

УДК 621.371.334:537.874.6

doi: 10.21685/2072-3040-2023-1-9

Электронное управление лучом и частотное сканирование графеновых антенных решеток в терагерцовом и дальнем инфракрасном диапазонах частот

Н. Н. Нефедов¹, Г. С. Макеева²^{1,2}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия¹nikita.nefyodow@mail.ru, ²radiotech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью данной работы является моделирование характеристик (элемента матрицы рассеяния $|S_{11}|$ и 2D-, 3D-диаграмм направленности (ДН)) фазированных антенных решеток (ФАР) из элементов нанолент на основе графена с различным числом излучателей ($N = 16; 64; 256$) и их управляемости при изменении химического потенциала (приложения внешнего электрического поля) в терагерцовом и дальнем инфракрасном диапазонах частот с помощью пакета прикладных программ CST Studio Suite 2021. *Материалы и методы.* С помощью пакета прикладных программ CST Studio Suite 2021 проведено моделирование характеристик (матрицы рассеяния и 2D-, 3D-ДН) графеновой антенны и ФАР из элементов графеновых нанолент с различным числом излучателей ($N = 16; 64; 256$) и управляемости ФАР от значения химического потенциала ($\mu_c = 0,3; 0,7; 1$ эВ) в диапазоне частот $f = 6\text{--}40$ ТГц. *Результаты.* Как следует из результатов электродинамического моделирования, изменение химического потенциала графена приводит к изменениям характеристик ФАР – ширины ДН главного лепестка по уровню половинной мощности $\Theta_{0,5}$ и амплитуды, уровня боковых лепестков ДН, а также направления главного лепестка ДН и рабочих частот. *Выводы.* ФАР из элементов прямоугольных графеновых нанолент являются электрически управляемыми с частотным сканированием путем изменения химического потенциала μ_c (при приложении внешнего электрического поля) в терагерцовом, дальнем и среднем инфракрасном диапазонах частот.

Ключевые слова: фазированные антенные решетки, графен, дальний инфракрасный диапазон частот, плазмонный резонанс

Для цитирования: Нефедов Н. Н., Макеева Г. С. Электронное управление лучом и частотное сканирование графеновых антенных решеток в терагерцовом и дальнем инфракрасном диапазонах частот // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2023. № 1. С. 105–114. doi: 10.21685/2072-3040-2023-1-9

Electronic beam control and frequency scanning of graphene antenna arrays in the terahertz and far infrared frequency ranges

N.N. Nefedov¹, G.S. Makeeva²^{1,2}Penza State University, Penza, Russia¹nikita.nefyodow@mail.ru, ²radiotech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The purpose of this work is to model the characteristics (the scattering matrix element $|S_{11}|$ and 2D-, 3D radiation patterns (RP)) of phased antenna arrays of graphene-based nanoribbon elements with a different number of emitters ($N = 16; 64; 256$)

and its controllability under changing the chemical potential (application of an external electric field) in the terahertz (THz) and far infrared ranges (FIR) using the CST Studio Suite 2021 application software package. *Materials and methods.* The characteristics (scattering matrix and 2D-, 3D RP) of a graphene antenna and headlights from graphene nanoribbon elements with a different number of emitters ($N = 16; 64; 256$) and the controllability of the headlights from the value of the chemical potential ($\mu_c = 0.3; 0.7; 1$ eV) in the frequency range were simulated $f = 6\text{--}40$ THz by using the CST Studio Suite 2021 application software package. *Results.* As follows from the results of electrodynamic modeling, a change in the chemical potential of graphene leads to changes in the characteristics of the headlights – the width of the bottom of the main lobe at the level of half power $\Theta_{0.5}$ and amplitude, the level of the side lobes of the bottom, as well as the direction of the main lobe of the bottom and operating frequencies. *Conclusions.* Phased antenna arrays made of rectangular graphene nanoribbon elements are electrically controlled with frequency scanning by changing the chemical potential of μ_c (application of an external electric field) in the THz far and middle FIR frequency ranges.

Keywords: phased array antennas, graphene, far infrared frequency range, plasmon resonance

For citation: Nefedov N.N., Makeeva G.S. Electronic beam control and frequency scanning of graphene antenna arrays in the terahertz and far infrared frequency ranges. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences*. 2023;(1):105–114. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3040-2023-1-9

Введение

Беспрецедентный рост объема данных, которыми обмениваются беспроводные системы и устройства, и появление высококачественных услуг беспроводной связи повысили спрос на расширение полосы пропускания частот и повышение скорости передачи данных. Это стимулировало переход беспроводных сетей к использованию несущих волн с более высокими частотами несущих, выходящими за пределы миллиметрового диапазона волн, для сбора и передачи данных, которые могут обеспечить более широкую полосу пропускания и более высокие скорости передачи. Развитие технологий терагерцового (ТГц) и инфракрасного (ИК) диапазонов частот рассматривается как один из самых перспективных вариантов, позволяющих будущим поколениям мобильных сетей беспроводной связи (системы связи 6G) удовлетворить потребности современных приложений и систем многопользовательской связи, где требуется быстрое переключение между несколькими абонентами и передача больших объемов информации [1].

Разработка систем связи в ТГц-диапазоне (0,1–10 ТГц) является сложной задачей, поскольку ТГц-волны имеют значительные потери при распространении вследствие молекулярного поглощения, что приводит к высоким требованиям для высоконаправленных антенн [2].

ТГц-технологии недавно стали весьма востребованным научным инструментом для широкого спектра применений [3], таких как медицинская визуализация [4, 5], биологическое зондирование [6, 7] и молекулярная спектроскопия [8], в которых высокая пропускная способность, простота дизайна и низкие требования к энергопотреблению особенно важны.

Благодаря чрезвычайно высокой пропускной способности ТГц-диапазона, варьирующейся от десятков до тысяч гигагерц в зависимости от расстоя-

нения передачи сигнала, одним из наиболее потенциально значимых применений ТГц-технологий является беспроводная связь.

Для применения систем ТГц- и ИК-диапазонов частот в беспроводной связи, медицине, установках для дистанционного зондирования Земли требуется способность к очень быстрой перестройке системы для излучения и приема волн различных поддиапазонов частот, чтобы увеличить пропускную способность систем связи и свести к минимуму помехи от других источников. Одним из решений этой задачи является использование электрически управляемых фазированных антенных решеток (ФАР) на основе графена [9–11].

В последние десятилетия практические применения графена в области сверхвысоких частот, ТГц- и дальнего, среднего ИК-диапазонов достигли небывалых масштабов. Фильтры, модуляторы, поляризаторы, поглотители, фазовращатели, резонаторы, транзисторы, а также ФАР на основе графена стали неотъемлемой и самой исследуемой частью ТГц- и ИК-техники [12].

Графен является особенно перспективным материалом для использования в перестраиваемых ФАР благодаря высокой проводимости, присущей ему высокой скорости перестройки при изменении химического потенциала (воздействии внешнего электрического поля), а также незначительному скин-эффекту [2].

Поверхностная проводимость графена определяется из формулы Кубо [13]:

$$\sigma_s(\omega, \mu_c) = \frac{-ie^2 k_b T}{\pi \hbar^2 (\omega - i2\Gamma)} \left(\frac{\mu_c}{k_b T} + 2 \ln \left(\exp \left(\frac{-\mu_c}{k_b T} \right) + 1 \right) \right) - \frac{ie^2 (\omega - i2\Gamma)}{\pi \hbar^2} \int_0^\infty \frac{\left(\exp \left(\frac{-\xi - \mu_c}{k_b T} \right) + 1 \right)^{-1} - \left(\exp \left(\frac{\xi - \mu_c}{k_b T} \right) + 1 \right)^{-1}}{(\omega - i2\Gamma)^2 - \left(\frac{2\xi}{\hbar} \right)^2} d\xi, \quad (1)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; $k_b = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-19}$ – приведенная постоянная Планка; $T = 300$ К – температура; $\Gamma = 10^{12}$ 1/с – скорость релаксации; $\mu_c = 0-1$ эВ – химический потенциал ($1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Дж); $\omega = 2\pi f$ – частота.

В графене в ТГц- и ИК-диапазонах могут распространяться поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) [14]. В отличие от коллективных колебаний электронов, в благородных металлах ППП в графене демонстрируют сильную локализацию и низкие потери в ТГц- и дальнем, среднем ИК-диапазонах частот. Благодаря сильному взаимодействию ТГц-волн с графеном он может быть использован в качестве мегаатома (наноантенны) в метаповерхностях для достижения эффективной манипуляции волновым фронтом.

Управляя напряжением смещения или химическим легированием, можно эффективно регулировать химический потенциал (уровень Ферми) графена, с помощью которого можно управлять оптическими свойствами при

высокой зависимости поверхностной проводимости графена (1) от уровня Ферми.

На сегодня перестраиваемые антенны и ФАР на основе графена широко исследуются [9–11]. Например, антенна Яги-Уда является потенциальной структурой для проектирования реконфигурируемых многолучевых ТГц-антенн [15]. Путем изменения химического потенциала графена можно добиться изменения диаграммы направленности (ДН) антенн, т.е. реализовать электронное управление лучом в очень широком интервале углов, чего нельзя достичь ни с каким другим материалом.

Таким образом, графен является идеальной платформой для реализации перестраиваемых по частоте электрически реконфигурируемых устройств и антенн ТГц- и дальнего, среднего ИК-диапазонов частот.

Материалы и методы

Расчет характеристик одиночного излучателя – плазмонной графеновой антенны

На первом этапе проведено моделирование характеристик одиночного излучателя на основе прямоугольной графеновой наноленты на диэлектрической подложке из двуокиси кремния SiO_2 в дальнем и среднем ИК-диапазонах частот.

Результаты расчета частотных зависимостей элемента матрицы рассеяния $|S_{11}|$, т.е. коэффициента отражения на входе излучателя, для различных значений химического потенциала μ_c (0,3; 0,7; 1 эВ) в диапазоне частот $f = 6\text{--}40$ ТГц представлены на рис. 1 и в табл. 1.

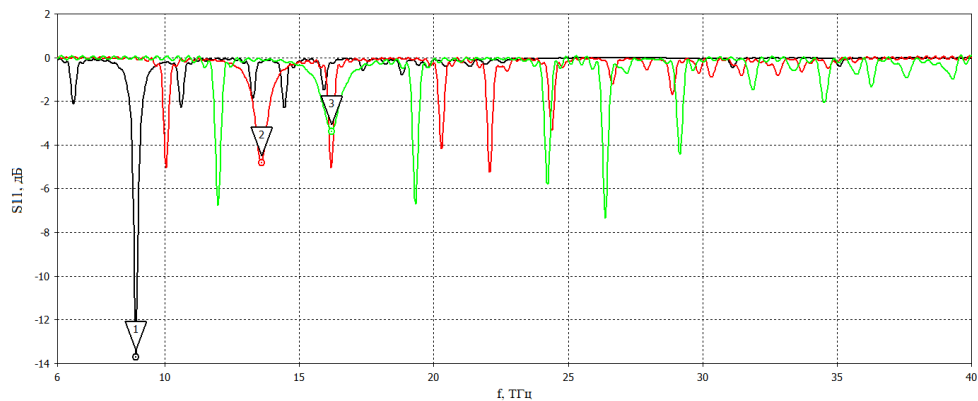


Рис. 1. Частотные зависимости элемента матрицы рассеяния $|S_{11}|$ на входе излучателя на основе прямоугольной графеновой наноленты ($w = 1$ мкм, $l = 2,5$ мкм) на диэлектрической подложке SiO_2 ($a = b = 3$ мкм, $h = 1$ мкм, $\epsilon = 2,2$) в дальнем и среднем ИК-диапазонах для различных значений химического потенциала μ_c :
 кривая 1 (обозначена черным цветом) – 0,3 эВ ($f_{\text{рез1}} = 8,917$ ТГц);
 кривая 2 – (обозначена красным цветом) – 0,7 эВ ($f_{\text{рез2}} = 13,597$ ТГц);
 кривая 3 (обозначена зеленым цветом) – 1 эВ ($f_{\text{рез3}} = 16,21$ ТГц)

Из результатов следует, что значения минимумов коэффициента отражения $|S_{11}|$ на входе антенны и их положение по частоте изменяются при изменении значений химического потенциала μ_c (0,3; 0,7; 1 эВ).

Таблица 1

μ_c , эВ	$ S_{11} $, дБ	$f_{рез}$, ТГц
0,3	-13,8	8,917
0,7	-5	13,597
1	-3,2	16,21

Частоты минимумов $|S_{11}|$ обусловлены резонансами основной и высших мод ППП. Рабочие частоты эффективного излучения антенны соответствуют каждому минимуму коэффициента отражения $|S_{11}|$, т.е. максимуму коэффициента прохождения $|S_{12}|$, и также изменяются в зависимости от химического потенциала μ_c .

При этом на первой резонансной частоте $f_{рез1}$ основной моды ППП наблюдается наименьший минимум коэффициента отражения $|S_{11}|$ ($|S_{21}|$ стремится к нулю) как следствие максимума коэффициента поглощения P падающего излучения, при этом коэффициент прохождения $|S_{12}|$ наибольший [5]. Следовательно, излучение антенны на этой резонансной частоте $f_{рез1}$ будет наиболее эффективным.

На рис. 1 резонанс основной моды ППП соответствует минимуму коэффициента отражения -13,725 дБ на частоте $f = 8,917$ ТГц, другие же минимумы $|S_{11}|$ соответствуют резонансам высших мод ППП (-4,824 дБ и -3,374 дБ на частотах $f = 13,597$ ТГц и $f = 16,21$ ТГц соответственно).

Моделирование характеристик графеновых ФАР

На втором этапе с помощью пакета прикладных программ CST Studio Suite 2021 проведено моделирование характеристик ФАР из элементов прямоугольных графеновых нанолент в зависимости от числа излучателей ($N = 16; 64; 256$) и их управляемости при изменении химического потенциала ($\mu_c = 0,3; 0,7; 1$ эВ) в дальнем и среднем ИК-диапазонах частот (рис. 2–4, табл. 2).

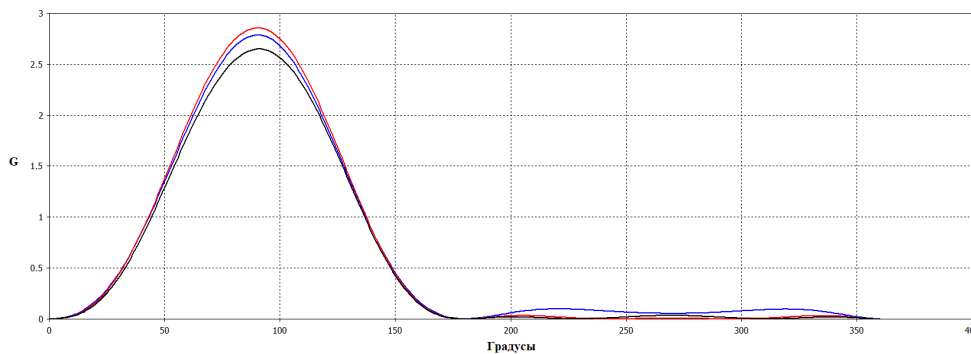


Рис. 2. Управляемость ДН (в декартовой и полярной системах координат) ФАР из элементов прямоугольных графеновых нанолент ($N = 16$) при изменении химического потенциала μ_c : кривая 1 (обозначена синим цветом) – 0,3 эВ, $f_{рез} = 8,917$ ТГц, направление главного лепестка 90° , $\Theta_{0,5} = 78,7^\circ$, уровень боковых лепестков -14,7 дБ; кривая 2 (обозначена красным цветом) – 0,7 эВ, $f_{рез} = 13,597$ ТГц, 90° , $\Theta_{0,5} = 78,5^\circ$, -19,5 дБ; кривая 3 (обозначена черным цветом) – 1 эВ, $f_{рез} = 16,21$ ТГц, 91° , $\Theta_{0,5} = 79,6^\circ$, -19 дБ

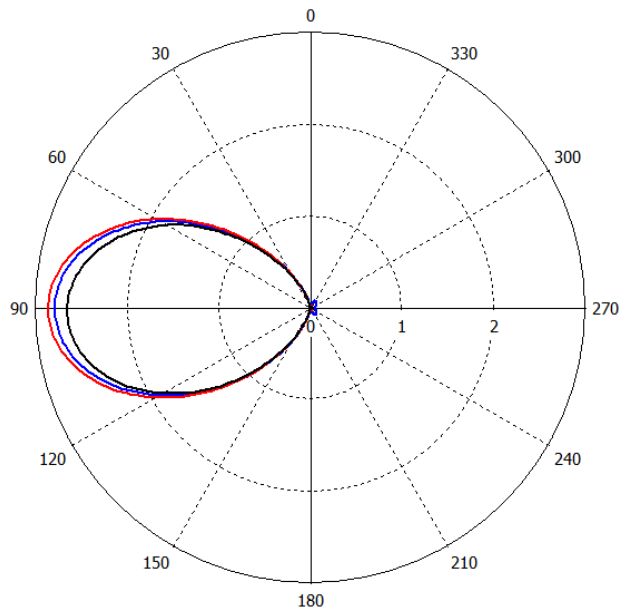


Рис. 2. Окончание

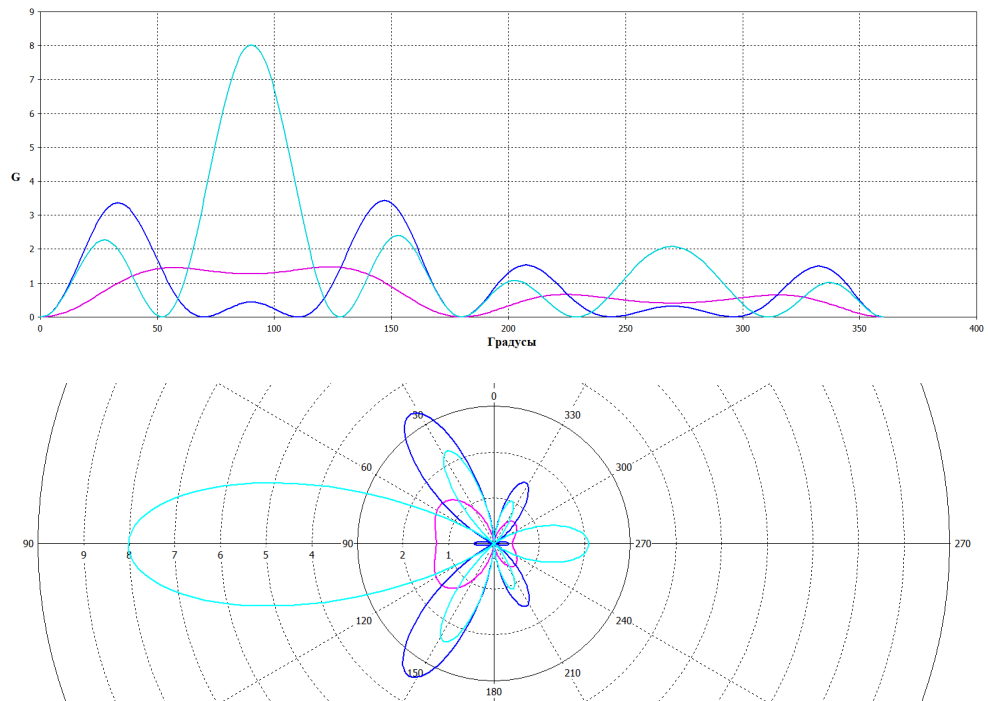


Рис. 3. Управляемость ДН (в декартовой и полярной системах координат) ФАР из элементов прямоугольных графеновых нанолент ($N = 64$) при изменении химического потенциала μ_c : кривая 1 (обозначена фиолетовым цветом) – 0,3 эВ, $f_{\text{рез}} = 8,917$ ТГц, направление главного лепестка 124° , $\Theta_{0,5} = 126,9^\circ$, уровень боковых лепестков $-3,5$ дБ; кривая 2 (обозначена синим цветом) – 0,7 эВ, $f_{\text{рез}} = 13,597$ ТГц, 147° , $\Theta_{0,5} = 33^\circ$, $-3,5$ дБ; кривая 3 (обозначена голубым цветом) – 1 эВ, $f_{\text{рез}} = 16,21$ ТГц, 90° , $\Theta_{0,5} = 37,1^\circ$, $-5,2$ дБ

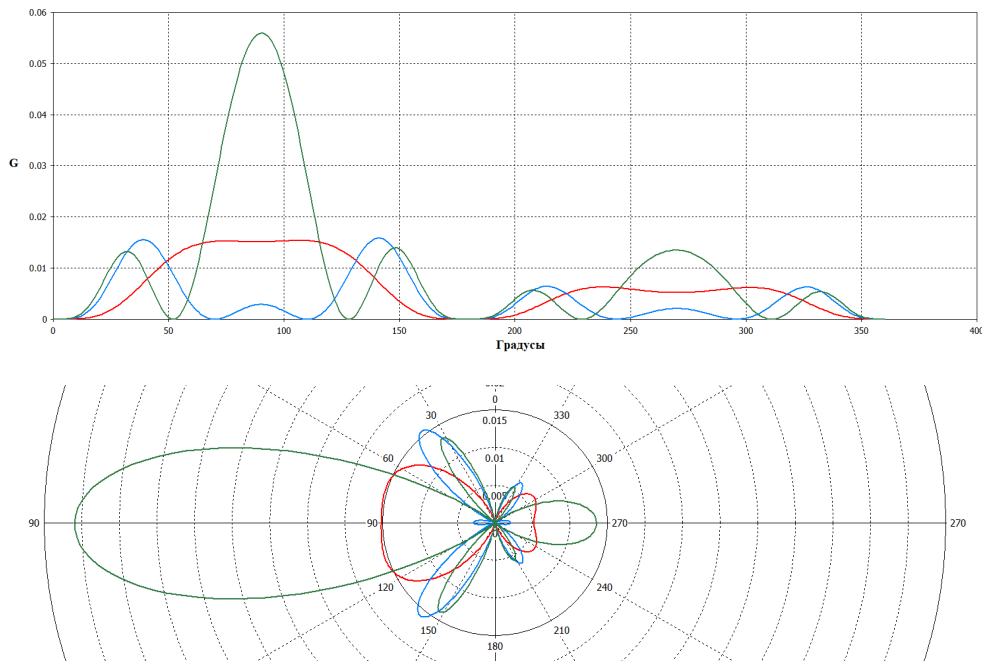


Рис. 4. Управляемость ДН (в декартовой и полярной системах координат) ФАР из элементов прямоугольных графеновых нанолент ($N = 256$) при изменении химического потенциала μ_c : кривая 1 (обозначена красным цветом) – 0,3 эВ, $f_{рез} = 8,917$ ТГц, направление главного лепестка 107° , $\Theta_{0,5} = 99,5^\circ$, уровень боковых лепестков $-3,9$ дБ; кривая 2 (обозначена голубым цветом) – 0,7 эВ, $f_{рез} = 13,597$ ТГц, 141° , $\Theta_{0,5} = 28,1^\circ$, $-3,9$ дБ; кривая 3 (обозначена зеленым цветом) – 1 эВ, $f_{рез} = 16,21$ ТГц, 90° , $\Theta_{0,5} = 39,2^\circ$, -6 дБ

Таблица 2

μ_c , эВ	f , ТГц	N	$\Theta_{0,5}$, °	Направление главного лепестка, °	Амплитуда главного лепестка	Уровень боковых лепестков, дБ	Коэффициент усиления (G)
0,3	8,917	16	78,7	90	2,79	-14,7	5,37
		64	126,9	124	1,47	-3,5	2,01
		256	99,5	107	0,0154	-3,9	5,59
0,7	13,597	16	78,5	90	2,85	-19,5	7,65
		64	33	147	3,44	-3,5	4,57
		256	28,1	141	0,0159	-3,9	8,32
1	16,21	16	79,6	91	2,65	-19	8,53
		64	37,1	90	8,02	-5,2	8,9
		256	39,2	90	0,0559	-6	8,61

Результаты и обсуждение

Как следует из результатов расчета, с увеличением числа элементов ФАР уровень боковых лепестков ДН изменяется: минимальное значение $-19,5$ дБ ($N = 16$, $\mu_c = 0,7$ эВ, $f_{рез} = 13,597$ ТГц), максимум $-3,5$ дБ ($N = 64$; $\mu_c = 0,3$ эВ, $f_{рез} = 8,917$ ТГц и $\mu_c = 0,7$ эВ, $f_{рез} = 13,597$ ТГц); ширина ДН по уровню половинной мощности $\Theta_{0,5}$: минимум $28,1$ ($N = 256$, $\mu_c = 0,7$ эВ, $f_{рез} = 13,597$ ТГц), максимум $126,9^\circ$ ($N = 64$, $\mu_c = 0,3$ эВ, $f_{рез} = 8,917$ ТГц).

Направление главного лепестка ДН при изменении значений химического потенциала $\mu_c = 0,3; 0,7; 1$ эВ изменяется в пределах от 90° ($N = 16$, $\mu_c = 0,3$ эВ, $f_{\text{рез}} = 8,917$ ТГц) до 124° ($N = 16$, $\mu_c = 0,3$ эВ, $f_{\text{рез}} = 8,917$ ТГц); от 90° ($N = 16$, $\mu_c = 0,7$ эВ, $f_{\text{рез}} = 13,597$ ТГц) до 147° ($N = 64$, $\mu_c = 0,7$ эВ, $f_{\text{рез}} = 13,597$ ТГц), т.е. происходит электронное управление лучом в пространстве.

Таким образом, при изменении химического потенциала μ_c :

– изменяются направление главного лепестка ДН и ширина ДН по уровню половинной мощности $\Theta_{0,5}$, при этом изменяются рабочие частоты, т.е. происходит частотное сканирование ФАР в пространстве;

– максимальное значение уровня главного лепестка равно 9,45 дБ на частоте $f = 16,21$ ТГц при $\mu_c = 1$ эВ ($N = 16$), когда $|S_{11}|$ имеет минимальное значение на резонансной частоте, а $|S_{12}|$ – максимальное, и, следовательно, эффективность излучения возрастает.

Таким образом, ФАР из элементов прямоугольных графеновых нанолент являются электрически управляемыми с частотным сканированием путем изменения химического потенциала μ_c (при приложении внешнего электрического поля) в терагерцовом, дальнем и среднем ИК-диапазонах частот.

Заключение

Из результатов моделирования следует, что с увеличением химического потенциала μ_c происходит изменение ширины главного лепестка ДН по уровню половинной мощности $\Theta_{0,5}$, изменение уровня боковых лепестков, а также направления главного лепестка ДН. Следовательно, ФАР из элементов прямоугольных графеновых нанолент управляются путем изменения химического потенциала μ_c при приложении внешнего электрического поля, т.е. являются электрически управляемыми в дальнем и среднем ИК диапазоне частот.

Возможность приема и передачи широкополосных сигналов ТГц- и ИК-диапазонов такой ФАР и высокоскоростная перестройка всего рабочего диапазона частот без изменения геометрических размеров ФАР являются важными свойствами для применения в современных системах передачи информации.

ФАР на основе графена, исследуемые в данной работе, обеспечивают возможность приема и передачи широкополосных сигналов ТГц- и ИК-диапазонов с высокоскоростной перестройкой всего рабочего диапазона частот без изменения геометрических размеров ФАР.

Список литературы

1. Sedeh H. B., Salary M. M., Mosallaei H. Adaptive Multichannel Terahertz Communication by Space-Time Shared Aperture Metasurfaces // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 185919–185937. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3030200
2. Макеева Г. С., Голованов О. А. Математическое моделирование электронно-управляемых устройств терагерцового диапазона на основе графена и углеродных нанотрубок : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. 304 с.
3. Saeedkia D. Handbook of Terahertz Technology for Imaging, Sensing and Communications. Amsterdam, the Netherlands : Elsevier, 2013.
4. Chan W. L., Deibel J., Mittleman D. M. Imaging with terahertz radiation // Rep. Prog. Phys. 2007. Vol. 70, № 8. P. 1325.

5. Siegel P. H. Terahertz technology in biology and medicine // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2004. Vol. 52, № 10. P. 2438–2447.
6. Mittleman D. *Sensing With Terahertz Radiation*. Berlin, Germany : Springer-Verlag, 2013. Vol. 85. doi: 10.1007/978-3-540-45601-8
7. Smye S. W., Chamberlain J. M., Fitzgerald A. J., Berry E. The interaction between terahertz radiation and biological tissue // *Phys. Med. Biol.* 2001. Vol. 46, № 9. P. R101–R112.
8. Globus T., Woolard D., Khromova T., Crowe T., Bykhovskaia M., Gelmont B., Hesler J., Samuels A. Thz-spectroscopy of biological molecules // *J. Biol. Phys.* 2003. Vol. 29, № 2-3. P. 89–100.
9. Ren P., Jiang L., Li P. Graphene Based Tunable Terahertz Holographic Antennas // *IEEE Journal of Antennas and Propagation*. 2022. Vol. 3. P. 324–332. doi: 10.1109/OJAP.2022.3158203
10. Taghvaei H. [et al.]. Multiwideband Terahertz Communications Via Tunable Graphene-Based Metasurfaces in 6G Networks: Graphene Enables Ultimate Multiwideband THz Wavefront Control // *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2022. Vol. 17, № 2. P. 16–25. doi: 10.1109/MVT.2022.3155905
11. Zeng Ch. [et al.]. Graphene-empowered dynamic metasurfaces and metadevices // *Opto-Electronic Advances*. 2022. Vol. 5. P. 200098–200098. doi: 10.29026/oea.2022.200098
12. Ouyang Y., Yoon Y., Fodor J. K., Guo J. Comparison of performance limits for carbon nanoribbon and carbon nanotube transistors // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 89, № 20. P. 203107.
13. Niu K., Li P., Huang Z., Jiang L. J., Bagci H. Numerical Methods for Electromagnetic Modeling of Graphene: A Review // *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*. 2020. Vol. 5. P. 44–58. doi: 10.1109/JMMCT.2020.2983336
14. Lerer A. M., Makeeva G. S., Cherepanov V. V. Terahertz-to-Infrared Up-Conversion by Plasmonic-Enhanced Sum Frequency Generation in Graphene Gratings // *2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. Saratov, Russia, 2022. P. 62.
15. Luo Y. [et al.]. Graphene-Based Multi-Beam Reconfigurable THz Antennas // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 30802–30808. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2903135

References

1. Sedeh H.B., Salary M.M., Mosallaei H. Adaptive Multichannel Terahertz Communication by Space-Time Shared Aperture Metasurfaces. *IEEE Access*. 2020;8: 185919–185937. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3030200
2. Makeeva G.C., Golovanov O.A. *Matematicheskoe modelirovanie elektronno-upravlyaemykh ustroystv teragertsovogo diapazona na osnove grafena i uglerodnykh nanotrubok: monografiya = Mathematical modeling of electronically controlled devices of the terahertz range based on graphene and carbon nanotubes: monograph*. Penza: Izd-vo PGU, 2018:304. (In Russ.)
3. Saeedkia D. *Handbook of Terahertz Technology for Imaging, Sensing and Communications*. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 2013.
4. Chan W.L., Deibel J., Mittleman D.M. Imaging with terahertz radiation. *Rep. Prog. Phys.* 2007;70(8):1325.
5. Siegel P.H. Terahertz technology in biology and medicine. *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2004;52(10):2438–2447.
6. Mittleman D. *Sensing With Terahertz Radiation*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2013;85. doi: 10.1007/978-3-540-45601-8
7. Smye S.W., Chamberlain J.M., Fitzgerald A.J., Berry E. The interaction between terahertz radiation and biological tissue. *Phys. Med. Biol.* 2001;46(9):R101–R112.

8. Globus T., Woolard D., Khromova T., Crowe T., Bykhovskaia M., Gelmont B., Hesler J., Samuels A. THz-spectroscopy of biological molecules. *J. Biol. Phys.* 2003;29(2-3): 89–100.
9. Ren P., Jiang L., Li P. Graphene Based Tunable Terahertz Holographic Antennas. *IEEE Journal of Antennas and Propagation*. 2022;3:324–332. doi: 10.1109/OJAP.2022.3158203
10. Taghvaei H. et al. Multiwideband Terahertz Communications Via Tunable Graphene-Based Metasurfaces in 6G Networks: Graphene Enables Ultimate Multiwide-band THz Wavefront Control. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2022;17(2):16–25. doi: 10.1109/MVT.2022.3155905
11. Zeng Ch. et al. Graphene-empowered dynamic metasurfaces and metadevices. *Opto-Electronic Advances*. 2022;5:200098–200098. doi: 10.29026/oea.2022.200098
12. Ouyang Y., Yoon Y., Fodor J.K., Guo J. Comparison of performance limits for carbon nanoribbon and carbon nanotube transistors. *Appl. Phys. Lett.* 2006;89(20): 203107.
13. Niu K., Li P., Huang Z., Jiang L.J., Bagci H. Numerical Methods for Electromagnetic Modeling of Graphene: A Review. *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*. 2020;5:44–58. doi: 10.1109/JMMCT.2020.2983336
14. Lerer A.M., Makeeva G.S., Cherepanov V.V. Terahertz-to-Infrared Up-Conversion by Plasmonic-Enhanced Sum Frequency Generation in Graphene Gratings. *2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. Saratov, Russia, 2022:62.
15. Luo Y. et al. Graphene-Based Multi-Beam Reconfigurable THz Antennas. *IEEE Access*. 2019;7:30802–30808. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2903135

Информация об авторах / Information about the authors

Никита Николаевич Неведов

студент, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: nikita.nefyodow@mail.ru

Nikita N. Nefedov

Student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Галина Степановна Макеева

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники и радиоэлектронных систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: radiotech@pnzgu.ru

Galina S. Makeeva

Doctor of physical and mathematical sciences, professor, professor of the sub-department of radioengineering and radioelectronic systems, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 30.01.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 20.02.2023

Принята к публикации / Accepted 04.04.2023