2021-6-2-6

Models and characteristics of electronically controlled graphene-based terahertz plasmonic nanoantennas

Andrey A. Saraykin

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
Saraykin977@mail.ru

Galina S. Makeeva

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

Abstract. Modeling of characteristics, namely, S_{11} element of the scattering matrix and radiation patterns (RP) for plasmonic graphene nanoantennas and graphene-assembled rectangular phased antenna arrays (PAA) depending on the number of emitters for different values of the chemical potential in the terahertz (THz) frequency range using CST Studio Suite software was carried out. Controllability of their characteristics with a change in the chemical potential (external electric field) at THz frequencies of plasmon resonance is shown: a change in the direction of the RP main lobe, a decrease in its width at the half-power level $\Theta_{0,5}$, and a decrease in the level of side lobes.

Keywords: plasmonic nanoantennas, graphene, terahertz frequency range, plasmon resonance

For citation: Saraykin A.A., Makeeva G.S. Models and characteristics of electronically controlled graphene-based terahertz plasmonic nanoantennas. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2021;6(2):1–5. (In Russ.). doi:10.21685/2587-7704-2021-6-2-6



Введение

Объектом исследования являются плазмонные графеновые наноантенны и фазированные антенные решетки (ФАР) из графеновых элементов для применения в системах передачи информации терагерцового диапазона частот. В таких наноантеннах слой графена используется в качестве элемента для управления характеристиками излучения и электронной перестройки по частоте за счет изменения уровня Ферми (химического потенциала) при приложении напряжения смещения [1–3]. В терагерцовом и инфракрасном диапазонах частот графен поддерживает плазмонные колебания – поверхностные плазмон-поляритоны (ППП), которые позволяют значительно увеличить сильно локализованное поле и вызывают перестраиваемые плазмонные резонансы [2].

Цель данной работы – моделирование характеристик (элемента S_{11} матрицы рассеяния и ДН) плазмонных графеновых наноантенн и ФАР из графеновых элементов в зависимости от числа излучателей и их управляемости при изменении химического потенциала (внешнего электрического поля) с помощью пакета прикладных программ CST Studio Suite.

1. Результаты моделирования характеристик плазмонной графеновой наноантенны прямоугольной геометрии

С помощью пакета прикладных программ CST Studio Suite 2019 [4] выполнено моделирование характеристик одиночного излучателя ФАР-плазмонной наноантенны на основе графена прямоугольной геометрии (с размерами $w = 6$ мкм, $l = 18$ мкм) на подложке SiO_2 (толщина подложки $h = 0,5$ мкм, диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2,2$) (с размерами $a = b = 25$ мкм) в терагерцовом диапазоне частот.

Результаты расчета частотных зависимостей элемента матрицы рассеяния $|S_{11}|$, т.е. коэффициента отражения на входе плазмонной наноантенны для различных значений химического потенциала μ_c (0–1 эВ) в диапазоне частот $f = 0,5$ –10 ТГц, представлены на рис. 1.

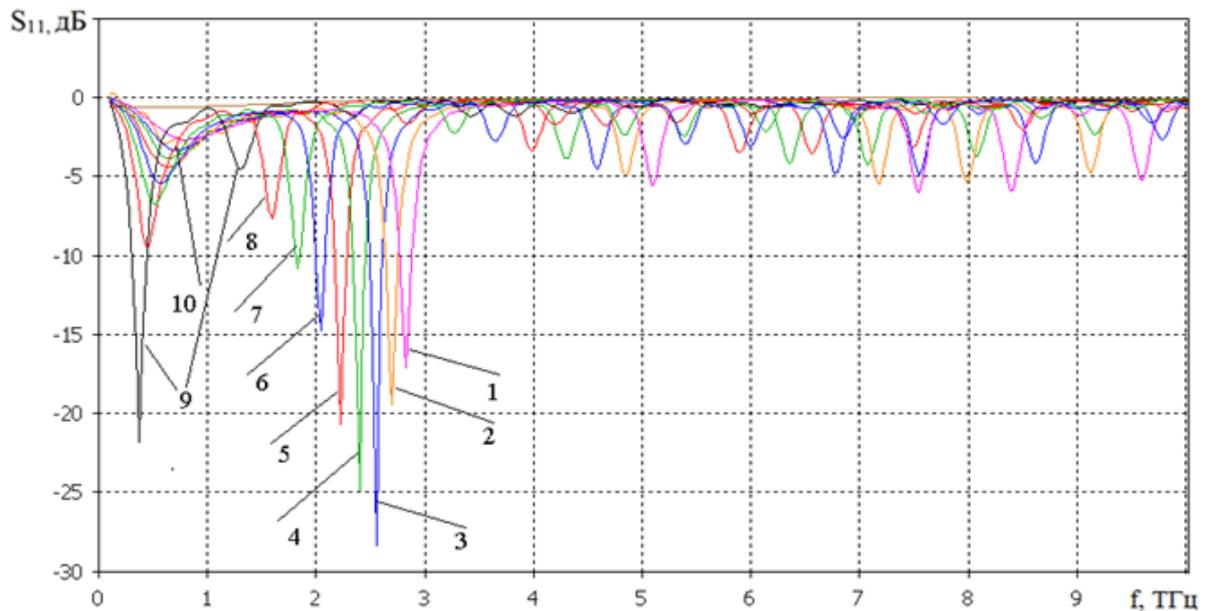


Рис. 1. Частотные зависимости элемента матрицы рассеяния $|S_{11}|$ плазмонной графеновой антенны прямоугольной геометрии для различных значений химического потенциала μ_c : 1 – $\mu_c = 1$ эВ, 2 – 0,9 эВ, 3 – 0,8 эВ, 4 – 0,7 эВ, 5 – 0,6 эВ, 6 – 0,5 эВ, 7 – 0,4 эВ, 8 – 0,3 эВ, 9 – 0,2 эВ, 10 – 0 эВ; $a = b = 25$ мкм, $l = 18$ мкм, $w = 6$ мкм

Из полученных зависимостей (рис. 1) следует, что имеются минимумы коэффициента отражения $|S_{11}|$, при которых коэффициент прохождения максимален и, следовательно, максимальна эффективность излучения антенны на определенных частотах, которые являются рабочими. Эти частоты определяются резонансами основной и высших ППП модами в прямоугольном графеновом элементе и увеличиваются при возрастании химического потенциала. Минимальное значение коэффициента отражения -28 дБ при $\mu_c = 0,8$ эВ соответствует резонансу основной ППП моды (см. рис. 1).



2. Результаты моделирования характеристик и управляемости фазированных антенных решеток из графеновых элементов прямоугольной геометрии

С помощью пакета прикладных программ CST Studio Suite 2019 проведено моделирование ФАР из прямоугольных графеновых элементов для числа излучателей $N = 16, 64, 256$ в диапазоне частот 0,5–10 ТГц для различных значений химического потенциала μ_c . Результаты моделирования ДН ФАР (прямоугольные графеновые элементы $w = 6$ мкм, $l = 18$ мкм на подложке SiO_2 , период решетки $a = b = 25$ мкм) для различных μ_c приведены на рис. 2.

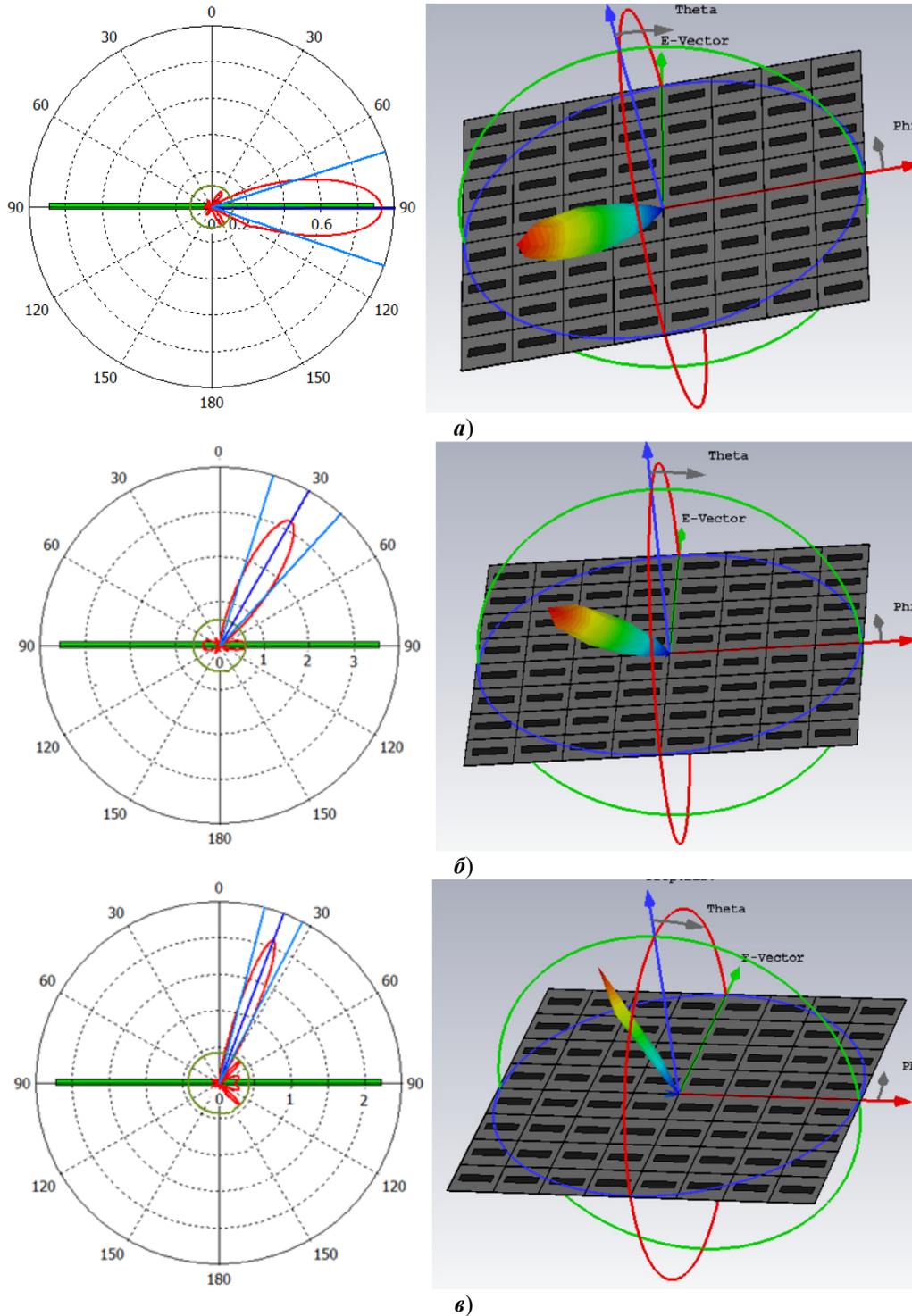


Рис. 2. ДН ФАР из прямоугольных графеновых элементов ($N = 64$) для различных значений химического потенциала μ_c в полярной и сферической системах координат: $w = 6$ мкм, $l = 18$ мкм; $a = b = 25$ мкм; **а)** $\mu_c = 0,2$ эВ, $f = 0,3691$ ТГц, направление главного лепестка 88 град., $\Theta_{0,5} = 37$ град., уровень боковых лепестков $-16,9$ дБ; **б)** $\mu_c = 0,8$ эВ, $f = 2,5518$ ТГц, 30 град., $\Theta_{0,5} = 30,6$ град., -18 дБ; **в)** $\mu_c = 1$ эВ, $f = 2,8209$ ТГц, 25,5 град., $\Theta_{0,5} = 19,2$ град., $-17,2$ дБ



Результаты моделирования ДН ФАР ($N = 256$) при различных значениях химического потенциала μ_c приведены на рис. 3.

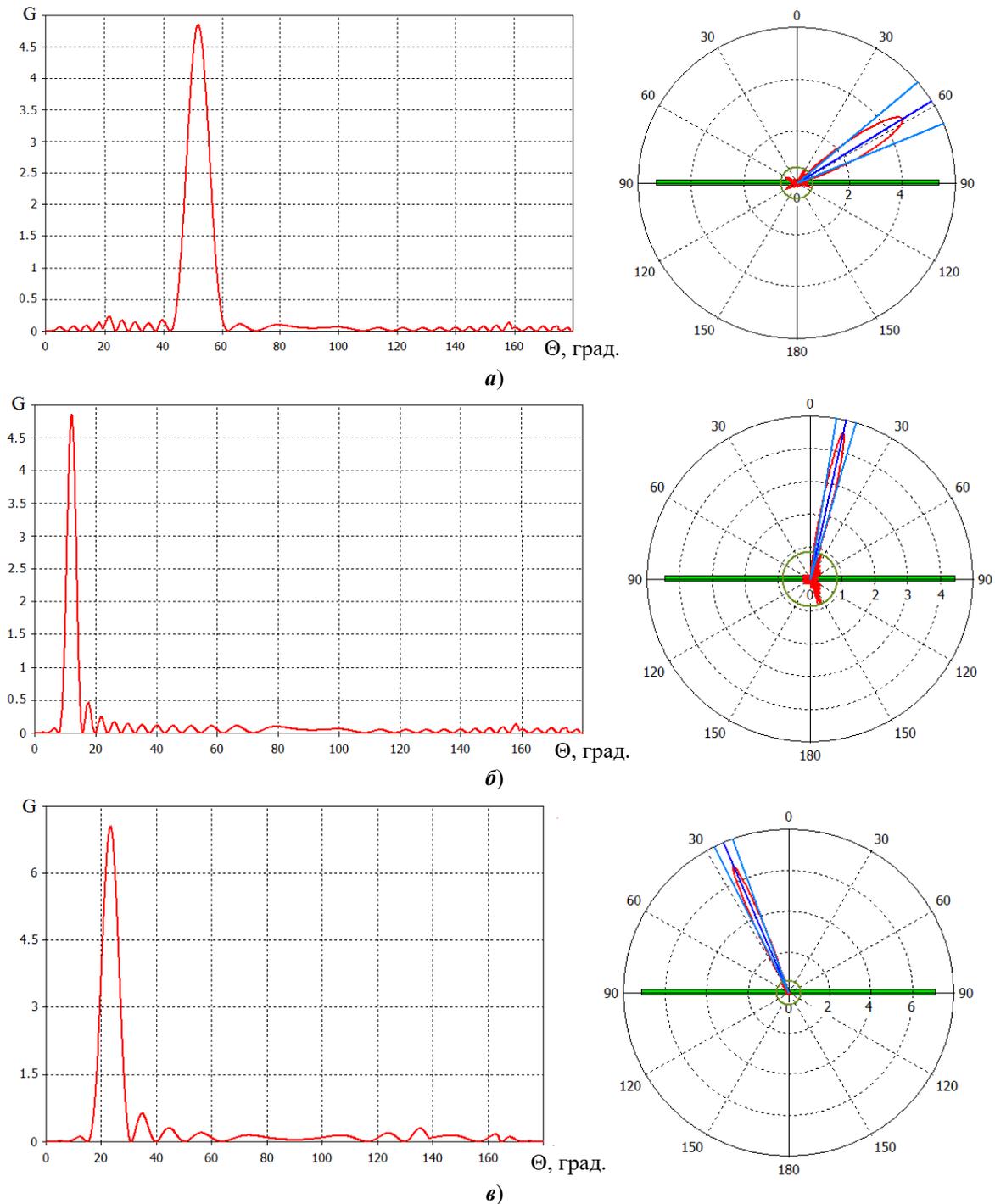


Рис. 3. ДН ФАР из прямоугольных графеновых элементов ($N = 256$) в декартовой и полярной системах координат: $w = 6$ мкм, $l = 18$ мкм; $a = b = 25$ мкм; а) $\mu_c = 0,2$ эВ, $f = 0,3691$ ТГц, направление главного лепестка 58 град., $\Theta_{0,5} = 12$ град., уровень боковых лепестков $-9,5$ дБ; б) $\mu_c = 0,8$ эВ, $f = 2,5518$ ТГц, 12,7 град., $\Theta_{0,5} = 7,2$ град., $-8,4$ дБ; в) $\mu_c = 1$ эВ, $f = 2,8209$ ТГц, 23,4 град., $\Theta_{0,5} = 5,9$ град., $-19,7$ дБ

С увеличением числа излучателей уровень боковых лепестков ДН изменяется: -18 дБ ($N = 64$), $-8,4$ дБ ($N = 256$), $\Theta_{0,5}$ уменьшается: 30,6 град. ($N = 64$), 7,2 град. ($N = 256$) (рис. 2,б и 3,б). Направление главного лепестка ДН при изменении значений химического потенциала $\mu_c = 0-1$ эВ изменяется в пределах от 90,5 град. до 25,5 град. ($N = 256$), от 90,8 град. до 23,4 град. ($N = 64$) (см. рис. 2, 3). Максимальные значения уровня главного лепестка на частоте $f = 2,5518$ ТГц при $\mu_c = 0,8$ эВ (см. рис. 2,б и 3,б), когда коэффициент отражения S_{11} минимальный (см. рис. 1) и эффективность излучения воз-



растает. Из результатов моделирования следует, что с увеличением химического потенциала происходит уменьшение ширины ДН по уровню половинной мощности $\Theta_{0,5}$ главного лепестка ДН, уменьшение уровня боковых лепестков, а также изменение направления главного лепестка ДН, причем с увеличением числа излучателей ФАР изменение направления более существенно относительно первоначального значения.

Таким образом, характеристики плазмонных графеновых наноантенн и в особенности ФАР из графеновых элементов управляются с помощью изменения значений химического потенциала (приложения внешнего электрического поля), т.е. являются электронноуправляемыми в терагерцовом диапазоне частот и могут служить основой микроминиатюризации антенн для применений в системах передачи информации ТГц диапазона.

Список литературы

1. Голованов О. А., Макеева Г. С., Ринкевич А. Б. Взаимодействие электромагнитных волн с периодическими решетками микро- и нанолент графена в терагерцовом диапазоне // Журнал технической физики. 2016. Т. 86, вып. 2. С. 119–126.
2. Макеева Г. С., Голованов О. А. Математическое моделирование электронноуправляемых устройств терагерцового диапазона на основе графена и углеродных нанотрубок : монография. Пенза: Изд-во ПГУ, 2018. 304 с.
3. Ullah Z., Witjaksono G., Nawi I., Tansu N., Irfan Khattak M., Junaid M. A Review on the Development of Tunable Graphene Nanoantennas for Terahertz Optoelectronic and Plasmonic Applications // Sensors. 2020. P. 20.
4. CST STUDIO SUITE 2021 - моделирование трехмерных электромагнитных структур. URL: http://www.eurointech.ru/eda/microwave_design/cst/CST-STUDIO-SUITE.phtml

References

1. Golovanov O.A., Makeeva G.S., Rinkevich A.B. Interaction of terahertz electromagnetic waves with periodic gratings of graphene micro- and nanoribbons. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Journal of Technical Physics*. 2016;86(2):119–126. (In Russ.)
2. Makeeva G.S., Golovanov O.A. *Matematicheskoe modelirovanie elektronno upravlyаемых ustroystv terahertzovogo diapazona na osnove grafena i uglerodnykh nanotrubok: monografiya = Mathematical modeling of electronically controlled terahertz devices based on graphene and carbon nanotubes*. Penza: Izd-vo PGU, 2018:304. (In Russ.)
3. Ullah Z., Witjaksono G., Nawi I., Tansu N., Irfan Khattak M., Junaid M. A Review on the Development of Tunable Graphene Nanoantennas for Terahertz Optoelectronic and Plasmonic Applications. *Sensors*. 2020:20.
4. *CST STUDIO SUITE 2021 - modelirovanie trekhmernykh elektromagnitnykh struktur = CST STUDIO SUITE 2021 - modeling of three-dimensional electromagnetic structures*. (In Russ.). Available at: http://www.eurointech.ru/eda/microwave_design/cst/CST-STUDIO-SUITE.phtml

Поступила в редакцию / Received 15.05.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 25.06.2021

Принята к публикации / Accepted 03.07.2021