

УДК 621.371.334:537.874.6
doi: 10.21685/2072-3040-2024-3-8

Электронное управление направленными свойствами реконфигурируемых плазмонных антенных решеток на основе графена с частотным сканированием в среднем инфракрасном диапазоне

Г. С. Макеева

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Антенны, работающие в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне, могут играть решающую роль в продвижении открытий и инноваций для таких применений, как беспроводная ИК-связь, визуализация и формирование изображений, дистанционное зондирование, в том числе экологическое и биологическое, дистанционное обнаружение, сканирование безопасности, биомедицинские приложения, астрономия, IoT (интернет вещей) и сенсоры. Целью работы является исследование с помощью программного комплекса CST MWS 2023 электронного управления направленными свойствами реконфигурируемых плазмонных графеновых антенных решеток (АР) – основным лучом диаграммы направленности (ДН) путем электрической перестройки частоты при изменении химического потенциала графена (приложением внешнего электрического поля), сканирование ДН и изменение формы и параметров ДН в среднем ИК-диапазоне. *Материалы и методы.* В среднем ИК-диапазоне графен демонстрирует плазмоноподобную комплексную поверхностную проводимость с малыми потерями, что обеспечивает большой потенциал для разработки перестраиваемых АР этого диапазона. Исследования по применению поверхностных плазмон-поляритонов в графене сосредоточены на диапазонах от терагерцового до среднего ИК, так как современные технологии позволяют уменьшить ширину графеновых нанолент только до такой степени, что они могут возбуждать плазмонные колебания в среднем ИК-диапазоне. Для решения электродинамической задачи с помощью программы CST MWS 2023, предназначенной для численного моделирования высокочастотных антенн и устройств, используется метод аппроксимации для идеальных граничных условий (Perfect Boundary Approximation, PBA), дополняющий метод конечных интегралов (Finite Integration Technique, FIT), работающий во временной области. *Результаты.* Получены результаты электродинамического моделирования управляемости ДН плазмонных графеновых АР с различным числом излучателей ($N = 16, 64, 256$) и электронного сканирования по частоте на резонансных частотах основной моды поверхностных плазмон-поляритонов в среднем ИК-диапазоне при изменении значения химического потенциала μ_c (0,3–1 эВ) и их зависимости от геометрических размеров графеновых элементов и периодов АР. *Выводы.* В результате электродинамического моделирования показана возможность эффективного электронного управления ДН плазмонных графеновых АР в режиме сканирования в среднем ИК-диапазоне при изменении химического потенциала графена ($\mu_c = 0,3$ –1 эВ): изменение направления главного лепестка ДН, при этом достижимый сектор углов сканирования подтверждает эффективность управления лучом; уменьшение ширины ДН по уровню половинной мощности и уровня боковых лепестков; возрастание эффективности излучения и, как следствие, увеличение коэффициента усиления.

Ключевые слова: плазмонная графеновая антенная решетка, средний инфракрасный диапазон, поверхностные плазмон-поляритоны, диаграмма направленности

© Макеева Г. С., 2024. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Makeeva G. S. Электронное управление направленными свойствами реконфигурируемых плазмонных антенных решеток на основе графена с частотным сканированием в среднем инфракрасном диапазоне // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2024. № 3. С. 86–106. doi: 10.21685/2072-3040-2024-3-8

Electronic control of directional properties of reconfigurable plasmonic graphene-based antenna arrays with frequency scanning in the mid-IR range

G.S. Makeeva

Penza State University, Penza, Russia

radiotech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* Mid-IR antennas can play a critical role in advancing discoveries and innovations for applications such as IR wireless communications, imaging and visualization, remote sensing including environmental and biological, remote sensing, security scanning, biomedical applications and astronomy, IoT (Internet of Things) and sensors. The purpose of the work is to study using the CST MWS 2023 software package the electronic control of the directional properties of reconfigurable plasmonic graphene antenna arrays, i.e. the main beam of the radiation pattern (RP), by using electrical frequency tunability by changing the chemical potential of graphene (by applying an external electric field), scanning the RP and changing the shape and parameters of the RP in the mid-IR range. *Materials and methods.* In the mid-IR range graphene exhibits plasmonic-like complex surface conductivity with low losses, which provides great potential for the development of tunable antenna arrays in this range. Research on the application of surface plasmon polaritons (SPPs) in graphene is focused on the ranges from THz to mid-IR, since current technologies allow reducing the width of graphene nanoribbons only to such an extent that they can excite plasmonic oscillations in the mid-IR range. To solve the electrodynamic problem using the CST MWS 2023 program, designed for numerical modeling of high-frequency antennas and devices, the Perfect Boundary Approximation (PBA) method is used, complementing the Finite Integration Technique (FIT) method, which works in the time domain. *Results.* The results of electrodynamic modeling of the controllability of the RP of plasmonic graphene antenna arrays with different numbers of emitters and electronic frequency scanning at the resonant frequencies of the fundamental SPP mode in the mid-IR range were obtained with a change in the value of the chemical potential μ_c (0.3 - 1 eV) and their dependence on the geometric dimensions of the graphene elements and the antenna array periods. *Conclusions.* As a result of electrodynamic modeling, the possibility of effective electronic control of RP of the plasmonic graphene antenna arrays in the scanning regime in the mid-IR range with a change in the chemical potential of graphene ($\mu_c = 0.3 - 1$ eV) is shown: a change in the direction of the main lobe of the RP, while the achievable sector of the scanning angles confirms the efficiency of beam control; a decrease in the width of the RP at the half-power level and the level of side lobes; an increase in the radiation efficiency and, as a consequence, an increase in the gain.

Keywords: plasmonic graphene antenna array, mid-infrared range, surface plasmon polaritons, radiation pattern

For citation: Makeeva G.S. Electronic control of directional properties of reconfigurable plasmonic graphene-based antenna arrays with frequency scanning in the mid-IR range. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences.* 2024;(3):86–106. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3040-2024-3-8

Введение

В последние годы терагерцовый (ТГц) и средний инфракрасный (ИК) диапазоны частот вызвали интерес ряда индустрий для таких применений, как беспроводная связь, визуализация и дистанционное зондирование [1].

Антенны и активные устройства, работающие в среднем ИК-диапазоне, могут играть решающую роль в продвижении открытий и инноваций для многих приложений в области экологического и биологического зондирования, дистанционного обнаружения и астрономии [2].

Излучение среднего и ближнего ИК-диапазонов выбирают в качестве идеальной основы для проектирования систем оптоэлектроники. При этом удержание (конфайнмент) излучения среднего и ближнего ИК-диапазонов на наноуровне является одной из основных задач фотоники. Этот спектральный диапазон также очень важен в оптических телекоммуникациях и в приложениях биофотоники [3].

Плазмонные антенны позволили реализовать такие применения, как улучшение детектирования и излучения, микроскопия и спектроскопия с усиленным полем, запоминающие устройства оптических данных, биохимическое зондирование, нанофотонные интегральные схемы и оптические метаповерхности [4]. Отклик плазмонных антенн в ближнем и дальнем полях можно перестроить с помощью проектирования геометрических параметров, однако динамический контроль делает их оптические свойства особенно перспективными [4].

Элементы, которые изготавливаются из обычных металлов, не могут быть динамически перестроены после изготовления. 2D-материал графен обладает зависящей от химического потенциала комплексной проводимостью, которую можно перестроить электростатическим смещением [1]. Это уникальное свойство побудило исследователей для изучения различных приложений на основе графена [1].

Графен демонстрирует зависимость проводимости от напряжения на затворе и может использоваться в качестве электрически перестраиваемого плазмонного материала [4].

Чтобы уменьшить потери, существующие в металлических антеннах, предлагается использование графена для получения минимальных потерь в ТГц-диапазоне. Его проводимость может изменяться, и графен может вести себя как полупроводник или металл, что делает его отличным выбором для ТГц-приложений, таких как визуализация, спектроскопия, системы беспроводной связи [5].

Более того, в среднем ИК-диапазоне графен демонстрирует плазмоноподобную комплексную поверхностную проводимость с малыми потерями, что обеспечивает большой потенциал для разработки перестраиваемых антенных решеток (АР) среднего ИК-диапазона [1].

Поверхностные плазмон-поляритоны (ППП), поддерживаемые графеном, имеют иные характеристики, чем ППП благородных металлов: это возможность перестройки с помощью электростатического стробирования или химического легирования. Графеновые ППП обладают сильным пространственным ограничением излучения (на два и даже четыре порядка величины выше, чем ППП металлов) и уникальными свойствами, такими как перестройка электрическим, магнитным и световым полями, а также существованием новых мод поляризации [6].

Частота плазмонного резонанса ω_p в графеновой наноструктуре определяется соотношением [6]:

$$\omega_p \propto (\mu_c/D)^{1/2},$$

где μ_c – химический потенциал (уровень Ферми) графена; D – характерный размер графеновой наноструктуры.

Следовательно, потенциальный способ расширить исследования по применению графеновых ППП до ближнего ИК-диапазона и даже видимого диапазона – это постоянное уменьшение размера графеновой наноструктуры [6]. До сих пор самая короткая длина волны падающего излучения для возбуждения локализованного ППП наблюдалась при длине волны 2 мкм в графеновых нанодисках диаметром 18 нм [6]. Однако трудности, с которыми сталкивается этот подход (дальнейшее уменьшение размера), заключаются в более сложных процессах подготовки, уменьшении подвижности носителей (в ~10 и более раз, чем у больших листов 2D-графена) и увеличении количества дефектов, связанных с изготовлением краев графеновой наноструктуры [6].

Текущие исследования по применению графеновых ППП сосредоточены на диапазонах от ТГц до среднего ИК, так как современные технологии позволяют уменьшить ширину графеновых нанолент (или наноструктур другой формы) только до такой степени, что они могут возбуждать плазмонные колебания в среднем ИК-диапазоне [6].

Графеновые ППП в основном наблюдались в лентах микронного масштаба, где частота плазмонного резонанса ω_p контролируется либо параметрами ленты, либо электронным стробированием. Универсальность графена вместе с возможностью перестройки ППП делает графеновые структуры отличным кандидатом для плазмонных устройств и антенн следующего поколения с приложениями в сверхбыстродействующей электронике, визуализации и квантовых технологиях от ТГц- до ИК-диапазона [7].

Оптические фазированные АР являются важными оптическими элементами в приложениях, требующих возможности манипулировать фронтом волны, таких как фокусировка луча и управление излучением. Для миниатюризации оптических компонентов в качестве компетентной альтернативы используются активные метаповерхности, особенно метаповерхности графена [8].

Реконфигурируемые антенны в последнее время применяются в аэрокосмических системах связи и СВЧ-радиолокации, когда требуются широкая полоса рабочих частот и возможность изменения конфигурации для реализации различных функций радиотехнической системы [9].

Важные научные проблемы, связанные с проектированием фазированных АР, позволяют решать современные программные комплексы электродинамического моделирования Microwave Studio (CST MWS) и HFSS [10].

В программе CST MWS [11], предназначенной для численного моделирования СВЧ-антенн и устройств [12–15], используется разработанный компанией CST метод аппроксимации для идеальных граничных условий (Perfect Boundary Approximation, PBA), дополняющий метод конечных интегралов (Finite Integration Technique, FIT) [3], работающий во временной области. Программный комплекс электродинамического моделирования CST MWS позволяет проводить оптимизацию АР по критериям направленности и эффективности [16].

В этой связи актуальной является задача исследования методами электродинамического моделирования с помощью современных программных комплексов электронного управления направленными свойствами реконфигурируемых плазмонных графеновых АР – основным лучом диаграммы направленности (ДН) путем электрической перестройки частоты при изменении химического потенциала графена (приложением внешнего электрического поля), а также сканирование ДН и изменение формы и параметров ДН в среднем ИК-диапазоне.

1. Результаты электродинамического моделирования характеристик единичного элемента АР – плазмонной графеновой антенны в среднем ИК-диапазоне

На первом этапе с помощью программного комплекса CST MWS 2023 [11] проведено электродинамическое моделирование характеристик единичного элемента АР среднего ИК-диапазона – плазмонной графеновой антенны (ПГА). На рис. 1 представлена модель ПГА, разработанная в CST MWS 2023 [11, 15], которая состоит из графенового элемента квадратной геометрии (графеновой наноленты конечной длины с размерами $l = w$ порядка десятков нанометров), расположенного на металлизированной диэлектрической подложке (диоксид кремния SiO_2 , диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 2,2$) с геометрическими размерами a, b, h . Эта модель с возбуждением дискретным портом использована для решения электродинамической задачи с помощью программы CST MWS 2023 методом аппроксимации для идеальных граничных условий (Perfect Boundary Approximation, PBA), дополняющим метод конечных интегралов (Finite Integration Technique, FIT), работающим во временной области [15].

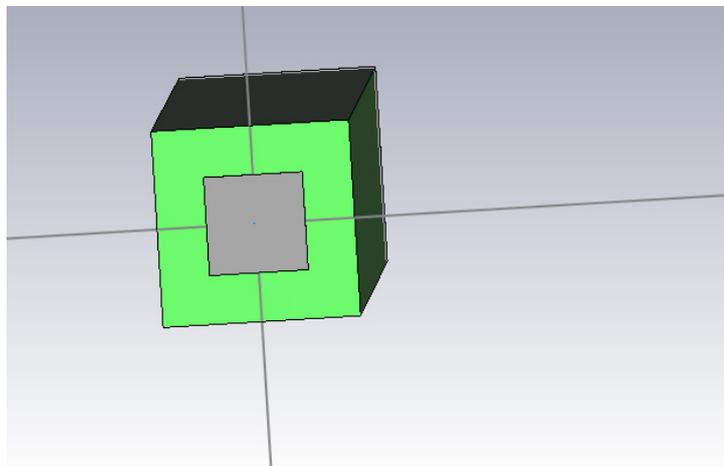


Рис. 1. Модель единичного элемента АР – ПГА квадратной геометрии с металлизированной диэлектрической подложкой, возбуждаемой дискретным портом, в программном комплексе CST MWS 2023

Проведен электродинамический расчет частотных зависимостей элемента матрицы рассеяния $|S_{11}|$ – коэффициента отражения на входе ПГА (с геометрическими размерами $l = w = 60$ нм, $a = b = 200$ нм, $h = 1$ мкм) для

различных значений химического потенциала графена ($\mu_c = 0,4; 0,7; 0,85; 1$ эВ) в среднем ИК-диапазоне, результаты которого представлены на рис. 2. Графен имеет следующие параметры: температура $T = 300$ К, параметр рассеяния $\tau = 1$ пс [17].

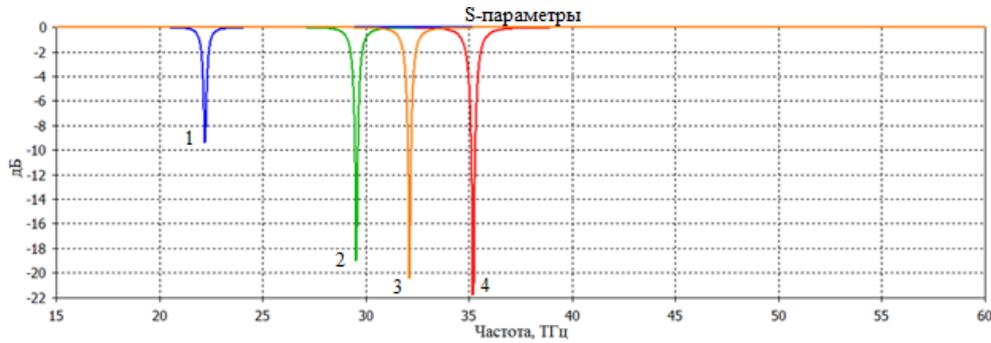


Рис. 2. Частотные зависимости элемента матрицы рассеяния $|S_{11}|$ ПГА в среднем ИК-диапазоне для различных значений химического потенциала μ_c :
 1 – $\mu_c = 0,4$ эВ; 2 – $0,7$ эВ; 3 – $0,85$ эВ; 4 – 1 эВ; $l = w = 60$ нм; $a = b = 200$ нм;
 $h = 1$ мкм; $T = 300$ К; $\tau = 1$ пс

Из результатов расчета следует, что частотная зависимость коэффициента отражения $|S_{11}|$ имеет минимумы (рис. 2), их положение и значение управляются изменением химического потенциала в широком интервале частот среднего ИК-диапазона. Эти минимумы $|S_{11}|$ обусловлены резонансами основной моды ППП и мод ППП высшего порядка в графеновом элементе (графеновой наноленте конечной длины) [18, 19].

Графен поддерживает плазмонные колебания – ППП, которые позволяют значительно увеличить сильно локализованное поле и вызывают относительно долгоживущие, активно перестраиваемые плазмонные резонансы в ТГц- и ИК-диапазонах [20].

Резонансные размеры графенового элемента определяются длиной волны ППП и из-за большого коэффициента замедления ППП на много меньше длины волны в вакууме [19]. В ограниченном графеновом элементе наблюдается резонанс ППП, при котором резко возрастают поглощение и плотность тока, так как поля на резонансной частоте могут быть жестко ограничены и значительно увеличены вдоль поверхности нанолент графена за счет возбуждения сильно локализованных ППП. Этот эффект используется в ряде ТГц-устройств, в том числе поглощающих графеновых метаповерхностях [18, 19] и ПГА [4, 5, 8].

Минимумы коэффициента отражения $|S_{11}|$ обусловлены максимумами коэффициента поглощения на частотах плазмонных резонансов $f_{рез}$ основной и высших мод ППП, возбуждаемых в графеновом элементе, зависящих от размеров элемента и поляризации падающей волны [18]. На каждой из кривых (рис. 2) первый минимум $|S_{11}|$ соответствует резонансу основной моды ППП.

Как следует из результатов (рис. 2), по мере увеличения химического потенциала μ_c ($0,4$ – 1 эВ) частота плазмонного резонанса сдвигается в сторону более высоких частот среднего ИК-диапазона. В интервале значений химиче-

ского потенциала $\mu_c = 0,7-1$ эВ коэффициент отражения $|S_{11}|$ имеет минимальные значения, так как фактор качества (добротность) резонанса и, следовательно, эффективность поглощения возрастают [19].

Так как при плазмонном резонансе резко возрастает поверхностный электрический ток на графеновой наноленте [18], то это приводит к эффективности процесса излучения на резонансных частотах $f_{рез}$ мод ППП, определяющих рабочие частоты ПГА.

Из рис. 2 видна значительная перестройка по частоте минимума $|S_{11}|$ в среднем ИК-диапазоне при изменении химического потенциала μ_c в интервале значений (0,4–1 эВ): резонансы основной моды ППП при s -поляризации волны, возбуждаемой дискретным портом, наблюдаются на частотах $f_1^{s1} = 22,2$ ТГц, $\mu_c = 0,4$ эВ; $f_2^{s1} = 29,35$ ТГц, $\mu_c = 0,7$ эВ; $f_p^{s1} = 32,1$ ТГц; $\mu_c = 0,85$ эВ; $f_3^{s1} = 35,16$ ТГц, $\mu_c = 1$ эВ. Положению каждого минимума коэффициента отражения $|S_{11}|$ (максимума коэффициента поглощения [18]) соответствует определенная частота эффективного излучения ПГА, т.е. рабочая частота ПГА также изменяется при различных значениях химического потенциала μ_c графена.

Из результатов (см. рис. 2) следует, что коэффициент отражения $|S_{11}|$ на входе ПГА имеет минимальное значение -22 дБ на резонансной частоте основной моды ППП $f_3^{s1} = 35,16$ ТГц, $\mu_c = 1$ эВ, следовательно коэффициент поглощения имеет максимальное значение [18], а значит, эффективность излучения ПГА максимальна в этой оптимальной рабочей точке.

ППП в графене могут быть использованы как средство усиления взаимодействия излучения с веществом в ТГц- и ИК-диапазонах в перестраиваемом режиме [18–21], обеспечивая частотное сканирование ПГА.

Результаты электродинамического моделирования с помощью программы CST MWS 2023 [11] ДН единичного элемента AP – ПГА (с размерами $l = w = 60$ нм, $a = b = 200$ нм, $h = 1$ мкм) на резонансных частотах основной моды ППП f_1^{s1} , f_2^{s1} , f_3^{s1} и сканирование по частоте в среднем ИК-диапазоне при изменении химического потенциала μ_c (0,4; 0,7; 1 эВ) приведены на рис. 3.

Результаты (рис. 3) демонстрируют электрически перестраиваемый режим ПГА (электронное сканирование по частоте) на резонансных частотах $f_{рез}^{s1}$ основной моды ППП в интервале частот $f = 22,2-35,16$ ТГц среднего ИК-диапазона при изменении химического потенциала в интервале значений $\mu_c = 0,4-1$ эВ (приложением внешнего электрического поля).

На резонансных частотах f_1^{s1} , f_2^{s1} , f_3^{s1} основной моды ППП при s -поляризации волны, возбуждаемой дискретным портом, наблюдается плазмонный резонанс (резонанс электрического тока, создаваемого одной стоячей полуволной ППП вдоль стороны графенового элемента квадратной геометрии) и, следовательно, полуволновое распределение поверхностного электрического тока j_s с максимумом в центре.

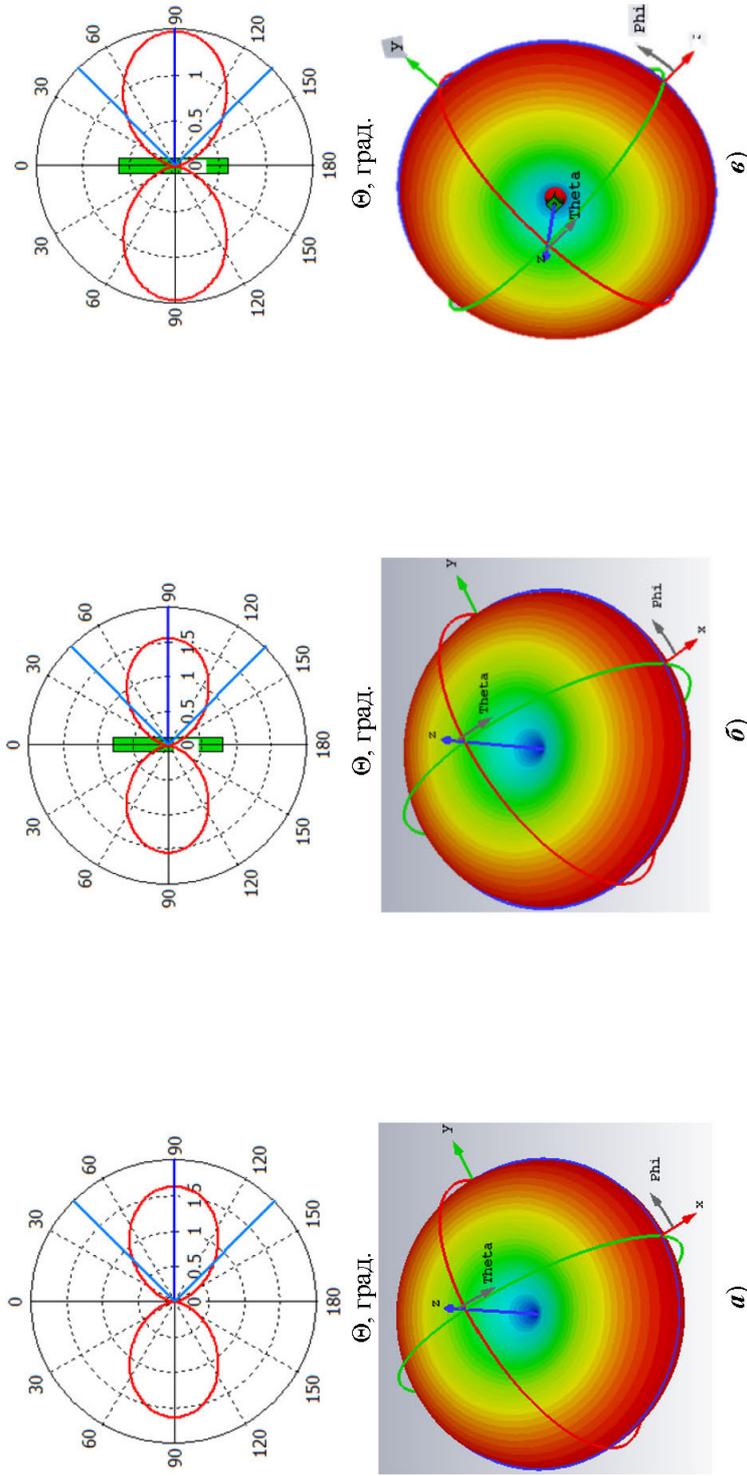


Рис. 3. ДН ПГА на резонансных частотах $f_{рез}^{sl}$ основной моды ППП и сканирование по частоте в среднем ИК-диапазоне при изменении значения химического потенциала μ_c : 2D ДН в E -плоскости (в зависимости от θ , $\varphi = 90^\circ$) в полярной (сверху) и 3D ДН в сферической (снизу) системах координат; **a** – $f_1^{sl} = 22,2$ ТГц, $\mu_c = 0,4$ эВ; $G = 1,62$; направление главного лепестка ДН $\Theta_1 = 90^\circ$; ширина ДН по уровню половинной мощности $\Theta_{0,5} = 89,4^\circ$; **b** – $f_2^{sl} = 29,35$ ТГц, $\mu_c = 0,7$ эВ; $G = 1,54$; $\Theta_1 = 90^\circ$; $\Theta_{0,5} = 89$ град.; **e** – $f_3^{sl} = 35,16$ ТГц, $\mu_c = 1$ эВ; $G = 1,54$; $\Theta_1 = 90^\circ$; $\Theta_{0,5} = 88,8^\circ$; $l = w = 60$ нм, $a = b = 200$ нм, $h = 1$ мкм

Форма 3D ДН излучения, создаваемого этим полуволновым (по длине волны ППП) электрическим излучателем, тороидальная (рис. 3,б). Ось 2D ДН в экваториальной плоскости, т.е. в E -плоскости (в зависимости от θ , $\varphi = 90^\circ$), ориентирована параллельно относительно возбуждающего электрического тока (рис. 3,б) и ДН соответствует форме полуволнового симметричного вибратора [22].

При увеличении химического потенциала μ_c (0,4–1 эВ) частота плазмонного резонанса и, следовательно, рабочие частоты ПГА перестраиваются в сторону более высоких частот среднего ИК-диапазона.

2. Результаты электродинамического моделирования электронного управления ДН плазмонных графеновых АР с различным числом излучателей в среднем ИК-диапазоне

Результаты электродинамического моделирования управляемости ДН плазмонной графеновой АР ($l = w = 60$ нм, $a = b = 200$ нм, $h = 1$ мкм) с числом излучателей 4×4 ($N = 16$) и сканирование по частоте в среднем ИК-диапазоне при изменении значения химического потенциала μ_c (0,4; 0,7; 1 эВ) приведены на рис. 4.

Из результатов (рис. 4) следует, что при изменении химического потенциала в интервале значений $\mu_c = 0,4$ –1 эВ характеристики данной плазмонной графеновой АР ($N = 16$) изменяются следующим образом: незначительно возрастает коэффициент усиления G (амплитуда главного лепестка ДН) с $G = 2,44$ при $f_2^{s1} = 29,35$ ТГц, $\mu_c = 0,7$ эВ до $G = 2,56$ (максимальное значение при $f_3^{s1} = 35,16$ ТГц, $\mu_c = 1$ эВ), несколько уменьшаются ширина ДН по уровню половинной мощности $\Theta_{0,5} = 82,9 \dots 80,1^\circ$ и уровень боковых лепестков $\alpha = -4,6 \dots -6,8$ дБ.

Результаты моделирования управляемости ДН плазмонной графеновой АР ($l = w = 60$ нм, $a = b = 200$ нм, $h = 1$ мкм) с числом излучателей 16×16 ($N = 256$) и сканирование по частоте в среднем ИК-диапазоне при изменении значения химического потенциала μ_c (0,4; 0,7; 1 эВ) приведены на рис. 5.

Результаты (рис. 5) демонстрируют возможность электронного управления ДН плазмонной графеновой АР ($N = 256$) и частотное сканирование на резонансных частотах $f_{рез}^{s1}$ основной моды ППП в интервале частот $f = 22,2$ –35,16 ТГц среднего ИК-диапазона при изменении химического потенциала μ_c (0,4–1 эВ) (приложением внешнего электрического поля).

Из результатов (рис. 5) следует, что при увеличении химического потенциала μ_c (0,4–1 эВ) характеристики данной плазмонной графеновой АР ($N = 256$) с электрическим типом сканирования изменяются следующим образом: возрастает эффективность излучения и, как следствие, увеличивается коэффициент усиления G (амплитуда главного лепестка ДН) с $G = 15,7$ при $f_1^{s1} = 22,2$ ТГц, $\mu_c = 0,4$ эВ до $G = 64,3$ (максимальное значение), при $f_3^{s1} = 35,16$ ТГц, $\mu_c = 1$ эВ, при этом происходит уменьшение ширины ДН по уровню половинной мощности $\Theta_{0,5}$ с $23,9^\circ$ до $15,6^\circ$, т.е. сужение главного лепестка ДН, и уменьшение уровня боковых лепестков $\alpha = -1,7 \dots -3,5$ дБ, т.е. эффективное электронное управление ДН АР.

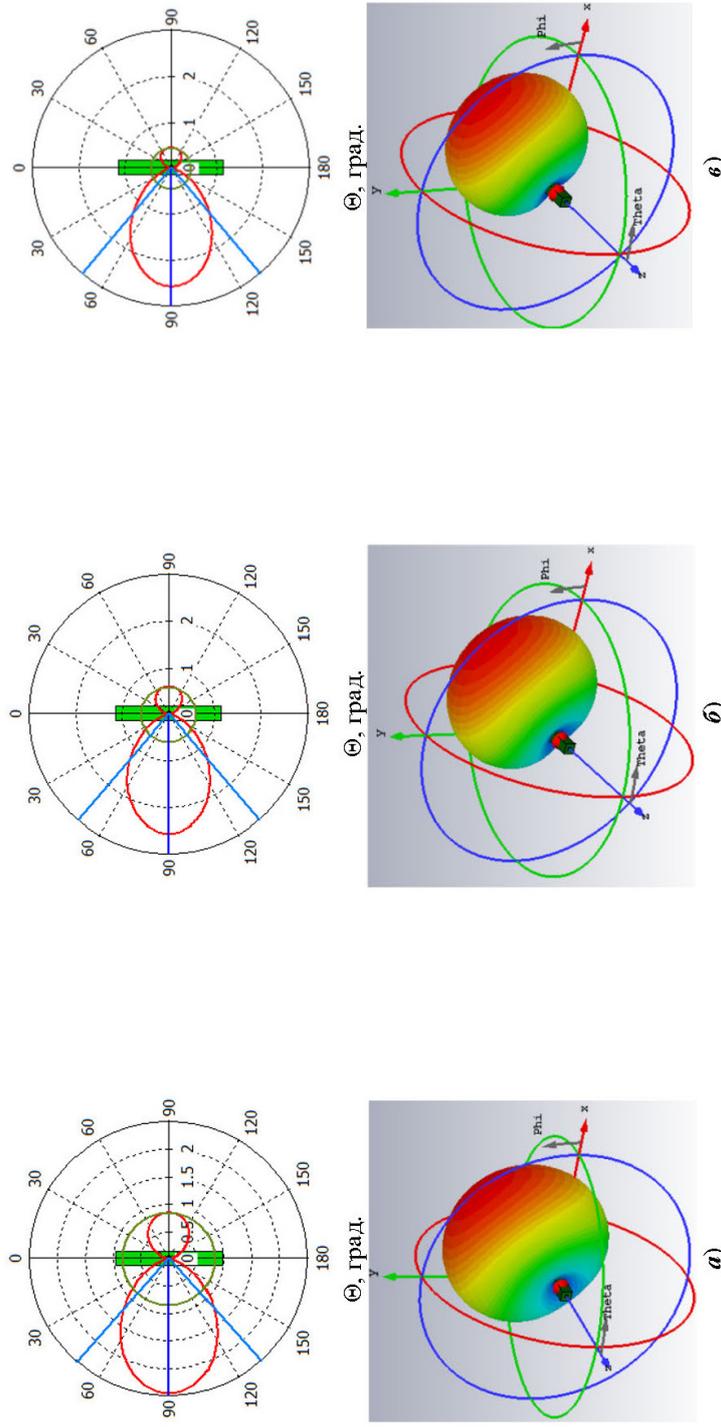


Рис. 4. Управляемость ДН плазменной графеновой АР ($N = 16$) в режиме сканирования на резонансных частотах $f_{рез}^{s1}$ основной моды ППП в среднем ИК-диапазоне при изменении значения химического потенциала μ_c : 2D ДН в E -плоскости (в зависимости от θ , $\varphi = 90^\circ$) в полярной (сверху) и 3D ДН в сферической (снизу) системах координат; $\mathbf{a} - f_1^{s1} = 22,2$ ТГц, $\mu_c = 0,4$ эВ; $G = 2,44$; $\Theta_1 = 90^\circ$; $\Theta_{0,5} = 82,9^\circ$; уровень боковых лепестков $\alpha = -4,6$ дБ; $\mathbf{б} - f_2^{s1} = 29,35$ ТГц, $\mu_c = 0,7$ эВ; $G = 2,54$; $\Theta_1 = 90^\circ$; $\Theta_{0,5} = 81,2^\circ$; $\alpha = -6,2$ дБ; $\mathbf{в} - f_3^{s1} = 35,16$ ТГц, $\mu_c = 1$ эВ; $G = 2,56$; $\Theta_1 = 90^\circ$; $\Theta_{0,5} = 80,7^\circ$; $\alpha = -6,8$ дБ; $l = w = 60$ нм, $a = b = 200$ нм, $h = 1$ мкм

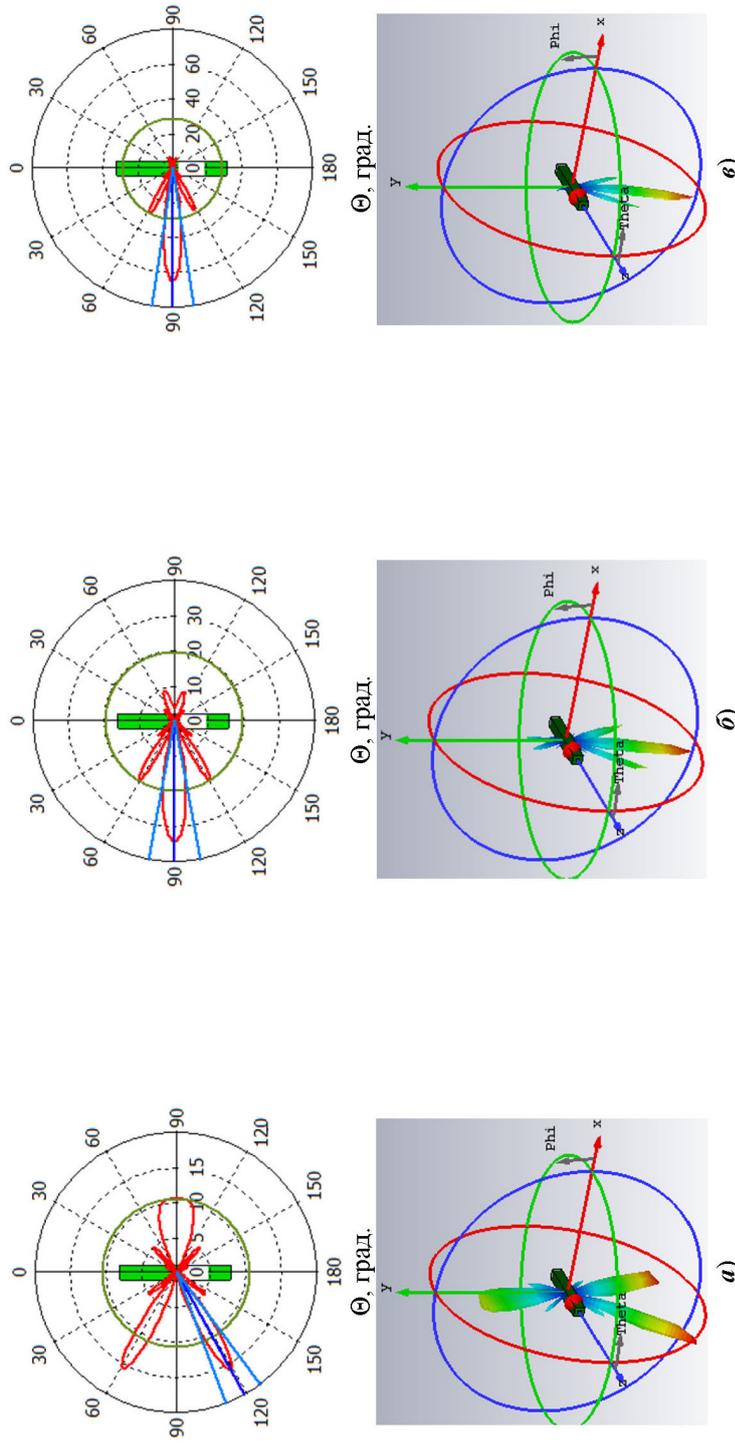


Рис. 5. Управляемость ДН плазменной графеновой АР ($N = 256$) в режиме сканирования на резонансных частотах $f_{рез}^{s1}$ в среднем ИК-диапазоне при изменении химического потенциала μ_c : 2D ДН в E -плоскости (в зависимости от θ , $\phi = 90^\circ$) в полярной (сверху) и 3D ДН в сферической (снизу) системах координат; **а** – $f_1^{s1} = 22,2$ ТГц, $\mu_c = 0,4$ эВ; $G = 15,7$; $\Theta_1 = 119^\circ$; $\Theta_{0,5} = 15,6^\circ$; $\alpha = -1,7$ дБ; **б** – $f_2^{s1} = 29,35$ ТГц, $\mu_c = 0,7$ эВ; $G = 33,9$; $\Theta_1 = 90^\circ$; $\Theta_{0,5} = 21,1^\circ$; $\alpha = -2,4$ дБ; **в** – $f_3^{s1} = 35,16$ ТГц, $\mu_c = 1$ эВ; $G = 64,3$; $\Theta_1 = 90^\circ$; $\Theta_{0,5} = 16,8^\circ$; $\alpha = -3,5$ дБ; $l = w = 60$ нм, $a = b = 200$ нм, $h = 1$ мкм

Направление главного лепестка ДН при перестройке частоты вследствие изменения химического потенциала $\mu_c = 0,4-1$ эВ (при приложении внешнего электрического поля) изменяется, при этом достижимый сектор углов сканирования АР в пределах от $\Theta_1 = 119^\circ$ ($N = 256$, $f_1^{s1} = 22,2$ ТГц, $\mu_c = 0,4$ эВ) до $\Theta_1 = 90^\circ$ ($N = 256$, $f_3^{s1} = 35,16$ ТГц, $\mu_c = 1$ эВ), что подтверждает эффективность электронного управления основным лучом АР.

Сравнительный анализ результатов моделирования плазмонных графеновых АР с электронным сканированием в зависимости от числа излучателей ($N = 4, 16, 256$) показывает, что с увеличением числа излучателей АР существенно возрастает коэффициент усиления G (амплитуда главного лепестка ДН) с $G = 1,6$ ($N = 4$) до $64,3$ ($N = 256$) при $f_3^{s1} = 35,16$ ТГц, $\mu_c = 1$ эВ, при этом уменьшаются ширина ДН по уровню половинной мощности с $\Theta_{0,5} = 87,5^\circ$ ($N = 4$) до $\Theta_{0,5} = 16,8^\circ$ ($N = 256$) и уровень боковых лепестков с $\alpha = -0,8$ дБ ($N = 4$) до $-3,5$ дБ ($N = 256$); т.е. эффективность электронного управления ДН АР повышается.

3. Результаты электродинамического моделирования электронно-управляемых характеристик плазмонных графеновых АР в среднем ИК-диапазоне в зависимости от их геометрических параметров

В графеновых, как и вообще в оптических плазмонных структурах, не работает принцип масштабируемости, так как поверхностная проводимость графена зависит от частоты [23]. Резонансные размеры графенового элемента определяются длиной волны ППП, имеющих сложные дисперсионные зависимости [24]. Поэтому для каждого диапазона частот приходится подбирать размеры графеновых элементов решеток. В ТГц- и дальнем ИК-диапазонах плазмонный резонанс реализуется в решетках с геометрическими размерами графеновых элементов и периодов порядка микрометров [18, 19]. Как показано выше (см. рис. 2), выбор графеновых элементов с наноразмерами позволяет добиться плазмонного резонанса в среднем ИК-диапазоне.

Проведено электродинамическое моделирование характеристик плазмонных графеновых АР с различными геометрическими размерами (порядка десятков нанометров) графеновых элементов и периодов АР в среднем ИК-диапазоне.

Результаты расчета частотных зависимостей коэффициента отражения $|S_{11}|$ на входе ПГА (с размерами $l = w = 100$ нм, $a = b = 200$ нм, $h = 1$ мкм) для различных значений химического потенциала графена $\mu_c = 0,3; 0,4; 0,5; 0,7; 0,8$ эВ в дальнем и среднем ИК-диапазонах частот $f = 10-40$ ТГц представлены на рис. 6.

При изменении химического потенциала в интервале значений μ_c от $0,3$ до $0,8$ эВ наблюдаются резонансы основной моды ППП при s -поляризации волны, возбуждаемой дискретным портом, на следующих частотах: $f_1^{s1} = 15,28$ ТГц, $\mu_c = 0,3$ эВ; $f_p^{s1} = 17,56$ ТГц, $\mu_c = 0,4$ эВ; $f_2^{s1} = 19,51$ ТГц, $\mu_c = 0,5$ эВ; $f_p^{s1} = 21,55$ ТГц, $\mu_c = 0,7$ эВ; $f_3^{s1} = 23,59$ ТГц, $\mu_c = 0,8$ эВ в нижней части среднего ИК-диапазона.

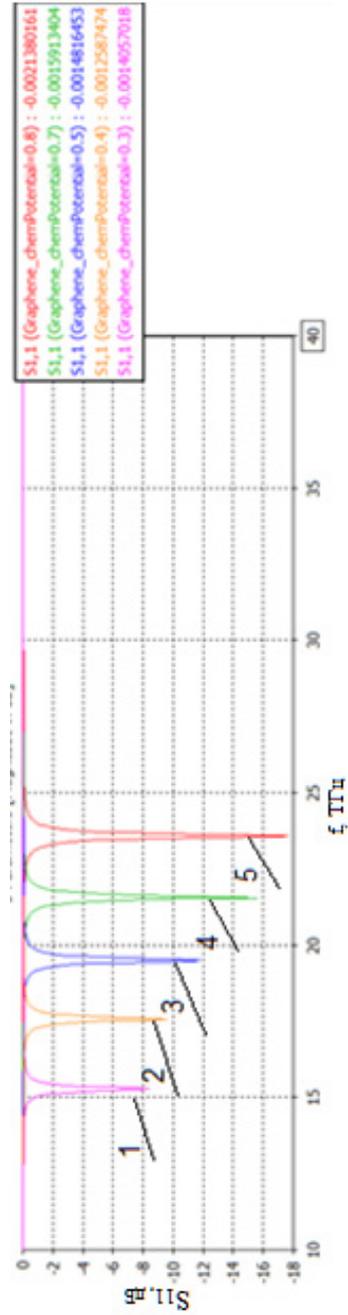


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента отражения $|S_{11}|$ на входе ПГА в дальнейшем и среднем ИК-диапазонах для различных значений химического потенциала:
 $l - \mu_c = 0,3 \text{ эВ}, 2 - 0,4 \text{ эВ}, 3 - 0,5 \text{ эВ}, 4 - 0,7 \text{ эВ}, 5 - 0,8 \text{ эВ}; l = w = 100 \text{ нм}, a = b = 200 \text{ нм}, h = 1 \text{ мкм}$

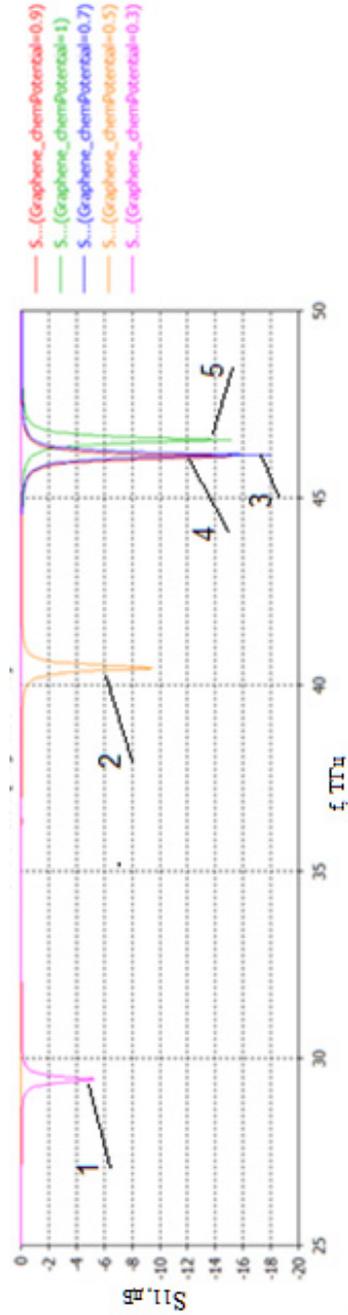


Рис. 7. Частотные зависимости коэффициента отражения $|S_{11}|$ на входе ПГА в среднем ИК-диапазоне частот для различных значений химического потенциала:
 $l - \mu_c = 0,3 \text{ эВ}, 2 - 0,5 \text{ эВ}, 3 - 0,7 \text{ эВ}, 4 - 0,9 \text{ эВ}, 5 - 1 \text{ эВ}; l = w = 20 \text{ нм}, a = b = 400 \text{ нм}, h = 1 \text{ мкм}$

Как следует из результатов (см. рис. 6), коэффициент отражения $|S_{11}|$ имеет минимальное значение -18 дБ на резонансной частоте основной моды ППП $f_3^{s1} = 23,59$ ТГц, $\mu_c = 0,8$ эВ, и, следовательно, эффективность излучения данной ПГА максимальна в этой оптимальной рабочей точке.

Для сравнения на рис. 7 представлены результаты расчета частотных зависимостей коэффициента отражения $|S_{11}|$ на входе ПГА (с минимальными размерами графенового элемента $l = w = 20$ нм, $a = b = 400$ нм, $h = 1$ мкм) для различных значений химического потенциала $\mu_c = 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1$ эВ в среднем ИК-диапазоне частот $f = 25-50$ ТГц. При изменении химического потенциала в интервале значений $\mu_c = 0,3-1$ эВ наблюдаются резонансы основной моды ППП при s -поляризации волны, возбуждаемой дискретным портом, на следующих частотах: $f_1^{s1} = 29,425$ ТГц, $\mu_c = 0,3$; $f_p^{s1} = 40,45$ ТГц, $\mu_c = 0,5$ эВ; $f_2^{s1} = 46,15$ ТГц, $\mu_c = 0,7$ эВ; $f_p^{s1} = 46,1$ ТГц, $\mu_c = 0,9$ эВ; $f_3^{s1} = 46,55$ ТГц, $\mu_c = 1$ эВ в верхней части среднего ИК-диапазона.

Из результатов (рис. 7) следует, что коэффициент отражения $|S_{11}|$ на входе ПГА имеет минимальное значение -18 дБ на резонансной частоте основной моды ППП $f_2^{s1} = 46,15$ ТГц, $\mu_c = 0,7$ эВ, значит, эффективность излучения данной ПГА максимальна в этой оптимальной рабочей точке.

Как показывает сравнительный анализ, вследствие уменьшения размера графенового элемента рабочая частота ПГА (при заданном значении химического потенциала μ_c) сдвигается в сторону более высоких частот среднего ИК-диапазона $f_2^{s1} = 46,15$ ТГц, $\mu_c = 0,7$ эВ ($l = w = 20$ нм) в сравнении с частотами $f_2^{s1} = 29,35$ ТГц, $\mu_c = 0,7$ эВ ($l = w = 60$ нм) и $f_p^{s1} = 21,55$ ТГц, $\mu_c = 0,7$ эВ ($l = w = 100$ нм).

На рис. 8 приведены результаты моделирования управляемости ДН плазмонной графеновой АР ($l = w = 100$ нм, $a = b = 200$ нм, $h = 1$ мкм) с числом излучателей 16×16 $N = 256$ и сканирование по частоте в среднем ИК-диапазоне при изменении значения химического потенциала μ_c (0,3; 0,5; 0,8; эВ).

Результаты (рис. 8) демонстрируют возможность электронного управления ДН плазмонной графеновой АР ($l = w = 100$ нм, $a = b = 200$ нм, $h = 1$ мкм; $N = 256$) с частотным сканированием на резонансных частотах $f_{рез}^{s1}$ основной моды ППП в интервале частот $f = 15,28-23,59$ ТГц в нижней части среднего ИК-диапазона при изменении химического потенциала μ_c (0,3–0,8 эВ) (приложением внешнего электрического поля).

Из результатов (рис. 8) следует, что при увеличении химического потенциала ($\mu_c = 0,3-0,8$ эВ) характеристики данной плазмонной графеновой АР ($l = w = 100$ нм, $a = b = 200$ нм, $h = 1$ мкм, $N = 256$) с электрическим типом сканирования изменяются следующим образом: возрастает эффективность излучения и, как следствие, увеличивается коэффициент усиления G (амплитуда главного лепестка ДН) с $G = 11,9$ при $f_1^{s1} = 15,28$ ТГц, $\mu_c = 0,3$ эВ до 53 при $f_3^{s1} = 23,59$ ТГц, $\mu_c = 0,8$ эВ, при этом происходит уменьшение ширины ДН по уровню половинной мощности $\Theta_{0,5}$ с $23,6^\circ$ до $22,9^\circ$, т.е. сужение главного лепестка ДН, и уменьшение уровня боковых лепестков α с $-6,3$ до $-6,8$ дБ, т.е. происходит достаточно эффективное электронное управление ДН АР.

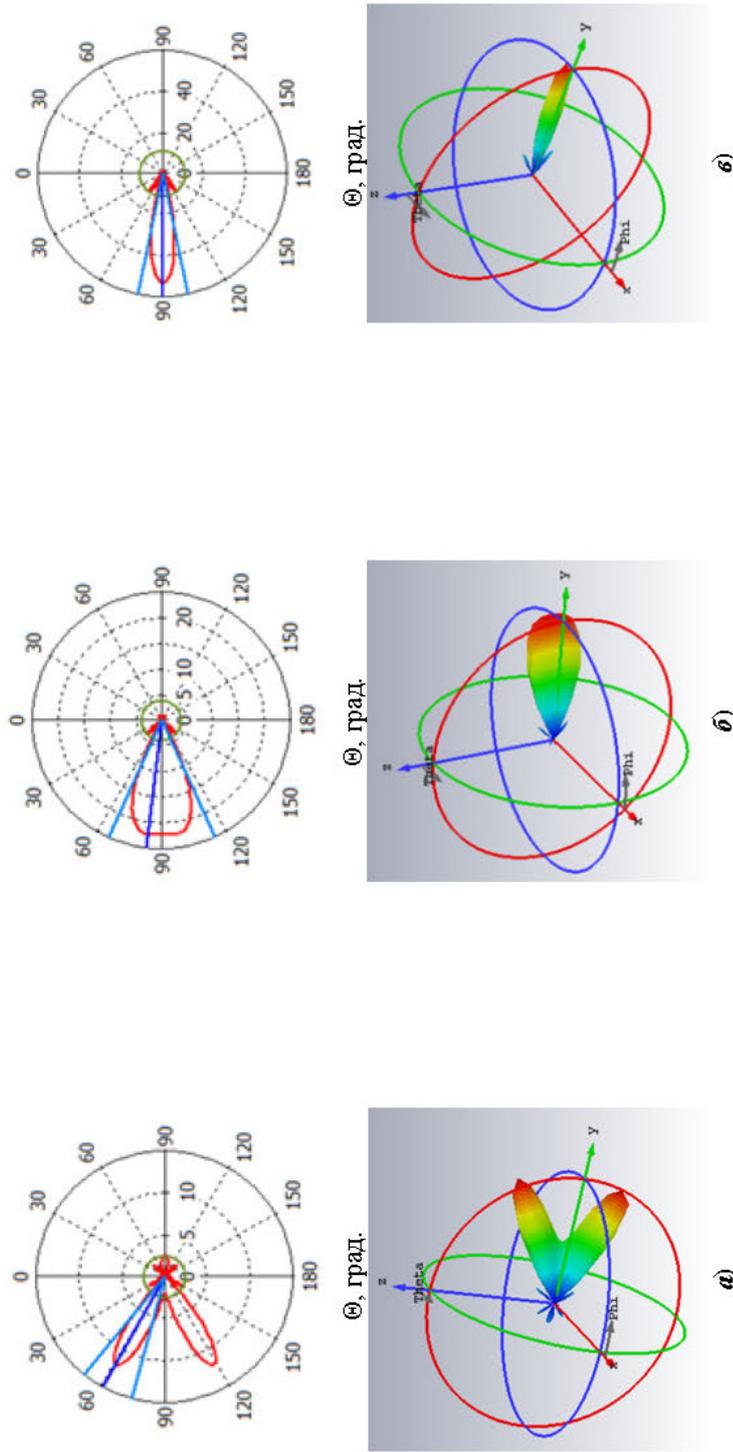


Рис. 8. Управление ДН плазменной графеновой АР ($N = 256$) в режиме сканирования на резонансных частотах $f_{рез}^{s1}$ основной моды ППП в среднем ИК-диапазоне при изменении химического потенциала μ_c : 2D ДН в E -плоскости (в зависимости от θ , $\phi = 90^\circ$) в полярной (сверху) и 3D ДН в сферической (снизу) системах координат; **a** – $f_1^{s1} = 15,28$ ТГц, $\mu_c = 0,3$ эВ; $G = 11,9$, $\Theta_1 = 61^\circ$, $\Theta_{0,5} = 23,6^\circ$, $\alpha = -6,8$ дБ; **б** – $f_2^{s1} = 19,51$ ТГц, $\mu_c = 0,5$ эВ; $G = 22,2$, $\Theta_1 = 83^\circ$, $\Theta_{0,5} = 47,9^\circ$, $\alpha = -7,6$ дБ; **в** – $f_3^{s1} = 23,59$ ТГц, $\mu_c = 0,8$ эВ; $G = 53$, $\Theta_1 = 90^\circ$, $\Theta_{0,5} = 22,9^\circ$, $\alpha = -6,8$ дБ; $l = w = 100$ нм, $a = b = 200$ нм, $h = 1$ мкм

Направление главного лепестка ДН при перестройке частоты вследствие изменения химического потенциала $\mu_c = 0,4-1$ эВ (при приложении внешнего электрического поля) значительно изменяется, при этом достижимый сектор углов сканирования АР в пределах от $\Theta_1 = 61^\circ$ ($N = 256$, $f_1^{s1} = 15,28$ Гц, $\mu_c = 0,3$ эВ) до $\Theta_1 = 90^\circ$ ($N = 256$, $f_3^{s1} = 23,59$ ТГц, $\mu_c = 0,8$ эВ), что демонстрирует эффективность электронного управления основным лучом АР.

На рис. 8 приведены результаты моделирования управляемости ДН плазмонной графеновой АР ($l = w = 20$ нм, $a = b = 400$ нм, $h = 1$ мкм) с числом излучателей 16×16 ($N = 256$) и сканирование по частоте в среднем ИК-диапазоне при изменении значения химического потенциала μ_c (0,3; 0,7; 1 эВ).

Результаты (рис. 9) демонстрируют возможность электронного управления ДН данной плазмонной графеновой АР ($l = w = 20$ нм, $a = b = 400$ нм, $h = 1$ мкм; $N = 256$) с частотным сканированием на резонансных частотах $f_{рез}^{s1}$ основной моды ППП в интервале частот $f = 29,425-46,55$ ТГц в верхней части среднего ИК-диапазона при изменении химического потенциала $\mu_c = 0,3-1$ эВ (приложением внешнего электрического поля).

Из результатов (рис. 9) следует, что при увеличении химического потенциала ($\mu_c = 0,3-1$ эВ) характеристики плазмонной графеновой АР ($l = w = 20$ нм, $a = b = 400$ нм, $h = 1$ мкм, $N = 256$) изменяются следующим образом: возрастает эффективность излучения и, как следствие, увеличивается коэффициент усиления G (амплитуда главного лепестка ДН) с 107 при $f_1^{s1} = 29,425$ ТГц, $\mu_{c1} = 0,3$ эВ до 149 при $f_3^{s1} = 46,55$ ТГц, $\mu_{c3} = 1$ эВ, при этом происходит уменьшение ширины ДН по уровню половинной мощности $\Theta_{0,5}$ с $5,6^\circ$ до $3,3^\circ$, т.е. сужение главного лепестка ДН, и уменьшение уровня боковых лепестков α с $-6,7$ до $-7,8$ дБ, т.е. происходит эффективное электронное управление ДН АР.

Направление главного лепестка ДН при перестройке частоты вследствие изменения химического потенциала $\mu_c = 0,3-1$ эВ (при приложении внешнего электрического поля) существенно изменяется, при этом достижимый сектор углов сканирования АР в пределах от $\Theta_1 = 28^\circ$ ($N = 256$, $f_1^{s1} = 15,28$ ТГц, $\mu_c = 0,3$ эВ) до $\Theta_1 = 55^\circ$ ($N = 256$, $f_3^{s1} = 46,55$ ТГц, $\mu_{c3} = 1$ эВ), что демонстрирует эффективность электронного управления основным лучом АР.

Как следует из результатов электродинамического моделирования, при выборе размеров графеновых элементов порядка десятков нанометров частота плазмонного резонанса основной моды ППП наблюдается в среднем ИК-диапазоне и при изменении их геометрических размеров изменяется (см. рис. 2, 6, 7). А именно, при уменьшении размеров графеновых элементов резонансная частота и, следовательно, рабочая частота эффективного излучения ПГА сдвигается в сторону более высоких частот среднего ИК-диапазона (см. рис. 7).

Из результатов (рис. 5, 8, 9) следует, что на резонансную частоту и, следовательно, на рабочие частоты эффективного излучения плазмонных графеновых АР влияют геометрические размеры графеновых элементов (графеновых нанолент конечной длины), периодов 2D-решетки и параметры графена. Выбор этих размеров и параметров – одна из задач синтеза плазмонных графеновых АР.

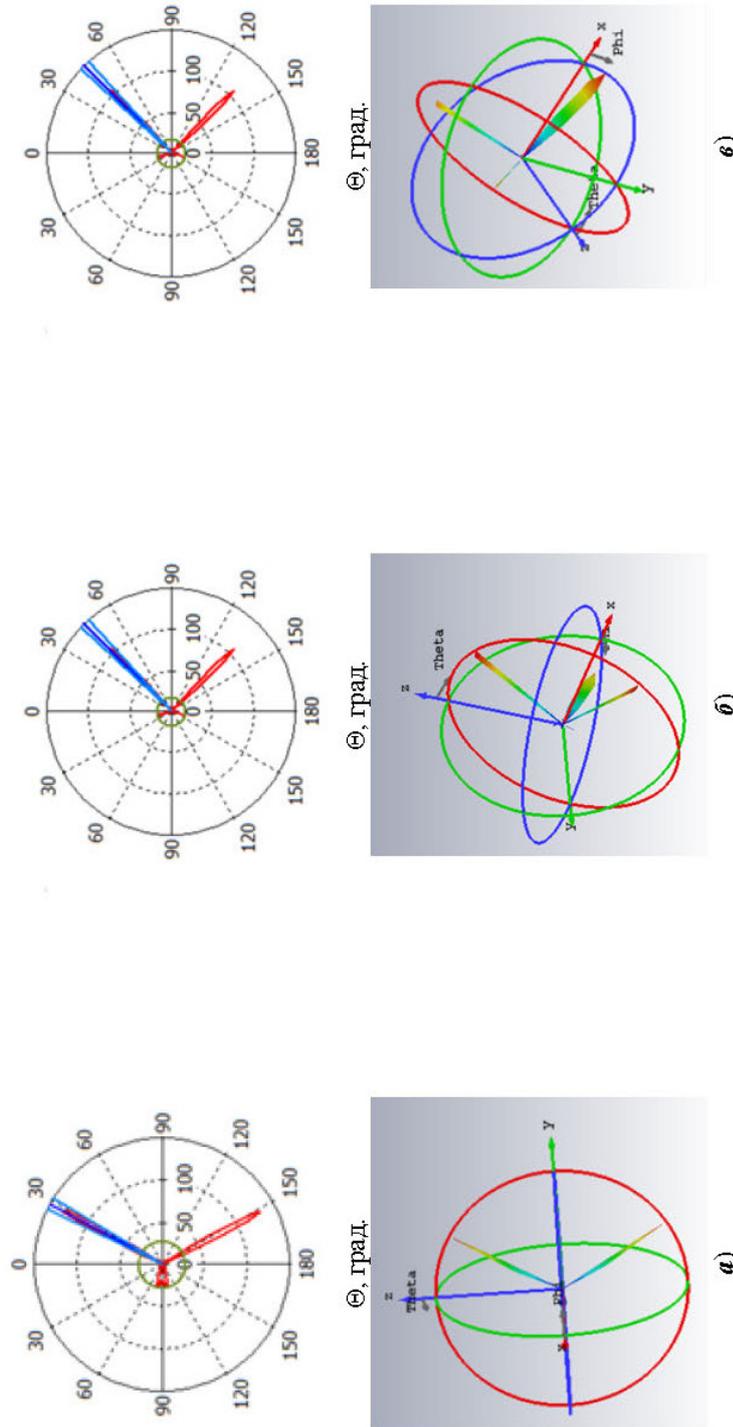


Рис. 9. Управляемость ДН плазменной графеновой АР ($N = 256$) в режиме сканирования на резонансных частотах $f_{рез}^{s1}$ основной моды ППП в среднем ИК-диапазоне при изменении химического потенциала μ_c : 2D ДН в E -плоскости (в зависимости от θ , $\varphi = 90^\circ$) в полярной (сверху) и 3D ДН в сферической (снизу) системах координат; **a** – $f_1^{s1} = 29,425$ ТГц, $\mu_{c1} = 0,3$ эВ; $G = 132$, $\Theta_1 = 28^\circ$, $\Theta_{0,5} = 5,6^\circ$, $\alpha = -6,7$ дБ; **б** – $f_2^{s1} = 46,15$ ТГц, $\mu_{c2} = 0,7$ эВ; $G = 143$, $\Theta_1 = 46^\circ$, $\Theta_{0,5} = 4,5^\circ$, $\alpha = -7,7$ дБ; **в** – $f_3^{s1} = 46,55$ ТГц, $\mu_{c3} = 1$ эВ; $G = 149$, $\Theta_1 = 45^\circ$, $\Theta_{0,5} = 3,3^\circ$, $\alpha = -7,8$ дБ; $l = w = 20$ нм, $a = b = 400$ нм, $h = 1$ мкм

Заключение

В результате электродинамического моделирования с помощью программного комплекса CST MWS 2023 показано, что, выбирая резонансную частоту (плазмонного резонанса основной моды ППП в графеновом элементе) каждого единичного элемента АР (ПГА) путем изменения химического потенциала (приложением внешнего электрического поля), можно достичь значительной перестройки по частоте (электронное частотное сканирование) всей реконфигурируемой плазмонной графеновой АР в целом и обеспечить многочастотный режим ее работы в среднем ИК-диапазоне.

Показано, что при работе плазмонной графеновой АР в режиме сканирования на резонансных частотах основной моды ППП в среднем ИК-диапазоне при увеличении химического потенциала ($\mu_c = 0,3-1$ эВ) происходит эффективное электронное управление ДН: изменение направления главного лепестка ДН, при этом достижимый сектор углов сканирования АР подтверждает эффективность управления лучом; уменьшение ширины ДН по уровню половинной мощности $\Theta_{0,5}$ и уровня боковых лепестков, возрастание эффективности излучения и, как следствие, увеличение коэффициента усиления, при этом возможен выбор формы и параметров ДН в зависимости от значения химического потенциала графена.

Плазмонные графеновые АР могут использоваться для многих применений в ТГц- и ИК-диапазонах, включая высокоскоростные сети 6G, системы беспроводной связи, сканирование безопасности, биомедицинские приложения, IoT и сенсоры [5]. Графеновые формирователи луча могут быть интегрированы в реконфигурируемые модули трансиверов (передатчика/приемника), переключатели и детекторы для ТГц- и ИК-беспроводной связи, систем зондирования, формирования изображения [25].

Активные графеновые метаповерхности могут широко применяться в системах визуализации среднего ИК-диапазона, оптическом зондировании и системах оптической связи [8], включая безопасность связи, системы спутниковой связи и стелс-приложения [26].

Более того, безвредность излучения среднего и ближнего ИК-диапазонов делает его идеальным для биофотонных применений [3]. Так, графеновые активные сенсорные решетки являются многообещающим кандидатом для интерфейсов нейронных датчиков с широким диапазоном частот [27].

Список литературы

1. Giddens H., Yang L., Tian J. [et al.]. Mid-Infrared Reflect-Array Antenna With Beam Switching Enabled by Continuous Graphene Layer // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2018. Vol. 30, № 8. P. 748–751. doi: 10.1109/LPT.2018.2814684
2. Feinstein M. D., Almeida E. Hybridization of graphene-gold plasmons for active control of mid-infrared radiation // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. P. 6733. doi: 10.1038/s41598-024-57216-6
3. Caligiuri V., Pianelli A., Miscuglio M. [et al.]. Near- and Mid-Infrared Graphene-Based Photonic Architectures for Ultrafast and Low-Power Electro-Optical Switching and Ultra-High Resolution Imaging // *ACS Applied Nano Materials*. 2020. Vol. 3 (12). P. 12218–12230. doi: 10.1021/acsnm.0c02690
4. Yao Y., Kats M. A., Genevet P. [et al.]. Broad Electrical Tuning of Graphene-Loaded Plasmonic Antennas // *Nano Letters*. 2013. Vol. 13 (3). P. 1257–1264. doi: 10.1021/nl3047943

5. Abd R. H., Abdalnabi H. A. Reconfigurable Graphene-Based Multi-Input-Multi-Output Antenna for Sixth Generation and Biomedical Application // *Journal of Engineering and Sustainable Development*. 2023. Vol. 27 (6). P. 798–810. doi: 10.31272/jeasd.27.6.10
6. Xiao Y., Cui D., Zhong Y. [et al.]. Theoretical Design of Near-Infrared Tunable Surface Plasmon Resonance Biosensors Based on Gate-Controlled Graphene Plasmons // *Coatings*. 2024. Vol. 14. P. 56. doi: 10.3390/coatings14010056
7. Singh A., Nemeц H., Kunc J. [et al.]. Nanoscale terahertz conductivity and ultrafast dynamics of terahertz plasmons in periodic arrays of epitaxial graphene nanoribbons // *Physical Review Research*. 2024. Vol. 6. P. 033063.
8. Wang Y., Wang Y., Yang G. [et al.]. All-Solid-State Optical Phased Arrays of Mid-Infrared Based Graphene-Metal Hybrid Metasurfaces // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 1 (6). P. 1552. doi: 10.3390/nano11061552
9. Прилуцкий А. А. Реконфигурируемые антенные системы // *Физические основы приборостроения*. 2011. № 11. С. 43–64.
10. Курушин А. А., Папилов К. Проектирование антенной решетки в программах электродинамического моделирования HFSS и CST MWS // *Современная электроника*. 2014. № 2. С. 52–36.
11. CST Microwave Studio 2023. URL: <https://www.3ds.com/products/simulia>
12. Курушин А. А. Проектирование СВЧ-устройств в CST STUDIO SUITE. М. : Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 538 с.
13. Курушин А. А., Пластиков А. Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. М. : Изд-во МЭИ, 2011. 155 с.
14. Курушин А. А. Проектирование СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE. М. : Солон-пресс, 2018. 428 с.
15. Курушин А. А. Школа проектирования СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE. М. : One-Book, 2014. 433 с.
16. Кочетков В. А., Солдатиков И. В. Численные методы и инструменты моделирования антенных решеток РЭС СВЧ диапазона // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021. № 9. С. 91–101.
17. Hanson G. W. Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene // *Journal of Applied Physics*. 2008. Vol. 103. P. 064302.
18. Лерер А. М., Макеева Г. С. Поляризационные эффекты и резонансное поглощение при дифракции терагерцевых волн на графеновых метаповерхностях // *Оптика и спектроскопия*. 2018. Т. 125, № 6. С. 838–843.
19. Лерер А. М., Иванова И. Н., Макеева Г. С., Черепанов В. В. Оптимизация параметров и характеристик широкополосных терагерцевых поглотителей на основе многослойных метаповерхностей из графеновых лент // *Оптика и спектроскопия*. 2021. № 3. С. 342–349.
20. Javier García de Abajo F. Graphene Plasmonics: Challenges and Opportunities // *ACS Photonics*. 2014. Vol. 1 (3). P. 135–152. doi: 10.1021/ph400147y/
21. Лерер А. М., Макеева Г. С., Черепанов В. В. Нелинейное взаимодействие терагерцевых волн с наноструктурированным графеном в резонансных многослойных плазмонных структурах // *Радиотехника и электроника*. 2021. Т. 68, № 6. С. 543–552.
22. Дрaбкин А. Л., Зуенко В. Л. Антенно-фидерные устройства. М. : Советское радио, 1961. 816 с.
23. Голованов О. А., Макеева Г. С., Ринкевич А. Б. Взаимодействие электромагнитных волн с периодическими решетками микро- и нанолент графена в терагерцевом диапазоне // *Журнал технической физики*. 2016. Т. 86, № 2. С. 119–126.
24. Давидович М. В. Влияние пространственной дисперсии на плазмоны вдоль листов графена // *Журнал технической физики*. 2024. Т. 94, № 3. С. 385–399.
25. Ghosh S. K., Das S., Bhattacharyya S. Graphene-Based Metasurface for Tunable Absorption and Transmission Characteristics in the Near Mid-Infrared Region // *IEEE*

- Transactions on Antennas and Propagation. 2022. Vol. 70, № 6. P. 4600–4612. doi: 10.1109/TAP.2022.3140904
26. Chen P.-Y., Farhat M., Askarpour A. N. [et al.]. Infrared beam-steering using acoustically modulated surface plasmons over a graphene monolayer // *Journal of Optics*. 2014. Vol. 16, № 9. P. 094008. doi: 10.1088/2040-8978/16/9/094008
27. Garcia-Cortadella R., Schwesig G., Jeschke C. [et al.]. Graphene active sensor arrays for long-term and wireless mapping of wide frequency band epicortical brain activity // *Nat Commun*. 2021. Vol. 12. P. 211. doi: 10.1038/s41467-020-20546-w

References

- Giddens H., Yang L., Tian J. et al. Mid-Infrared Reflect-Array Antenna with Beam Switching Enabled by Continuous Graphene Layer. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2018;30(8):748–751. doi: 10.1109/LPT.2018.2814684
- Feinstein M.D., Almeida E. Hybridization of graphene-gold plasmons for active control of mid-infrared radiation. *Scientific Reports*. 2024;14:6733. doi: 10.1038/s41598-024-57216-6
- Caligiuri V., Pianelli A., Miscuglio M. et al. Near- and Mid-Infrared Graphene-Based Photonic Architectures for Ultrafast and Low-Power Electro-Optical Switching and Ultra-High Resolution Imaging. *ACS Applied Nano Materials*. 2020;3(12):12218–12230. doi: 10.1021/acsnm.0c02690
- Yao Y., Kats M.A., Genevet P. et al. Broad Electrical Tuning of Graphene-Loaded Plasmonic Antennas. *Nano Letters*. 2013;13(3):1257–1264. doi: 10.1021/nl3047943
- Abd R. H., Abdulnabi H.A. Reconfigurable Graphene-Based Multi-Input-Multi-Output Antenna for Sixth Generation and Biomedical Application. *Journal of Engineering and Sustainable Development*. 2023;27(6):798–810. doi: 10.31272/jeasd.27.6.10
- Xiao Y., Cui D., Zhong Y. et al. Theoretical Design of Near-Infrared Tunable Surface Plasmon Resonance Biosensors Based on Gate-Controlled Graphene Plasmons. *Coatings*. 2024;14:56. doi: 10.3390/coatings14010056
- Singh A., Nemeč H., Kunc J. et al. Nanoscale terahertz conductivity and ultrafast dynamics of terahertz plasmons in periodic arrays of epitaxial graphene nanoribbons. *Physical Review Research*. 2024;6:033063.
- Wang Y., Wang Y., Yang G. et al. All-Solid-State Optical Phased Arrays of Mid-Infrared Based Graphene-Metal Hybrid Metasurfaces. *Nanomaterials*. 2021;1(6):1552. doi: 10.3390/nano11061552
- Prilutskiy A.A. Reconfigurable antenna systems. *Fizicheskie osnovy priborostroeniya = Physical principles of instrument making*. 2011;(11):43–64. (In Russ.)
- Kurushin A.A., Papilov K. Design of an antenna array in the programs of electrodynamic modeling NFSS and CST MWS. *Sovremennaya elektronika = Modern electronics*. 2014;(2):52–36. (In Russ.)
- CST Microwave Studio 2023*. Available at: <https://www.3ds.com/products/simulia>
- Kurushin A.A. *Proektirovanie SVCh-ustroystv v CST STUDIO SUITE = Design of microwave devices in CST STUDIO SUITE*. Moscow: Izd-vo LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015:538. (In Russ.)
- Kurushin A.A., Plastikov A.N. *Proektirovanie SVCh ustroystv v srede CST Microwave Studio = Design of microwave devices in the environment of CST Microwave Studio*. Moscow: Izd-vo MEI, 2011:155. (In Russ.)
- Kurushin A.A. *Proektirovanie SVCh ustroystv v CST STUDIO SUITE = Design of microwave devices in CST STUDIO SUITE*. Moscow: Solon-press, 2018:428. (In Russ.)
- Kurushin A.A. *Shkola proektirovaniya SVCh ustroystv v CST STUDIO SUITE = School of microwave design in CST STUDIO SUITE*. Moscow: One-Book, 2014:433. (In Russ.)
- Kochetkov V.A., Soldatkov I.V. Numerical methods and tools for modeling antenna arrays of microwave radio systems. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta*.

- Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Engineering sciences.* 2021;(9):91–101. (In Russ.)
17. Hanson G.W. Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene. *Journal of Applied Physics.* 2008;103:064302.
 18. Lerer A.M., Makeeva G.S. Polarization effects and resonant absorption in terahertz wave diffraction on graphene metasurfaces. *Optika i spektroskopiya = Optics and spectroscopy.* 2018;125(6):838–843. (In Russ.)
 19. Lerer A.M., Ivanova I.N., Makeeva G.S., Cherepanov V.V. Optimization of parameters and characteristics of broadband terahertz absorbers based on multilayer metasurfaces of graphene ribbons. *Optika i spektroskopiya = Optics and spectroscopy.* 2021;(3):342–349. (In Russ.)
 20. Javier García de Abajo F. Graphene Plasmonics: Challenges and Opportunities. *ACS Photonics.* 2014;1(3):135–152. doi: 10.1021/ph400147y/
 21. Lerer A.M., Makeeva G.S., Cherepanov V.V. Nonlinear interaction of terahertz waves with nanostructured graphene in resonant multilayer plasmonic structures. *Radiotekhnika i elektronika = Radio engineering and electronics.* 2021;68(6):543–552. (In Russ.)
 22. Drabkin A.L., Zuzenko V.L. *Antenno-fidernye ustroystva = Antenna-feeder devices.* Moscow: Sovetskoe ra-dio, 1961:816. (In Russ.)
 23. Golovanov O.A., Makeeva G.S., Rinkevich A.B. Interaction of electromagnetic waves with periodic lattices of graphene micro- and nanoribbons in the terahertz range. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Journal of technical physics.* 2016;86(2):119–126. (In Russ.)
 24. Davidovich M.V. Effect of spatial dispersion on plasmons along graphene sheets. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Journal of technical physics.* 2024;94(3):385–399. (In Russ.)
 25. Ghosh S.K., Das S., Bhattacharyya S. Graphene-Based Metasurface for Tunable Absorption and Transmission Characteristics in the Near Mid-Infrared Region. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation.* 2022;70(6):4600–4612. doi: 10.1109/TAP.2022.3140904
 26. Chen P.-Y., Farhat M., Askarpour A.N. et al. Infrared beam-steering using acoustically modulated surface plasmons over a graphene monolayer. *Journal of Optics.* 2014;16(9):094008. doi: 10.1088/2040-8978/16/9/094008
 27. Garcia-Cortadella R., Schwesig G., Jeschke C. et al. Graphene active sensor arrays for long-term and wireless mapping of wide frequency band epicortical brain activity. *Nat Commun.* 2021;12:211. doi: 10.1038/s41467-020-20546-w

Информация об авторах / Information about the authors

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)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 08.08.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 03.09.2024

Принята к публикации / Accepted 30.09.2024