

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК РЕШЕТОК ПЛАЗМОННЫХ ГРАФЕНОВЫХ НАНОАНТЕНН В СРЕДНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

Г. С. Макеева

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
radiotech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Внедрение наноантенн для оптической беспроводной связи в инфракрасном (ИК) и видимом диапазонах обеспечивает более высокую скорость передачи данных при уменьшении размера антенны. Возможность перестройки характеристик графена химическим легированием или напряжением смещения актуальна при разработке реконфигурируемых наноантенн. Целью работы является исследование характеристик (S-параметров, диаграммы направленности (ДН)) решеток плазмонных графеновых наноантенн (ПГНА), их управляемости и возможности сканирования по частоте при изменении химического потенциала графена (приложением внешнего электрического поля) в среднем ИК-диапазоне. *Материалы и методы.* Применение графена, обладающего хорошей электропроводностью, управляемой проводимостью и плазмонными свойствами в терагерцовом, дальнем и среднем ИК-диапазонах, является одной из наиболее многообещающих альтернатив благородным металлам (Au и Ag) как плазмонным материалам только на оптических частотах. Моделирование характеристик решеток ПГНА проведено с помощью программы электродинамического моделирования CST Microwave Studio 2019, что позволяет решить научные проблемы, связанные с проектированием графеновых антенн в ИК-диапазоне волн. *Результаты.* Получены результаты моделирования управляемости характеристик (S-параметров, ДН) единичного элемента антенной решетки (ПГНА прямоугольной геометрии) и решеток ПГНА на резонансных частотах основной моды поверхностных плазмон-поляритонов, и показана возможность сканирования по частоте при изменении химического потенциала графена (приложением внешнего электрического поля) в среднем ИК-диапазоне. *Выводы.* Из результатов моделирования характеристик решеток ПГНА следует, что с увеличением химического потенциала графена (в интервале значений 0,3–1 эВ) происходит перестройка рабочих частот (сканирование по частоте) в среднем ИК-диапазоне, возрастает коэффициент усиления решетки ПГНА, происходит сужение главного лепестка ДН, уменьшение уровня боковых лепестков; при увеличении числа единичных элементов ($N = 256$) уровни боковых лепестков ДН уменьшаются и наблюдается лучшая управляемость главного лепестка ДН.

Ключевые слова: средний ИК-диапазон, решетки плазмонных графеновых наноантенн, химический потенциал, диаграмма направленности, сканирование по частоте

Для цитирования: Макеева Г. С. Моделирование управляемости характеристик решеток плазмонных графеновых наноантенн в среднем инфракрасном диапазоне // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 3. С. 30–40. doi: 10.21685/2307-4205-2024-3-4

MODELING THE CONTROLLABILITY OF CHARACTERISTICS OF PLASMON GRAPHENE NANOANTENNA GRATINGS IN THE MID-IR RANGE

G.S. Makeeva

Penza State University, Penza, Russia
radiotech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The introduction of nanoantennas for optical wireless communications in the infrared (IR) and visible bands enables higher data rates while reducing antenna size. The ability to tune the characteristics of graphene by chemical doping or bias voltage is relevant in the development of reconfigurable nanoantennas. The goal of the work is to study the characteristics (S-parameters, radiation patterns (RP)) of plasmonic graphene nanoantenna (PGNA) arrays, their controllability and the possibility of frequency scanning when changing the chemical potential of graphene (by applying an external electric field) in the mid-IR range. *Materials and methods.* The use of graphene, which has good electrical conductivity, controlled conductivity and plasmonic properties in the terahertz (THz), far-IR and mid-IR ranges, is one of the most promising alternatives to noble metals (Au and Ag) as plasmonic materials at optical frequencies only. Modeling of the characteristics of PGNA arrays was carried out using the electrodynamic modeling program CST Microwave Studio 2019, which makes it possible to solve scientific problems associated with

the design of graphene antennas in the IR wavelength range. *Results.* The results of modeling the controllability of the characteristics (S-parameters, DP) of a element of the antenna array (PGNA of rectangular geometry) and PGNA arrays at the resonant frequencies of the fundamental mode of surface plasmon polaritons (SPP) are obtained and the possibility of scanning in frequency when changing the chemical potential of graphene (by applying an external electric fields) in the mid-IR range. *Conclusions.* From the results of modeling the characteristics of PGNA arrays, it follows that with an increase in the chemical potential of graphene (in the range of values 0,3–1 eV), the operating frequencies are adjusted (frequency scanning) in the mid-IR range, the gain of the PGNA array increases, the RP main lobe narrows, and the RP side lobe level decrease; with an increase in the number of single elements ($N = 256$), the levels of the RP side lobes decrease and better controllability of the RP main lobe is observed.

Keywords: mid-IR range, plasmonic graphene nanoantenna arrays, chemical potential, radiation pattern, frequency scanning

For citation: Makeeva G.S. Modeling the controllability of characteristics of plasmon graphene nanoantenna gratings in the mid-ir range. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(3):30–40. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-3-4

Введение

За последние несколько лет быстро растет внедрение наноантенн для оптической беспроводной связи в инфракрасном (ИК) и видимом диапазонах, что обеспечивает более высокую скорость передачи данных при уменьшении размера антенны [1]. Патч-наноантенна впервые была разработана для ближнего ИК-диапазона [2]. Эта наноантенна возбуждалась гибридным плазмонным волноводом на основе благородных металлов (Au и Ag), обладающих плазмонными свойствами только на оптических частотах, а в среднем и дальнем ИК-диапазонах являющихся проводниками, а не плазмонными материалами [3].

Впоследствии графен продемонстрировал плазмонные свойства в терагерцовом (ТГц), дальнем и среднем ИК-диапазонах. Главным преимуществом графена являются перестраиваемые характеристики [4, 5]. Его можно перестраивать либо внутренними, либо внешними средствами, т.е. химическим легированием или напряжением смещения. Эта возможность перестройки используется при разработке реконфигурируемых наноантенн [5].

Графен, обладающий хорошей электропроводностью, управляемой проводимостью, и плазмонными свойствами, является одной из наиболее многообещающих альтернатив [6, 7]. Если графен интегрирован в антенны, то графеновые антенны показывают лучшие характеристики излучения, чем их типичные металлические аналоги. Это обусловлено хорошей проводимостью графена и тем, что его химический потенциал, а значит, и поверхностную проводимость можно изменять, приложив напряжение смещения, что, в свою очередь, изменяет значение поверхностного импеданса графена [8].

Чтобы функционировать на наномасштабах, традиционные антенны должны работать на очень высоких, т.е. оптических частотах, что делает их выбор непрактичным. Однако отличительная черта графена – более медленная подвижность электронов – позволяет работать в ТГц, дальнем и среднем ИК-диапазонах, что делает графен жизнеспособным кандидатом на роль наноразмерных антенн [9]. Как следствие, материалы на основе графена предлагают потенциал в разработке реконфигурируемых антенн ТГц [4–6, 8, 9] и среднего ИК-диапазонов [1, 10, 11].

Усиленное электромагнитное удержание оптических полей и последующая адекватная концентрация оптического излучения с помощью оптических наноантенн имеют невероятное значение в различных фотонных приложениях, включая ИК-визуализацию, зондирование, спектроскопию и фотодетектирование [10, 12].

Концепция ограничения и усиления оптического поля чрезвычайно многообещающая в ИК и ТГц диапазонах частот, что открывает возможности для таких важных приложений, как визуализация [13], зондирование [14] и спектроскопия [15]. Однако слабое ограничение оптического поля металлическими плазмонными структурами, обусловленное малым проникновением электромагнитных полей в металл на низких частотах, сильно снижает эффективность [16].

Омические потери графена уменьшаются при воздействии сильного химического легирования, кроме того, графеновые поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) обладают более высоким удержанием, обеспечивая более сильные взаимодействия излучения с материей [17, 18]. Необычайные электрические свойства графена и технологии изготовления высококристаллических листов графена увеличивают время жизни ППП сотен оптических циклов, что позволяет решить проблемы, связанные с плазмонными антеннами из благородных металлов [19].

В этой связи актуальной является задача исследования методами автоматизированного моделирования характеристик (S-параметров, диаграммы направленности) решеток плазмонных графеновых наноплазмонных антенн (ПГНА), их управляемости и возможности сканирования по частоте при изменении химического потенциала графена (приложением внешнего электрического поля) в среднем ИК-диапазоне.

Результаты моделирования управляемости характеристик (элемента матрицы рассеяния S_{11} , ДН) плазмонной графеновой наноплазмонной антенны в ИК-диапазоне

С помощью пакета прикладных программ CST Studio Suite 2023 [20] на первом этапе проведено моделирование единичного элемента графеновой антенной решетки среднего ИК-диапазона – плазмонной графеновой наноплазмонной антенны прямоугольной геометрии. На рис. 1 представлена модель ПГНА, разработанная в CST Microwave Studio 2023 [20, 21], которая состоит из графенового элемента прямоугольной геометрии (длиной l , шириной w), расположенного на металлизированной диэлектрической подложке (диоксид кремния SiO_2 , диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2,2$) с геометрическими размерами a, b, h . Эта модель с возбуждением дискретным портом использована для решения электродинамической задачи с помощью пакета прикладных программ CST Microwave Studio 2023 методом конечного интегрирования во временной области [21].

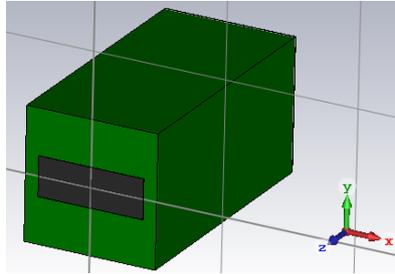


Рис. 1. Модель единичного элемента решетки – ПГНА прямоугольной геометрии с металлизированной диэлектрической подложкой, возбуждаемой дискретным портом, в пакете прикладных программ CST Studio Suite 2019: $l = 400$ нм, $w = 150$ нм, $a = b = 500$ нм

С помощью пакета прикладных программ CST Microwave Studio 2023 проведен электродинамический расчет частотных зависимостей элемента матрицы рассеяния $|S_{11}|$ – коэффициента отражения на входе ПГНА (с геометрическими размерами $l = 400$ нм; $w = 150$ нм, $a = b = 500$ нм) для различных значений химического потенциала графена μ_c в ИК-диапазоне частот $f = 15\text{--}60$ ТГц, результаты которого представлены на рис. 2, 3. Графен имеет следующие параметры: температура $T = 300$ К, параметр рассеяния $\tau = 1$ пс [22].

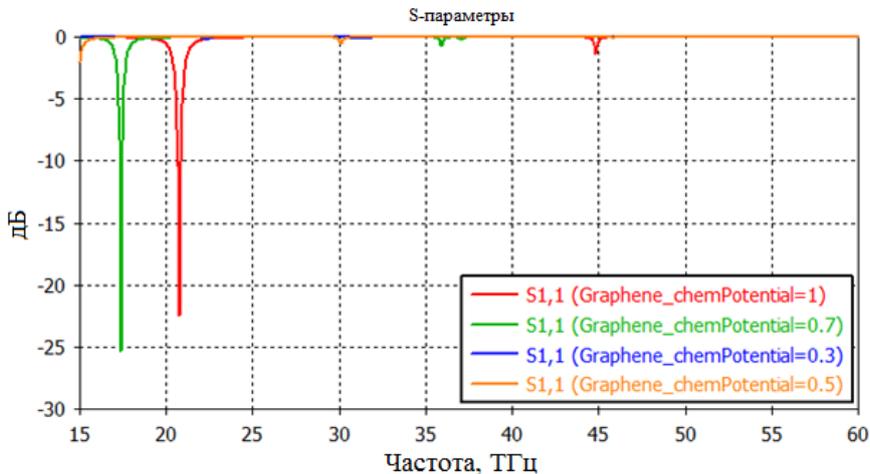


Рис. 2 Частотные зависимости элемента матрицы рассеяния $|S_{11}|$ ПГНА в ИК-диапазоне частот $f = 15\text{--}60$ ТГц для различных значений химического потенциала μ_c графена: 1 – синий цвет $\mu_{c1} = 0,3$ эВ; 2 – оранжевый цвет $\mu_{c2} = 0,5$ эВ; 3 – зеленый цвет $\mu_{c3} = 0,7$ эВ; 4 – красный цвет $\mu_{c4} = 1$ эВ; $l = 400$ нм; $w = 150$ нм; $a = b = 500$ нм; $T = 300$ К, $\tau = 1$ пс

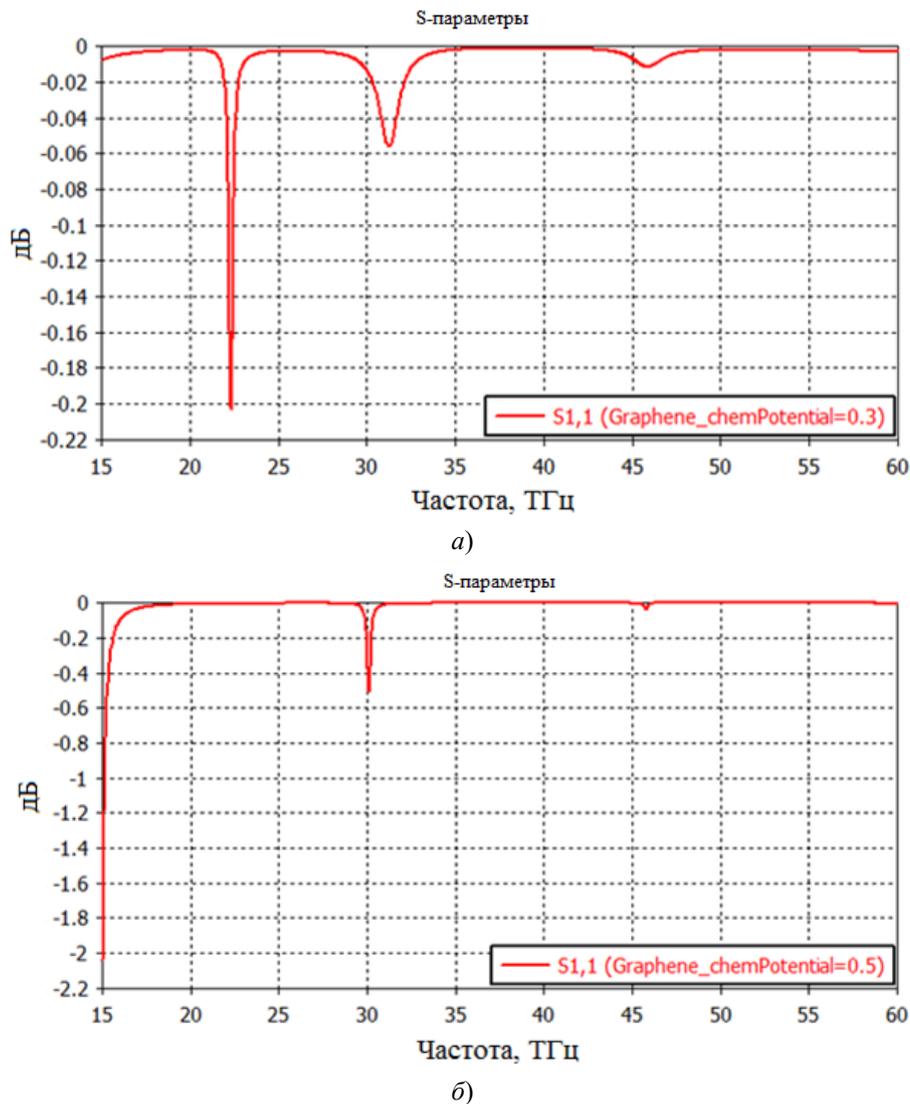


Рис. 3. Частотные зависимости элемента матрицы рассеяния $|S_{11}|$ ПГНА в ИК-диапазоне частот $f = 15\text{--}60$ ТГц для различных значений химического потенциала: $a - \mu_c = 0,3$ эВ; $b - \mu_c = 0,5$ эВ; $l = 400$ нм; $w = 150$ нм, $a = b = 500$ нм; $T = 300$ К, $\tau = 1$ пс

Графен характеризуется поверхностной проводимостью σ , определяемой формулой Кубо [22]. Поверхностная проводимость графена в соответствии с моделью Кубо зависит от химического потенциала графена μ_c , который можно изменять химическим легированием или приложением внешнего электрического поля [22, 23].

Из результатов моделирования (рис. 2, 3) следует, что при изменении химического потенциала μ_c положение по частоте и значения минимумов коэффициента отражения $|S_{11}|$ изменяются. Это объясняется тем, что в ТГц и дальнем, среднем ИК-диапазонах в графене, расположенном на поверхности диэлектрического слоя, могут распространяться поверхностные плазмон-поляритоны. В ограниченном графеновом элементе наблюдается резонанс ППП, при котором резко возрастает плотность поверхностного электрического тока и поглощение [24]. Минимумы коэффициента отражения $|S_{11}|$ на входе ПГНА обусловлены максимумами коэффициента поглощения P в графеновом элементе [24, 25].

Положению каждого минимума $|S_{11}|$ соответствует определенная частота плазмонного резонанса мод ППП основного и высших типов в графеновом элементе прямоугольной геометрии. При этом первый минимум $|S_{11}|$ соответствует резонансу основной моды ППП, другие же минимумы $|S_{11}|$ соответствуют резонансам высших мод ППП [24].

Из анализа полученных результатов можно констатировать, что при увеличении значения химического потенциала μ_c ($0,3\text{--}1$ эВ) частоты плазмонного резонанса $f_{\text{рез}}$ увеличиваются (рис. 2, 3), а именно резонансные частоты $f_{\text{рез}}$ основной моды ППП изменяются следующим образом: $f_{\text{рез}1} = 15$ ТГц

при $\mu_c = 0,5$ эВ; $f_{рез2} = 17,385$ ТГц при $\mu_c = 0,7$ эВ; $f_{рез3} = 20,715$ ТГц при $\mu_c = 1$ эВ; при этом минимальное значение $|S_{11}|$ равно $-25,4$ дБ при $\mu_c = 0,7$ эВ (см. рис. 2).

Резкое возрастание поверхностного электрического тока на графеновом элементе при плазмонном резонансе мод ППП приводит к усилению эффективности процесса излучения на резонансных частотах $f_{рез}$. Положению каждого минимума $|S_{11}|$ на частотах резонансов основной и высших мод ППП соответствуют определенные рабочие частоты эффективного излучения антенны, при этом минимальные значения коэффициента отражения $|S_{11}|$ определяют максимальную эффективность излучения.

Из результатов расчета (см. рис. 2) следует, что оптимальной рабочей точкой ПГНА является резонансная частота $f_{рез2} = 17,385$ ТГц при значении химического потенциала $\mu_c = 0,7$ эВ, где коэффициент отражения $|S_{11}|$ имеет минимальное значение $-25,4$ дБ и при этом максимальный коэффициент поглощения. Следовательно, на данной резонансной частоте возможна максимальная эффективность излучения ПГНА.

При увеличении химического потенциала ($\mu_c = 0,3-1$ эВ) резонансные частоты $f_{рез}$ минимумов коэффициента отражения $|S_{11}|$ сдвигаются в сторону более высоких частот ИК-диапазона, т.е. рабочие частоты ПГНА управляются приложением внешнего электрического поля и ПГНА становится частотно-сканируемой.

Результаты моделирования с помощью пакета прикладных программ CST Microwave Studio 2023 ДН ПГНА на резонансных частотах $f_{рез}$ основной моды ППП для различных значений химического потенциала μ_c (0,5 эВ, 0,7 эВ, 1 эВ) и сканирование по частоте в среднем ИК-диапазоне приведены на рис. 4–6.

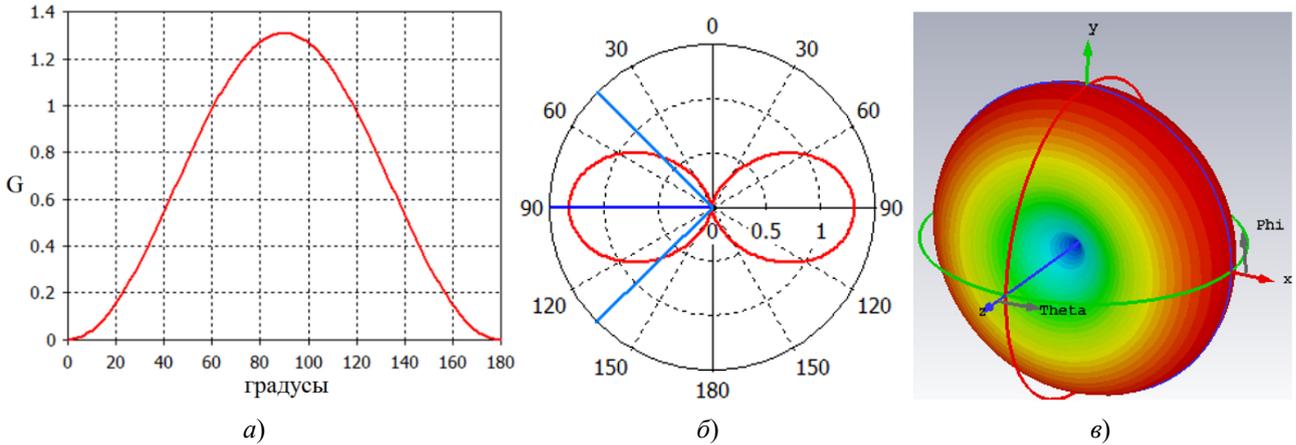


Рис. 4. ДН ПГНА на резонансной частоте $f_{рез1}$ основной моды ППП в среднем ИК-диапазоне: $f_{рез1} = 15$ ТГц; $\mu_c = 0,5$ эВ в декартовой, полярной в E -плоскости (в зависимости от θ , при $\varphi = 0$ град.), сферической системах координат; коэффициент усиления (амплитуда главного лепестка) $G = 1,31$, направление главного лепестка 90 град., $\Theta_{0,5} = 89,8$ град.

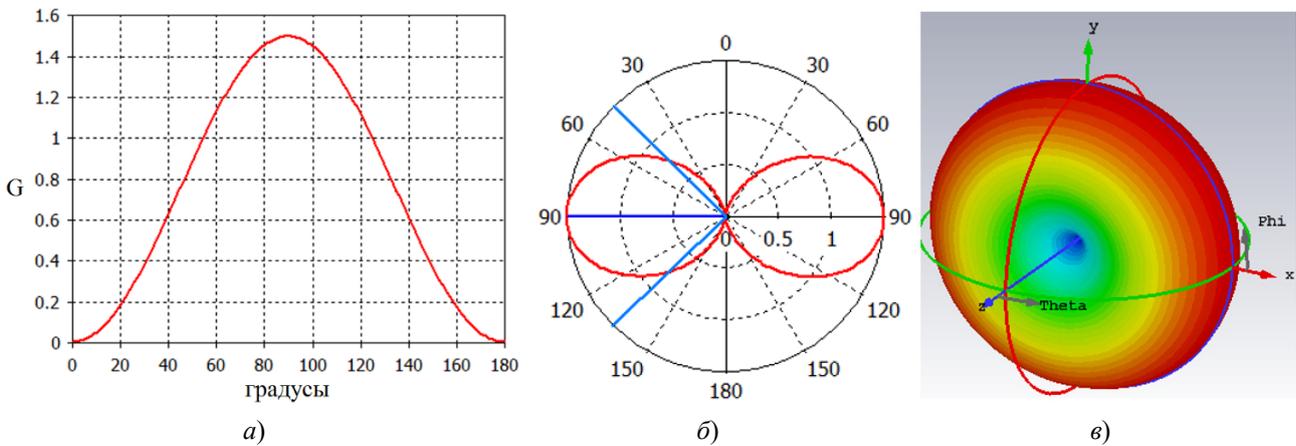


Рис. 5. ДН ПГНА на резонансной частоте $f_{рез2}$ основной моды ППП в среднем ИК-диапазоне: $f_{рез2} = 17,385$ ТГц; $\mu_c = 0,7$ эВ в декартовой, полярной в E -плоскости (в зависимости от θ , при $\varphi = 0$ град.), сферической системах координат; коэффициент усиления (амплитуда главного лепестка) $G = 1,5$, направление главного лепестка 90 град., $\Theta_{0,5} = 90$ град.

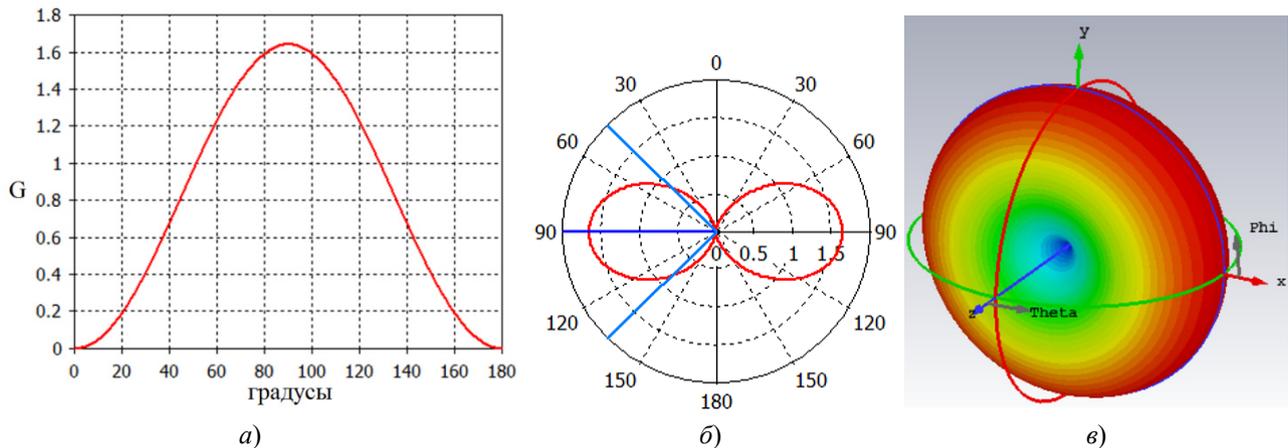


Рис. 6. ДН ПГНА на резонансной частоте $f_{рез3}$ основной моды ППП в среднем ИК-диапазоне: $f_{рез3} = 20.715$ ТГц; $\mu_c = 1$ эВ в декартовой, полярной в E -плоскости (в зависимости от θ , при $\varphi = 0$ град.), сферической системах координат; коэффициент усиления (амплитуда главного лепестка) $G = 1,64$, направление главного лепестка 90 град., $\Theta_{0,5} = 89,8$ град.

Результаты, представленные на рис. 4–7, демонстрируют возможность перестройки рабочей частоты ПГНА (сканирование по частоте) на резонансных частотах $f_{рез}$ основной моды ППП в среднем ИК-диапазоне при изменении химического потенциала μ_c в интервале значений $0,5$ – 1 эВ (приложением внешнего электрического поля).

На резонансных частотах $f_{рез1}$, $f_{рез2}$, $f_{рез3}$ основной моды ППП наблюдается резонанс электрического тока, создаваемого стоячей поперечной ППП вдоль широкой стороны прямоугольного графенового элемента [24] и, следовательно, поперечное распределение тока j_s по длине графенового элемента. Форма 3D ДН излучения, создаваемого этим поперечным (по длине волны ППП) электрическим излучателем, тороидальная (рис. 3–6,в). Ось 2D ДН ориентирована в экваториальной плоскости параллельно относительно продольного излучающего тока, ДН в E -плоскости (в зависимости от θ , при $\varphi = 0$ град) (рис. 3–6,б) соответствует ДН поперечного симметричного вибратора [26].

Из результатов моделирования (рис. 4–6) следует, что при изменении значения химического потенциала μ_c графена в интервале от $0,5$ до 1 эВ происходит изменение рабочих частот, т.е. сканирование по частоте в среднем ИК-диапазоне и изменяются основные характеристики ПГНА: направление главного лепестка ДН изменяется с 88 до 90 град., коэффициент усиления (амплитуда главного лепестка) с $G = 1,64$ по $1,66$, ширина ДН по уровню половинной мощности $\Theta_{0,5}$ с 90 по $89,8$ град.

Результаты моделирования управляемости ДН решетки ПГНА и сканирование по частоте в среднем ИК-диапазоне при изменении химического потенциала

На втором этапе с помощью пакета прикладных программ CST Studio Suite 2019 проведено моделирование характеристик решетки ПГНА (с числом единичных элементов 16×16 $N = 256$): элемента матрицы рассеяния $|S_{11}|$ и 2D, 3D ДН в ИК-диапазоне частот для различных значений химического потенциала графена μ_c .

На рис. 7 представлена модель решетки ПГНА ($N = 256$) среднего ИК-диапазона. Модель построена в пакете прикладных программ CST Studio Suite 2023.

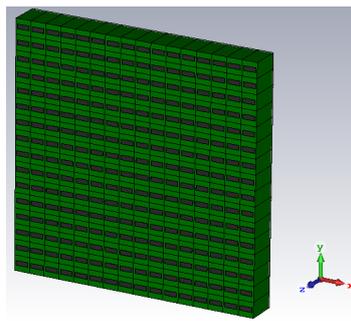


Рис. 7. Модель решетки ПГНА среднего ИК-диапазона: $N = 256$; $l = 400$ нм; $w = 150$ нм; $a = b = 500$ нм

Результаты моделирования с помощью пакета прикладных программ CST Microwave Studio 2023 ДН решетки ПГНА на резонансных частотах основной моды ППП для различных значений химического потенциала μ_c (0,5; 0,7; 1 эВ) приведены на рис. 8–11.

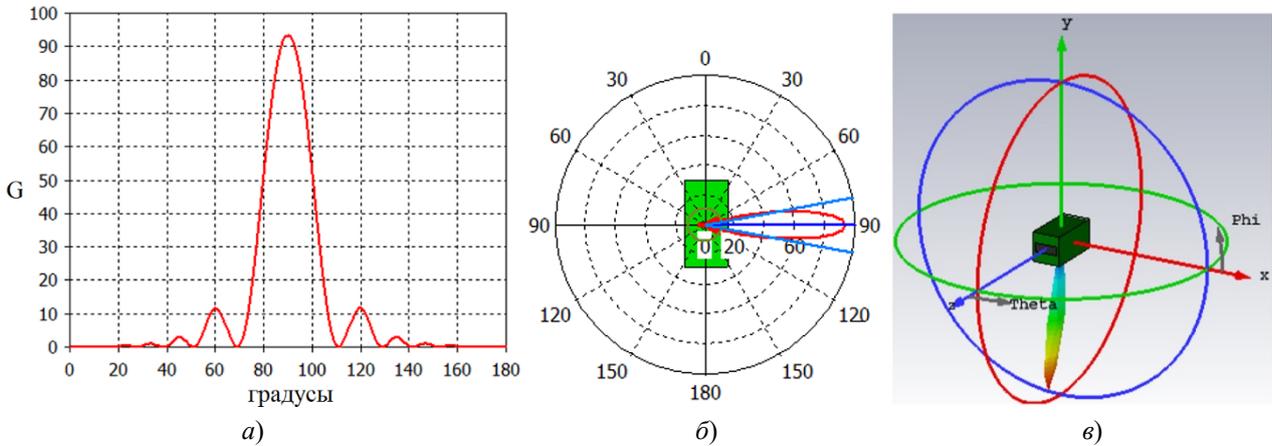


Рис. 8. ДН решетки ПГНА на резонансной частоте $f_{рез1}$ основной моды ППП и сканирование по частоте в среднем ИК-диапазоне:
a – в декартовой; *b* – полярной в *E*-плоскости (в зависимости от θ , при $\varphi = 0$ град.);
в – сферической системах координат; $N = 256$; $f_{рез1} = 15$ ТГц; $\mu_c = 0,5$ эВ;
 коэффициент усиления (амплитуда главного лепестка) $G = 93,4$,
 направление главного лепестка 90 град., $\Theta_{0,5} = 21,3$ град., уровень боковых лепестков $-9,1$ дБ

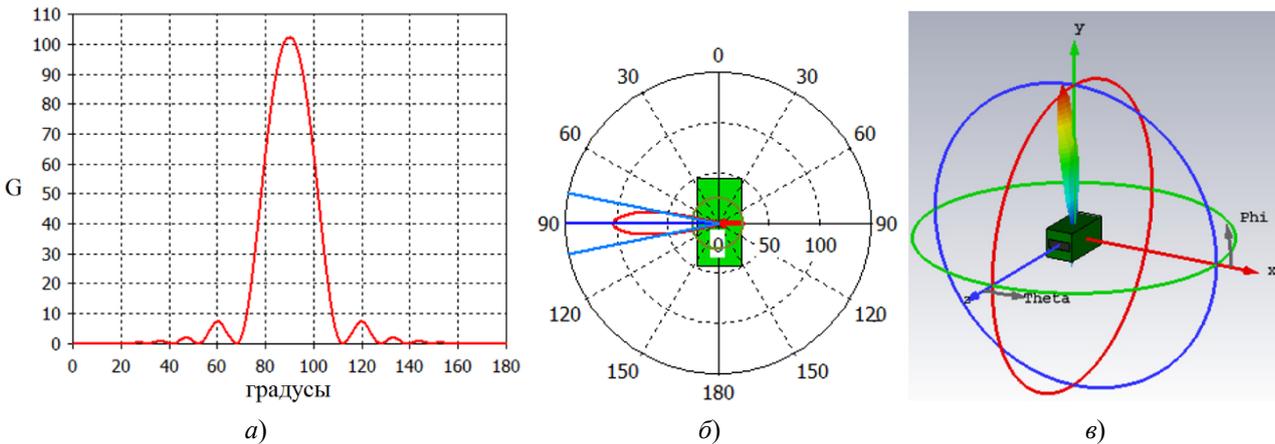


Рис. 9. ДН решетки ПГНА на резонансной частоте $f_{рез2}$ основной моды ППП и сканирование по частоте в среднем ИК-диапазоне:
a – в декартовой; *b* – полярной в *E*-плоскости (в зависимости от θ , при $\varphi = 0$ град.);
в – сферической системах координат; $N = 256$; $f_{рез2} = 17,385$ ТГц; $\mu_c = 0,7$ эВ;
 коэффициент усиления (амплитуда главного лепестка) $G = 102$,
 направление главного лепестка 90 град., $\Theta_{0,5} = 23,2$ град., уровень боковых лепестков -6 дБ

Из результатов моделирования следует, что при изменении химического потенциала μ_c графена в интервале значения от 0,5 до 1 эВ происходит изменение рабочих частот, т.е. сканирование по частоте в среднем ИК-диапазоне, и изменяются основные характеристики решетки ПГНА: направление главного лепестка ДН с 72 до 90 град., коэффициент усиления (амплитуда главного лепестка) с $G = 76,3$ по 102 (максимальное значение $G = 102$ наблюдается на частоте основного минимума $|S_{11}|$ при $\mu_c = 0,7$ эВ), ширина ДН по уровню половинной мощности $\Theta_{0,5}$ с 19,8 по 28,7 град., уровень боковых лепестков с $-2,1$ до -14 дБ.

Результаты моделирования с помощью пакета прикладных программ CST Microwave Studio 2023 ДН решетки ПГНА на резонансной частоте моды ППП второго порядка $f_{рез}^2 = 22,335$ ТГц (см. рис. 3,а) для значения химического потенциала $\mu_c = 0,3$ эВ приведены на рис. 11.

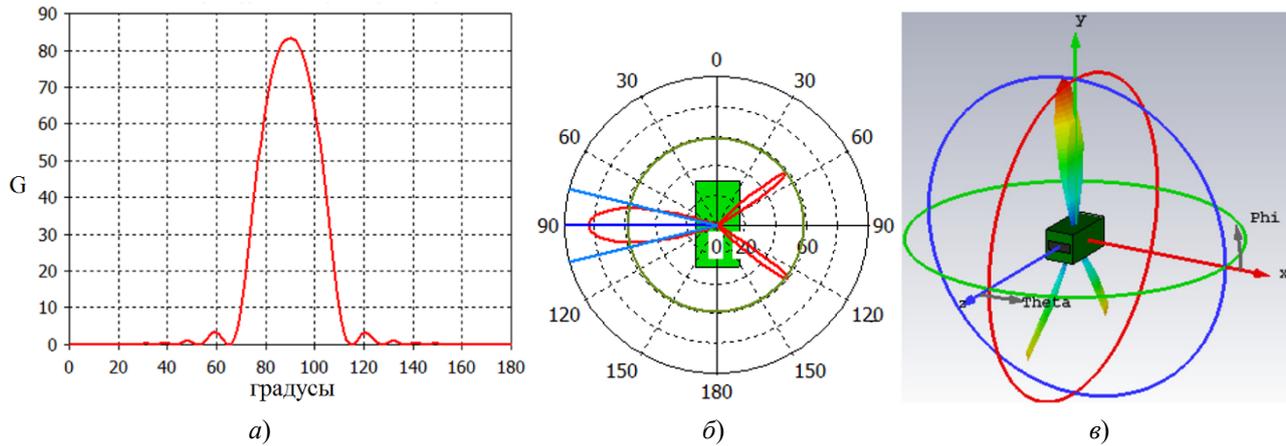


Рис. 10. ДН решетки ПГНА на резонансной частоте $f_{рез3}$ основной моды ППП и сканирование по частоте в среднем ИК-диапазоне:
a – в декартовой; *б* – полярной в *E*-плоскости (в зависимости от θ , при $\varphi = 0$ град.);
в – сферической системах координат; $N = 256$; $f_{рез3} = 20,715$ ТГц; $\mu_c = 1$ эВ;
 коэффициент усиления (амплитуда главного лепестка) $G = 83,3$,
 направление главного лепестка 90 град., $\Theta_{0,5} = 28,7$ град., уровень боковых лепестков $-1,5$ дБ

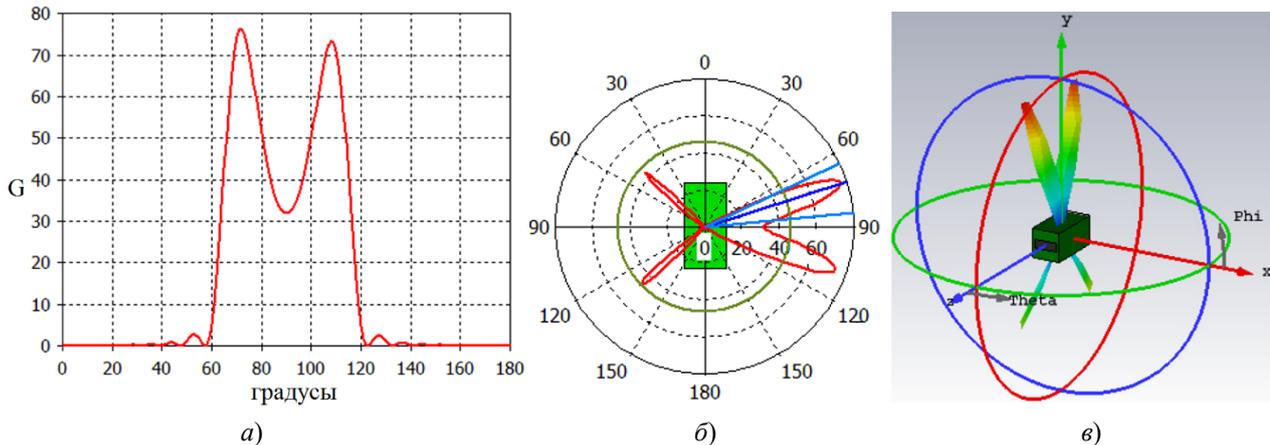


Рис. 11. ДН решетки ПГНА среднего ИК-диапазона:
a – в декартовой; *б* – полярной в *E*-плоскости (в зависимости от θ , при $\varphi = 0$ град.);
в – сферической системах координат; $N = 256$; $f_{рез}^2 = 22,335$ ТГц; $\mu_c = 0,3$ эВ;
 коэффициент усиления (амплитуда главного лепестка) $G = 76,3$,
 направление главного лепестка 72 град., $\Theta_{0,5} = 19,8$ град., уровень боковых лепестков $-2,1$ дБ

При переходе от резонансной частоты $f_{рез}^1$ основной моды ППП к резонансной частоте $f_{рез}^2$ второй моды ППП происходит изменение формы главного лепестка ДН (рис. 11). На резонансной частоте $f_{рез}^2$ второй моды ППП наблюдается резонанс электрического тока, создаваемого двумя стоячими полуволнами ППП вдоль широкой стороны прямоугольного графенового элемента [24], и, следовательно, имеется волновое распределение поверхностного электрического тока по длине графенового элемента. Форма главного лепестка ДН излучения, создаваемого этим волновым (по длине волны ППП) электрическим излучателем, 2-лучевая (рис. 11), и это изменение соответствует характеру изменения формы ДН симметричного вибратора при изменении его электрической длины [26].

Заключение

Из результатов моделирования решетки ПГНА среднего ИК-диапазона с помощью пакета прикладных программ CST Microwave Studio 2023 следует, что с увеличением химического потенциала μ_c от 0,5 до 1 эВ возрастает коэффициент усиления (амплитуда главного лепестка), происходит сужение главного лепестка ДН, уменьшение уровня боковых лепестков; с увеличением числа

единичных элементов N уровни боковых лепестков ДН уменьшаются, а также наблюдается лучшая управляемость главного лепестка ДН. Уровень главного лепестка на основном минимуме на частоте основного минимума $|S_{11}|$ при $\mu_c = 0,7$ эВ имеет максимальное значение, поскольку величина коэффициента отражения S_{11} минимальна (т.е. максимальный коэффициент прохождения S_{21}), следовательно, эффективность излучения возрастает.

Для реконфигурируемой решетки ПГНА показана возможность перестройки рабочих частот (сканирование по частоте) в среднем ИК-диапазоне и формирование 2-лучевой формы главного лепестка ДН путем изменения химического потенциала графена (при приложении внешнего электрического поля) без изменения их геометрии и размеров.

Исследованные решетки ПГНА среднего ИК-диапазона допускают динамическую реконфигурацию и изменение формы ДН посредством приложенного внешнего электрического поля и могут найти применение в визуализации, зондировании и спектроскопии, ИК-системах беспроводной связи, а также ИК сенсорных системах.

Список литературы

1. Zhaoyi Li, Nanfang Yu. Modulation of mid-infrared light using graphene-metal plasmonic antennas // *Applied Physics Letters*. 2013. Vol. 102. P. 131108. doi: 10.1063/1.4800931
2. Yousefi L., Foster A. C. Waveguide-fed optical hybrid plasmonic patch nano-antenna // *Optics Express*. 2012. Vol. 20, № 16. P. 18327–18335.
3. Hosseinijad S. E., Komjani N., Noghani M. T. A comparison of graphene and noble metals as conductors for plasmonic one-dimensional waveguides // *IEEE Transactions on Nanotechnology*. 2015. Vol. 14. P. 829–836.
4. Tamagnone M., Gomez-Diaz J. S., Mosig J. R., Perruisseau-Carrier J. Reconfigurable terahertz plasmonic antenna concept using a graphene stack // *Applied Physics Letters*. 2012. Vol. 101, № 21. P. 1–4.
5. Rodrigues N. R. N. M., de Oliveira R. M. S., Dmitriev V. Smart terahertz graphene antenna // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2018. Vol. 60, № 5. P. 26–40.
6. Lamri I. E., Ahmad S., Nakmouche M. F. [et al.]. Design and development of a graphene-based reconfigurable patch antenna array for THz applications // *Frequenz*. 2023. Vol. 77, № 3-4. P. 219–228. doi: 10.1515/freq-2022-0051
7. Jorner J. M., Akyildiz I. F. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band // *IEEE Trans. Wireless Commun.* 2011. Vol. 10, № 10. P. 3211–3221.
8. Shi L. P., Zhang Q. H., Zhang S. H. [et al.]. Efficient graphene reconfigurable reflectarray antenna electromagnetic response prediction using deep learning // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 22671–22678.
9. Perruisseau-Carrier J. Graphene for antenna applications: opportunities and challenges from microwaves to THz // 2012 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC). Loughborough, UK, LAPC, 2012. P. 1–4.
10. Ullah Z., Nawi I., Witjaksono G. [et al.]. Electrically enhanced graphene-metal plasmonic antenna for infrared sensing // *Optik*. 2021. Vol. 241. P. 166961. doi: 10.1016/j.ijleo.2021.166961
11. Mohanta J., Meher P. R., Mishra S. K. Nano-antennas Using Single and Double Isolated Graphene for Mid-infrared Applications // 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS-Spring). Rome, 2019. P. 4292–4299. doi: 10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017471
12. Dong Z., Sun C., Si J., Deng X. A tunable plasmonic nano-antenna based on metal – graphene double-nanorods // *Laser Phys. Lett.* 2018. Vol. 15. P. 056202.
13. Hajian H., Ghobadi A., Butun B. [et al.]. Tunable, omnidirectional, and nearly perfect resonant absorptions by a graphene-hBN- based hole array metamaterial // *Optics Express*. 2018. Vol. 26. P. 16940–16954.
14. Hosseinijad S. E., Neshat M., Faraji-dana R., Lemme M. Reconfigurable THz plasmonic antenna based on few-layer graphene with high radiation efficiency // *Nanomaterials*. 2018. Vol. 8. P. 577. doi: 10.3390/nano8080577
15. Baqir M. A., Choudhury P. K., Farmani A. [et al.]. A novel method to detect functional microRNA regulatory modules by bicliques merging // *IEEE/ACM Trans. Comput. Biol. Bioinforma.* 2016. Vol. 13. P. 549–556. doi: 10.1109/JPHOT.2019.2931586
16. Ullah Z., Nawi I., Witjaksono G. [et al.]. Dynamic absorption enhancement and equivalent resonant circuit modeling of tunable graphene-metal hybrid antenna // *Sensors*. 2020. Vol. 20. P. 3187.
17. Wu P. C., Pala R. A., Kafae Shirmanesh G. [et al.]. Dynamic beam steering with all-dielectric electro-optic III–V multiple-quantum-well metasurfaces // *Nat. Commun.* 2019. Vol. 10. P. 1–9. doi: 10.1038/s41467-019-11598-8
18. Bandurin D. A., Svintsov D., Gayduchenko I. [et al.]. Resonant terahertz detection using graphene plasmons // *Nat. Commun.* 2018. Vol. 9. P. 4–11. doi: 10.1038/s41467-018-07848-w
19. Sherrott M. C., Hon P. W. C., Fountaine K. T. [et al.]. Experimental demonstration of $>230^\circ$ phase modulation in gate-tunable graphene-gold reconfigurable mid-infrared metasurfaces // *Nano Lett.* 2017. Vol. 17. P. 3027–3034. doi: 10.1021/acs.nanolett.7b00359
20. CST Microwave Studio 2023. URL: <https://www.3ds.com/products/simulia>

21. Курушин А. А. Школа проектирования СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE. М. : One-Book, 2014. 433 с.
22. Hanson G. W. Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene // *J. of Appl. Phys.* 2008. Vol. 103. P. 064302.
23. Голованов О. А., Макеева Г. С., Вареница В. В. Проводимость графена в терагерцовом и инфракрасном диапазонах частот // *Надежность и качество сложных систем.* 2014. № 4 (8). С. 26–33.
24. Лерер А. М., Макеева Г. С. Поляризационные эффекты и резонансное поглощение при дифракции терагерцовых волн на графеновых метаповерхностях // *Оптика и спектроскопия.* 2018. Т. 125, вып. 6. С. 838–843.
25. Голованов О. А., Макеева Г. С., Ринкевич А. Б. Взаимодействие электромагнитных волн с периодически решетками микро- и нанолент графена в терагерцовом диапазоне // *Журнал технической физики.* 2016. Т. 86, вып. 2. С. 119–126.
26. Драбкин А. Л., Зузенко В. Л. Антенно-фидерные устройства. М. : Сов. радио, 1961. 816 с.

References

1. Zhaoyi Li, Nanfang Yu. Modulation of mid-infrared light using graphene-metal plasmonic antennas. *Applied Physics Letters.* 2013;102:131108. doi: 10.1063/1.4800931
2. Yousefi L., Foster A.C. Waveguide-fed optical hybrid plasmonic patch nano-antenna. *Optics Express.* 2012;20(16):18327–18335.
3. Hosseininejad S.E., Komjani N., Noghani M.T. A comparison of graphene and noble metals as conductors for plasmonic one-dimensional waveguides. *IEEE Transactions on Nanotechnology.* 2015;14:829–836.
4. Tamagnone M., Gomez-Diaz J.S., Mosig J.R., Perruisseau-Carrier J. Reconfigurable terahertz plasmonic antenna concept using a graphene stack. *Applied Physics Letters.* 2012;101(21):1–4.
5. Rodrigues N.R.N.M., de Oliveira R.M.S., Dmitriev V. Smart terahertz graphene antenna. *IEEE Antennas and Propagation Magazine.* 2018;60(5):26–40.
6. Lamri I.E., Ahmad S., Nakmouche M.F. et al. Design and development of a graphene-based reconfigurable patch antenna array for THz applications. *Frequenz.* 2023;77(3-4):219–228. doi: 10.1515/freq-2022-0051
7. Jornet J.M., Akyildiz I.F. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band. *IEEE Trans. Wireless Commun.* 2011;10(10):3211–3221.
8. Shi L.P., Zhang Q.H., Zhang S.H. et al. Efficient graphene reconfigurable reflectarray antenna electromagnetic response prediction using deep learning. *IEEE Access.* 2021;9:22671–22678.
9. Perruisseau-Carrier J. Graphene for antenna applications: opportunities and challenges from microwaves to THz. *2012 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC).* Loughborough, UK, LAPC, 2012:1–4.
10. Ullah Z., Nawi I., Witjaksono G. et al. Electrically enhanced graphene-metal plasmonic antenna for infrared sensing. *Optik.* 2021;241:166961. doi: 10.1016/j.ijleo.2021.166961
11. Mohanta J., Meher P.R., Mishra S.K. Nano-antennas Using Single and Double Isolated Graphene for Mid-infrared Applications. *2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS-Spring).* Rome, 2019:4292–4299. doi: 10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017471.
12. Dong Z., Sun C., Si J., Deng X. A tunable plasmonic nano-antenna based on metal – graphene double-nanorods. *Laser Phys. Lett.* 2018;15:056202.
13. Hajian H., Ghobadi A., Butun B. et al. Tunable, omnidirectional, and nearly perfect resonant absorptions by a graphene-hBN- based hole array metamaterial. *Optics Express.* 2018;26:16940–16954.
14. Hosseininejad S.E., Neshat M., Faraji-dana R., Lemme M. Reconfigurable THz plasmonic antenna based on few-layer graphene with high radiation efficiency. *Nanomaterials.* 2018;8:577. doi: 10.3390/nano8080577
15. Baqir M.A., Choudhury P.K., Farmani A. et al. A novel method to detect functional microRNA regulatory modules by bicliques merging. *IEEE/ACM Trans. Comput. Biol. Bioinforma.* 2016;13:549–556. doi: 10.1109/JPHOT.2019.2931586
16. Ullah Z., Nawi I., Witjaksono G. et al. Dynamic absorption enhancement and equivalent resonant circuit modeling of tunable graphene-metal hybrid antenna. *Sensors.* 2020;20:3187.
17. Wu P.C., Pala R.A., Kafaie Shirmanesh G. et al. Dynamic beam steering with all-dielectric electro-optic III–V multiple-quantum-well metasurfaces. *Nat. Commun.* 2019;10:1–9. doi: 10.1038/s41467-019-11598-8
18. Bandurin D.A., Svintsov D., Gayduchenko I. et al. Resonant terahertz detection using graphene plasmons. *Nat. Commun.* 2018;9:4–11. doi: 10.1038/s41467-018-07848-w
19. Sherrott M.C., Hon P.W.C., Fountaine K.T. et al. Experimental demonstration of >230° phase modulation in gate-tunable graphene-gold reconfigurable mid-infrared metasurfaces. *Nano Lett.* 2017;17:3027–3034. doi: 10.1021/acs.nanolett.7b00359
20. *CST Microwave Studio 2023.* Available at: <https://www.3ds.com/products/simulia>
21. Kurushin A.A. *Shkola proektirovaniya SVCh ustroystv v CST STUDIO SUITE = School of microwave device design in CST STUDIO SUITE.* Moscow: One-Book, 2014:433. (In Russ.)
22. Hanson G.W. Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene. *J. of Appl. Phys.* 2008;103:064302.

23. Golovanov O.A., Makeeva G.S., Varenitsa V.V. Graphene conductivity in terahertz and infrared frequency ranges. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(4):26–33. (In Russ.)
24. Lerer A.M., Makeeva G.S. Polarization effects and resonant absorption in the diffraction of terahertz waves on graphene metasurfaces. *Optika i spektroskopiya = Optics and spectroscopy*. 2018;125(6):838–843. (In Russ.)
25. Golovanov O.A., Makeeva G.S., Rinkevich A.B. Interaction of electromagnetic waves with periodic lattices of micro- and nanofilaments of graphene in the terahertz range. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Journal of Technical Physics*. 2016;86(2):119–126. (In Russ.)
26. Drabkin A.L., Zuzenko V.L. *Antenno-fidernye ustroystva = Antenna-feeder devices*. Moscow: Sov. radio, 1961:816. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Галина Степановна Макеева

доктор технических 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 technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of radio engineering and radio-electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /

The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 16.06.2024

Поступила после рецензирования/Revised 26.07.2024

Принята к публикации/Accepted 31.08.2024