

Плазмонные антенны на основе прямоугольных графеновых нанолент с управляемой поляризацией терагерцового и инфракрасного излучения

Г.С. Макеева

Пензенский государственный университет
440026, Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40

Аннотация – Обоснование. Для развития новых терагерцовых систем беспроводной связи с высокой пропускной способностью и скоростью передачи, таких как 6G и выше, необходимо эффективное управление направлением поляризации излучаемых терагерцовых волн, однако большинство методов технологически сложные и дорогие. Реализация терагерцовых антенн и устройств на основе 2D-материалов, таких как графен, решает проблему, связанную с разработкой эффективного управления. **Цель.** Исследование возможности управления поляризацией терагерцового и ИК-излучения плазмонных антенн на основе прямоугольных графеновых нанолент с помощью изменения химического потенциала (приложением внешнего электрического поля). **Методы.** Эту важную научную проблему, связанную с проектированием терагерцовых антенн, во многом позволяет решить моделирование с помощью программы электродинамического моделирования CST MWS 2023. **Результаты.** В качестве объекта анализа выбраны плазмонные терагерцовые антенны на основе прямоугольных графеновых нанолент и показана возможность излучения волн двух ортогональных поляризаций. Выявлены способы управления поляризацией терагерцового, ИК-излучения таких антенн, основанные на выборе рабочих частот, соответствующих резонансам мод поверхностных плазмон-поляритонов, и нанесении металлизации на диэлектрическую подложку. **Заключение.** Возможность управления поляризацией терагерцового, ИК-излучения позволяет создавать как новые элементы плазмонных антенных решеток, так и новые коммуникационные технологии, в том числе будущих сетей 6G.

Ключевые слова – плазмонные антенны; прямоугольные графеновые наноленты; поляризация; плазмонный резонанс; диаграмма направленности.

Введение

Требования к высокой пропускной способности и скорости передачи данных будущей беспроводной связи, такой как 6G и выше, не могут быть удовлетворены с помощью существующих технологий. Терагерцовый (ТГц) диапазон частот становится все более многообещающим для применения в высокоскоростных сетях беспроводной связи будущего [1]. ТГц-излучение активно используют для разработки связи нового поколения. По сравнению с СВЧ-диапазоном использование ТГц излучения позволяет на порядок увеличить скорость передачи информации, в частности для 6G Wi-Fi [2].

В последнее время реализация ТГц устройств и антенн ускорила за счет появления двумерных (2D) материалов, таких как графен, который решает проблему, связанную с разработкой эффективного управления. Высоколегированный графен становится основной платформой для создания плазмонных антенн [3–7] и устройств, в том числе поляризаторов [8–11] ТГц-диапазона благодаря своим уникальным оптоэлектронным свойствам.

Графен демонстрирует высокую подвижность носителей, поглощение, не зависящее от длины волны, перестраиваемость свойств при изменении химического потенциала (уровня Ферми) путем электрического стробирования и химического легирования, при этом он химически и механически устойчив благодаря прочной ковалентной связи между атомами углерода. В графене возбуждаются относительно длительные, сильно ограниченные и перестраиваемые плазмонные резонансы, которые проявляются в ТГц и инфракрасном (ИК) диапазонах частот [3].

Если графен интегрировать в антенны, то графеновые аналоги типичных металлических антенн демонстрируют лучшие свойства излучения [4–7]. Это связано не только с хорошей проводимостью графена, но главным образом с тем, что поверхностная проводимость графена зависит от химического потенциала, изменяющегося при приложении напряжения смещения [12]. Ожидается, что такое динамическое управление проводимостью графена может достигать скоростей до терабит в секунду [3].

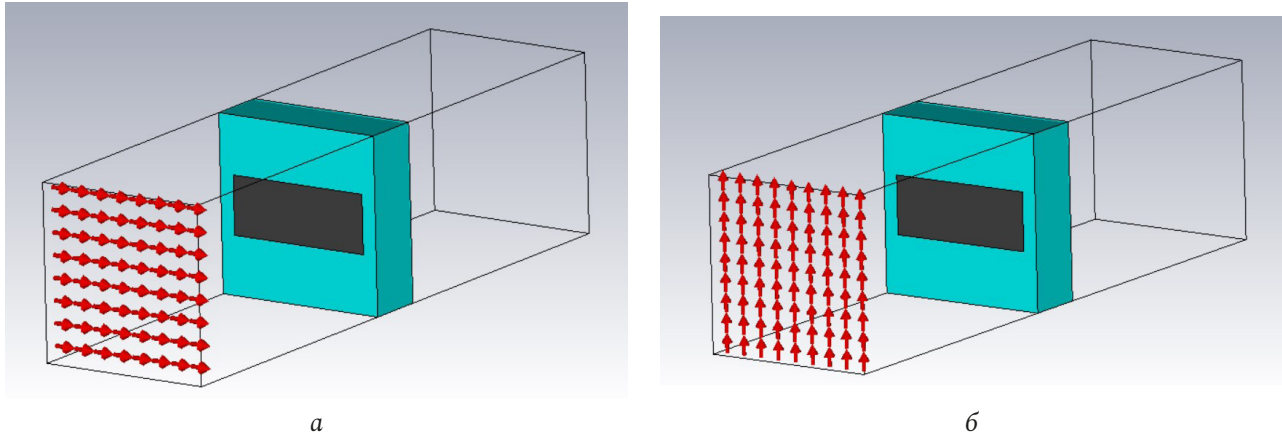


Рис. 1. Модели возбуждения плазмонной антенны на основе прямоугольной графеновой наноленты ТЕМ-волной s-поляризации (а) и р-поляризации (б) с помощью волноводного порта в программном комплексе CST MWS 2023
Fig. 1. Models of excitation of a plasmonic antenna based on a rectangular graphene nanoribbon by a TEM wave of s-polarization (a) and p-polarization (b) using a waveguide port in the CST MWS 2023 software package

Для развития новых ТГц-систем сверхбыстродействующей и сверхточной связи необходимо эффективное управление направлением поляризации излучаемых волн, однако большинство методов технологически сложные и дорогие [2].

Важные научные проблемы, связанные с проектированием устройств СВЧ, антенн и фазированных антенных решеток, позволяют решать программы электродинамического моделирования CST MWS и HFSS [13; 14].

Целью данной работы является исследование с помощью программы электродинамического моделирования CST Microwave Studio возможности управления поляризацией ТГц- и ИК-излучения плазмонных антенн на основе прямоугольных графеновых нанолент путем изменения химического потенциала (при приложении внешнего электрического поля).

1. Моделирование характеристик плазмонной антенны на основе прямоугольной графеновой наноленты, возбуждаемой ТЕМ-волной s- и р-поляризации, при изменении химического потенциала

Модели возбуждения плазмонной антенны на основе прямоугольной графеновой наноленты нормально падающей ТЕМ-волной s-поляризации (рис. 1, а) и р-поляризации (рис. 1, б) с помощью волноводного порта, созданные в программном комплексе CST MWS 2023 [15], приведены на рис. 1. Модель антенны состоит из прямоугольной графеновой наноленты (длиной l , шириной w) (рис. 1), расположенной на диэлектрической под-

ложке (диоксид кремния SiO_2 , диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2,2$) с геометрическими размерами a, b, h .

Рис. 1 демонстрирует ориентацию вектора \mathbf{E} напряженности электрического поля падающей ТЕМ-волны относительно графеновой наноленты: в случае возбуждения антенны волной s-поляризации вектор \mathbf{E} ориентирован вдоль широкой стороны графеновой наноленты (рис. 1, а), в случае р-поляризации – вдоль узкой (рис. 1, б).

Эти модели с возбуждением волноводным портом падающей ТЕМ-волной s- и р-поляризации (рис. 1) использованы для решения электродинамической задачи с помощью программного комплекса CST Microwave Studio 2023 методом конечного интегрирования во временной области [3].

Проведен расчет элемента матрицы рассеяния $|S_{12}|$ графеновой плазмонной антенны, возбуждаемой ТЕМ-волной s- и р-поляризации, в ТГц, дальнем и среднем ИК-диапазонах для различных значений химического потенциала μ_c графена.

Результаты расчета частотных зависимостей элемента матрицы рассеяния $|S_{12}|$ (коэффициента прохождения волны) плазмонной антенны на основе прямоугольной графеновой наноленты (с геометрическими размерами $w = 1$ мкм, $l = 2,5$ мкм, $a = b = 3$ мкм, $h = 1$ мкм) для значений химического потенциала $\mu_{c1} = 0,3$ эВ, $\mu_{c2} = 0,7$ эВ, $\mu_{c3} = 1$ эВ представлены для случаев возбуждения ТЕМ-волной s- и р-поляризации на рис. 2, а и б соответственно. Графен имеет следующие параметры: температура $T = 300$ К, параметр рассеяния $\tau = 1$ пс.

Из результатов моделирования (рис. 2) следует, что при изменении химического потенциала μ_c

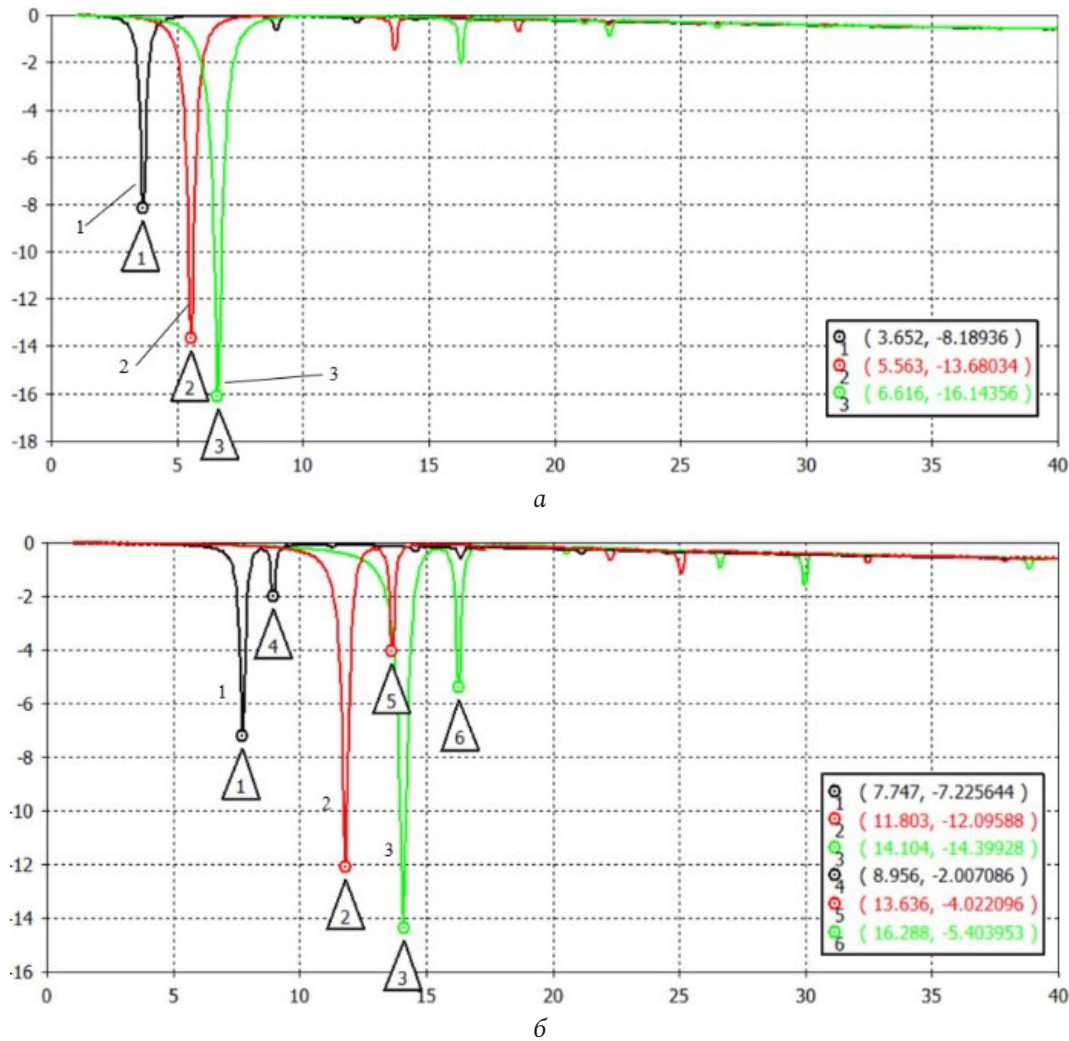


Рис. 2. Частотные зависимости элемента матрицы рассеяния $|S_{12}|$ плазмонной антенны на основе прямоугольной графеновой наноленты для различных значений химического потенциала μ_c в ТГц, дальнем и среднем ИК-диапазонах: а - s-поляризация; б - р-поляризация падающей ТЕМ-волны; кривая 1 - $\mu_{c1} = 0,3$ эВ, 2 - $\mu_{c2} = 0,7$ эВ, 3 - $\mu_{c3} = 1$ эВ; $w = 1$ мкм, $l = 2,5$ мкм, $a = b = 3$ мкм, $h = 1$ мкм

Fig. 2. Frequency dependences of the scattering matrix element $|S_{12}|$ of a plasmonic antenna based on a rectangular graphene nanoribbon for different values of the chemical potential μ_c in the THz, far and mid-IR ranges: а - s-polarization; б - p-polarization of the incident TEM wave; curve 1 - $\mu_{c1} = 0,3$ eV, 2 - $\mu_{c2} = 0,7$ eV, 3 - $\mu_{c3} = 1$ eV; $w = 1 \mu\text{m}$, $l = 2,5 \mu\text{m}$, $b = 3 \mu\text{m}$, $h = 1 \mu\text{m}$

графена положение по частоте и значения минимумов коэффициента прохождения $|S_{12}|$ изменяются. Минимумы коэффициента прохождения $|S_{12}|$ (рис. 2, а, б) обусловлены максимумами коэффициента поглощения P в графене и соответствуют плазмонным резонансам [16] на частотах $f_{рез}$, определяемых возбуждением основной и высших мод поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) [11]. Эти резонансные частоты $f_{рез}^{s,p}$ зависят от поляризации падающей волны [11].

При s-поляризации возбуждающей ТЕМ-волны (резонанс поверхностного электрического тока вдоль широкой стороны прямоугольной графеновой наноленты) наблюдается продольный плазмонный резонанс [11]. Для s-поляризации первая резонансная частота f_1^{s1} определяется основной

модой ППП (рис. 2, а), для которой максимальна плотность поверхностного электрического тока j_s на графеновой наноленте, и поэтому максимально и поглощение. Для р-поляризации возбуждающей ТЕМ-волны это поперечный резонанс поверхностного электрического тока j_s вдоль узкой стороны прямоугольной графеновой наноленты [11] и резонансные частоты $f_{рез}^p$ выше, чем $f_{рез}^s$ для s-поляризации (рис. 2, б). Наблюдаются несколько резонансных частот ближайших высших мод ППП как при s-поляризации (рис. 2, а), так и р-поляризации (рис. 2, б). В случае прямоугольной графеновой наноленты продольный при s-поляризации (рис. 2, а) и поперечный при р-поляризации (рис. 2, б) резонансы ППП разнесены по частоте.

Таблица. Расчетные значения элемента матрицы рассеяния $|S_{12}|$ на резонансных частотах $f_{рез}^{s,p}$ основной и второй мод ППП, возбуждаемых ТЕМ-волной s- и p-поляризации, для различных значений химического потенциала μ_c
Table. Calculated values of the scattering matrix element $|S_{12}|$ at the resonant frequencies $f_{рез}^{s,p}$ of the fundamental and second modes of the SPP excited by a TEM wave of s- and p-polarization for different values of the chemical potential μ_c

μ_c , эВ	$f_{рез}^{s1}$, ТГц	S_{11} , дБ	$f_{рез}^{p1}$, ТГц	S_{11} , дБ	$f_{рез}^{p2}$, ТГц	S_{11} , дБ
0,3	3,652	-8,18936	7,747	-7,22564	8,967	-2,00709
0,7	5,563	-13,68034	11,803	-12,09588	13,636	-4,0221
1	6,616	-16,14356	14,104	-14,39928	16,288	-5,40395

Результаты расчета управляемости элемента матрицы рассеяния $|S_{12}|$ на резонансных частотах $f_{рез}^{s,p}$ основной моды и моды второго порядка ППП, возбуждаемых ТЕМ-волной s- и p-поляризации, при изменении химического потенциала μ_c (0,3, 0,7, 1 эВ) приведены в таблице.

2. Моделирование управляемости поляризацией ТГц- и ИК-излучения плазмонных антенн на основе прямоугольных графеновых нанолент

Результаты моделирования с помощью пакета прикладных программ CST MWS 2023 диаграммы направленности (ДН) плазмонной графеновой антенны на диэлектрической подложке и распределения вектора плотности поверхностного электрического тока \mathbf{j}_s на графеновой наноленте на резонансных частотах f_1^{s1} , f_2^{s1} , f_3^{s1} основной моды ППП при s-поляризации возбуждающей ТЕМ-волны для различных значений химического потенциала μ_c (0,3, 0,7, 1 эВ) приведены на рис. 3.

Результаты, представленные на рис. 3 – 3.1–3.3, а–в, демонстрируют возможность перестройки рабочей частоты плазмонной графеновой антенны (сканирование по частоте) на резонансных частотах $f_{рез}^{s1}$ основной моды ППП при s-поляризации возбуждающей ТЕМ-волны в ТГц-диапазоне при изменении химического потенциала μ_c в интервале значений 0.3 – 1 эВ (приложением внешнего электрического поля).

На резонансных частотах f_1^{s1} , f_2^{s1} , f_3^{s1} основной моды ППП при s-поляризации возбуждающей ТЕМ-волны наблюдается резонанс электрического тока, создаваемого стоячей полуволной ППП вдоль широкой стороны прямоугольной наноленты [11] и, следовательно, полуволновое распределение поверхностного электрического тока \mathbf{j}_s по длине прямоугольной графеновой наноленты с максимумом в центре (рис. 3 – 3.1–3.3, г). Форма 3D ДН-излучения, создаваемого этим полуволновым (по длине волны ППП) электрическим излу-

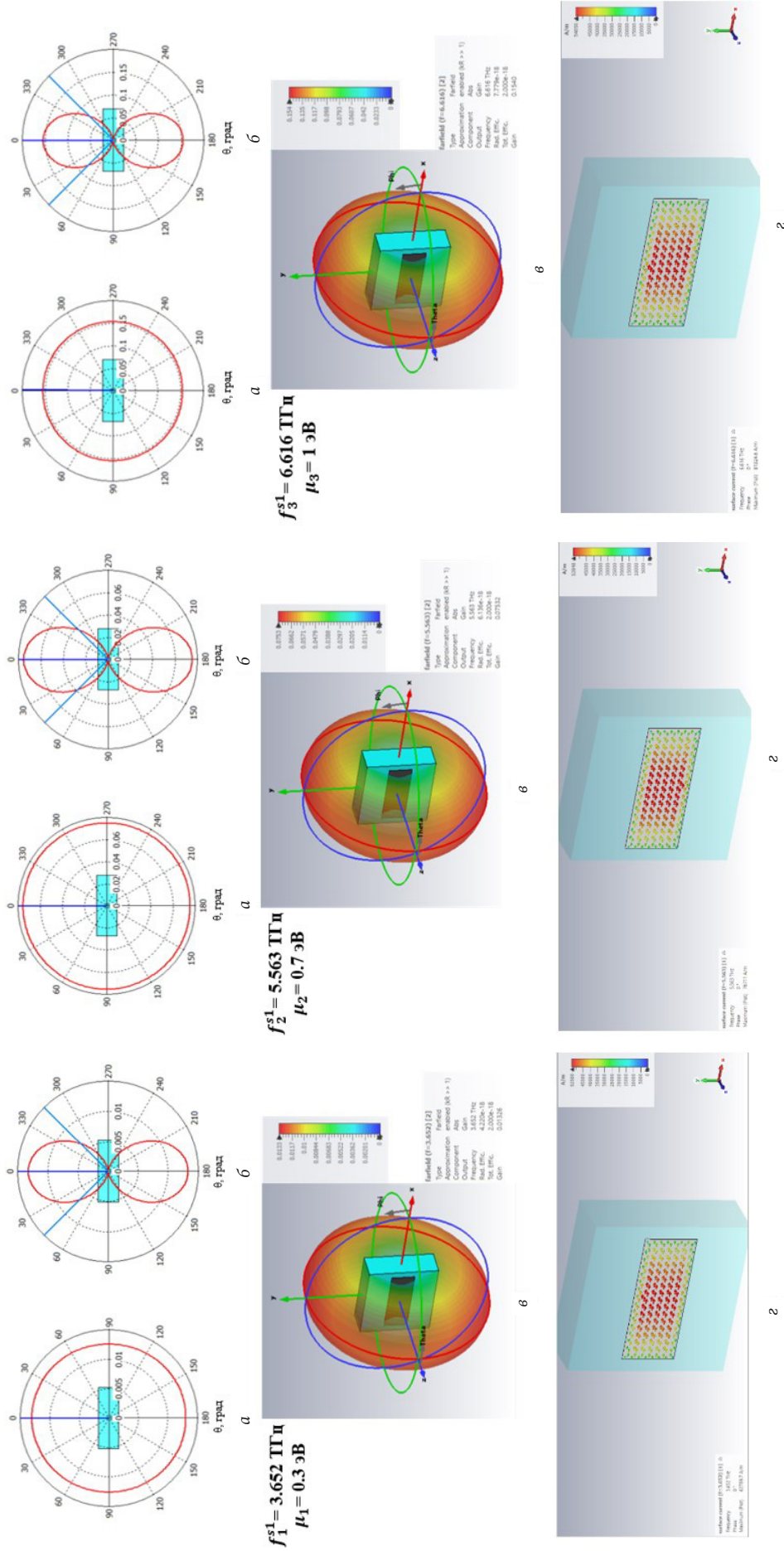
чателем, тороидальная (рис. 3 – 3.1–3.3, в). Ось 2D ДН ориентирована в экваториальной плоскости параллельно относительно продольного излучающего тока (рис. 3 – 3.1–3.2, б), ДН в E-плоскости (в зависимости от θ при $\varphi=0^\circ$) соответствует ДН полуволнового симметричного вибратора [17]; в E-плоскости (в зависимости от θ при $\varphi=90^\circ$) это окружность (рис. 3 – 3.1–3.3, а).

При увеличении значения химического потенциала μ_c происходит возрастание интенсивности плотности поверхностного электрического тока \mathbf{j}_s на графеновой наноленте (рис. 3 – 3.1–3.3, г), так как добротность резонанса уменьшается, следовательно, коэффициент поглощения в графене увеличивается [11], при этом возрастает и эффективность излучения плазмонной графеновой антенны (рис. 3 – 3.1–3.3, в).

Для сравнения на рис. 4 представлены результаты моделирования ДН плазмонной антенны на основе прямоугольной графеновой наноленты на металлизированной диэлектрической подложке (с такими же геометрическими размерами $w=1$ мкм, $l=2,5$ мкм, $a=b=3$ мкм, $h=1$ мкм) на резонансной частоте f_3^{s1} основной моды ППП, равной $f_3^{s1}=5,252$ ТГц при s-поляризации возбуждающей ТЕМ-волны для значения химического потенциала $\mu_c=1$ эВ.

Из сравнения ДН плазмонных антенн на основе прямоугольных графеновых нанолент с диэлектрической (рис. 3 – 3.3) и металлизированной (рис. 4) подложкой на резонансных частотах f_3^{s1} основной моды ППП следует, что ось ДН направленности, а следовательно, и плоскость поляризации ТГц-излучения полуволнового (по длине волны ППП) электрического излучателя во втором случае развернулась на 90° .

Таким образом, плазмонные антенны на основе прямоугольных графеновых нанолент с диэлектрической и металлизированной подложкой излучают ТГц-волны двух ортогональных поляризаций, и, следовательно, поляризация ТГц-излучения



3.1

3.2

3.3

Рис. 3. ДН плазмонной антенны на основе прямоугольной графеновой наноленты на диэлектрической подложке на резонансных частотах f_{res}^{s1} основной моды ППП при s-поляризации возбуждающей ТЕМ-волны и сканирование по частоте в ТГц-диапазоне при изменении значения химического потенциала μ_3 : 2D ДН в E-плоскости (в зависимости от θ , $\varphi = 90^\circ$) (a), в E-плоскости (в зависимости от θ , $\varphi = 0^\circ$) (б) в полярной (a, б) и 3D ДН в сферической (в) системах координат и распределение вектора плотности поверхностного электрического тока \mathbf{j}_s на графеновой наноленте (в); 3.1 – $f_3^{s1} = 3,652$ ТГц, $\mu_3 = 0,3$; 3.2 – $f_3^{s1} = 5,563$ ТГц, $\mu_3 = 0,7$ эВ; 3.3 – $f_3^{s1} = 6,616$ ТГц, $\mu_3 = 1$ эВ; интенсивность излучения и плотности поверхностного электрического тока \mathbf{j}_s обозначены цветом в электронной версии статьи

Fig. 3. The plasmonic antenna pattern based on a rectangular graphene nanoribbon on a dielectric substrate at resonant frequencies f_{res}^{s1} of the fundamental SPP mode with s-polarization of the exciting TEM wave and frequency scanning in the THz range with a change in the value of the chemical potential of μ_3 : 2D RP in the E-plane (depending on θ , $\varphi = 90^\circ$) (a), in the E-plane (depending on θ , $\varphi = 0^\circ$) (b) in the polar (a, b) and 3D RP in the spherical (c) coordinate systems and the distribution of the surface electric current density vector on the graphene nanoribbon (d); 3.1 – $f_3^{s1} = 3,652$ THz, $\mu_3 = 0,3$; 3.2 – $f_3^{s1} = 5,563$ THz, eV; 3.3 – $f_3^{s1} = 6,616$ THz, eV; the radiation intensity and surface electric current density are indicated by color in the electronic version of the article

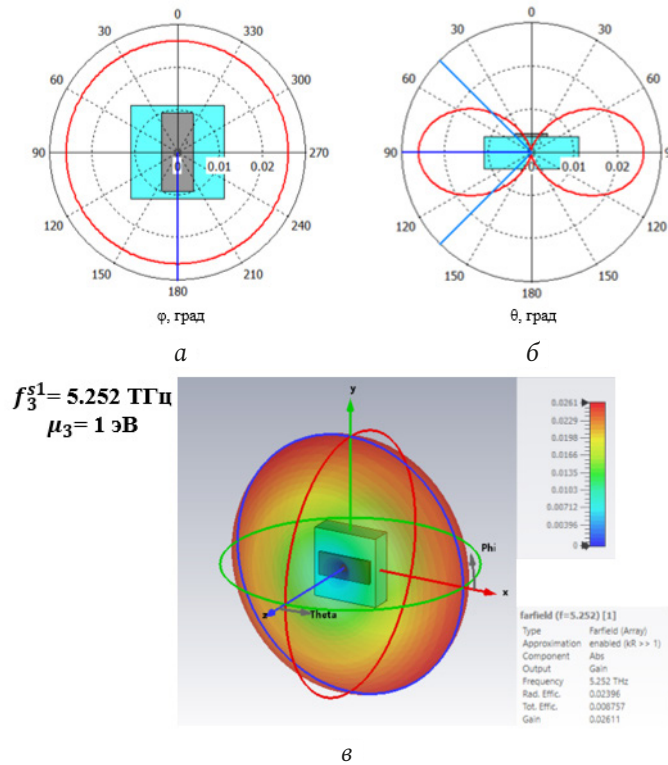


Рис. 4. ДН плазмонной антенны на основе прямоугольной графеновой наноленты на металлизированной диэлектрической подложке при s-поляризации возбуждающей TEM-волны на резонансной частоте основной моды ППП $f_3^{s1} = 5,252$ ТГц, $\mu_{c3} = 1$ эВ: 2D ДН в H -плоскости (в зависимости от φ , $\theta = 90^\circ$) (а) и в E -плоскости (в зависимости от θ , $\varphi = 90^\circ$) (б) в полярной (а, б) и 3D ДН в сферической (в) системах координат

Fig. 4. RP of a plasmonic antenna based on a rectangular graphene nanoribbon on a metallized dielectric substrate with s-polarization of the exciting TEM wave at the resonant frequency of the fundamental mode of the SPP $f_3^{s1} = 5,252$ THz, $\mu_{c3} = 1$ eV: 2D RP in the H-plane (depending on φ , $\theta = 90^\circ$) (a) and in the E-plane (depending on θ , $\varphi = 90^\circ$) (b) in the polar (a, b) and 3D RP in the spherical (c) coordinate systems

таких антенн управляема нанесением металлизации на диэлектрическую подложку.

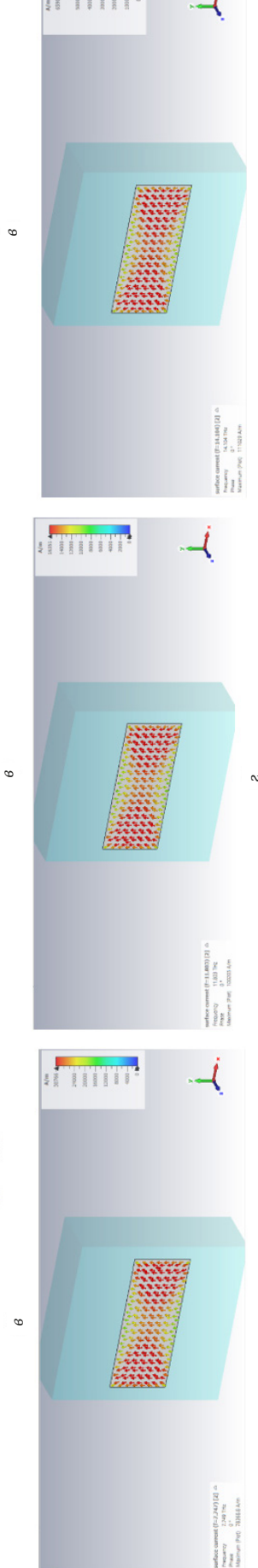
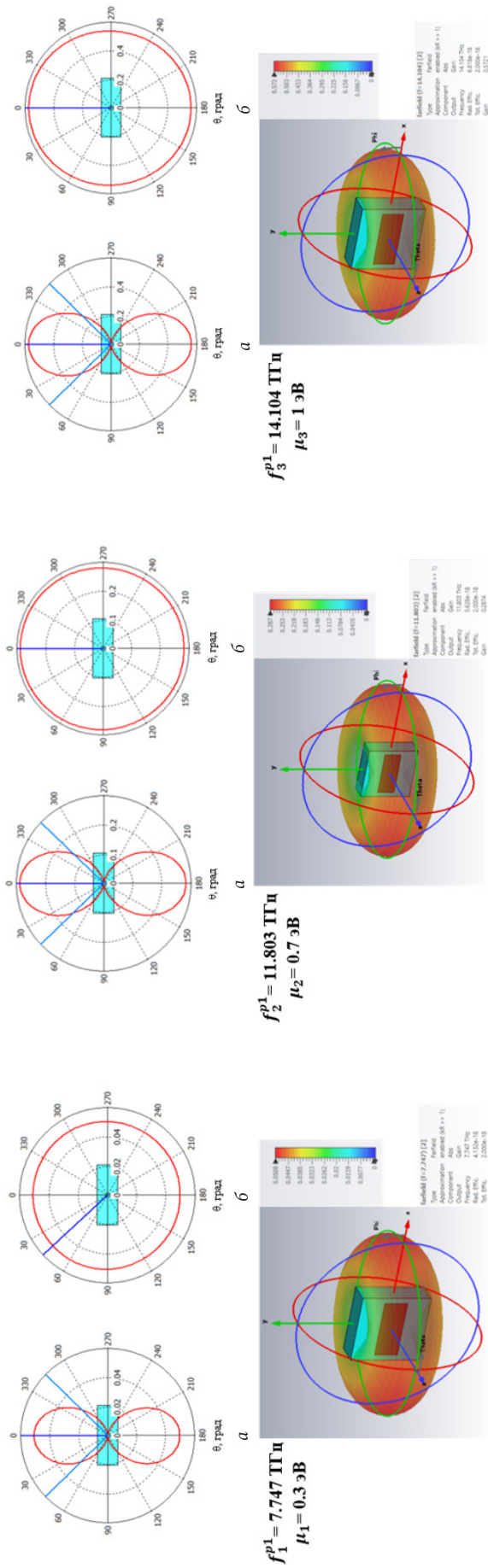
Результаты моделирования с помощью пакета прикладных программ CST MWS 2023 ДН плазмонной графеновой антенны на диэлектрической подложке и распределения вектора плотности поверхностного электрического тока \mathbf{j}_s на графеновой наноленте на резонансных частотах основной моды ППП f_1^{p1} , f_2^{p1} , f_3^{p1} при р-поляризации возбуждающей TEM-волны для различных значений химического потенциала μ_c (0,3, 0,7, 1 эВ) приведены на рис. 5.

Результаты, представленные на рис. 5 – 5.1–5.3, а–в, демонстрируют возможность перестройки рабочей частоты плазмонной графеновой антенны (сканирование по частоте) на резонансных частотах $f_{рез}^{p1}$ основной моды ППП при р-поляризации возбуждающей волны из ТГц в дальний и средний ИК-диапазоны при изменении химического потенциала μ_c в интервале значений 0,3–1 эВ (приложением внешнего электрического поля).

На резонансных частотах f_1^{p1} , f_2^{p1} , f_3^{p1} основной моды ППП при р-поляризации возбужда-

ющей волны наблюдается резонанс электрического тока, создаваемого стоячей поперечной ППП вдоль узкой стороны прямоугольной наноленты [11] и, следовательно, поперечное распределение поверхностного электрического тока \mathbf{j}_s по ширине прямоугольной графеновой наноленты с максимумом в центре (рис. 5 – 5.1–5.3, а). Форма 3D ДН-излучения, создаваемого этим поперечным (по длине волны ППП) электрическим излучателем, тороидальная (рис. 5 – 5.1–5.3, в). Ось 2D ДН в экваториальной плоскости ориентирована параллельно относительно поперечного излучающего тока (рис. 5 – 5.1–5.3, б), и ДН соответствует ДН поперечного симметричного вибратора [17] в E -плоскости (в зависимости от θ , $\varphi = 90^\circ$) (рис. 5 – 5.1–5.2, а); в E -плоскости (в зависимости от θ , $\varphi = 0^\circ$) – это окружность (рис. 5 – 5.1–5.3, б).

Из сравнения ДН антенн на резонансных частотах основной моды ППП $f_3^{s1} = 6,616$ ТГц при s-поляризации (рис. 3 – 3.3) и $f_3^{p1} = 14,104$ ТГц при р-поляризации (рис. 5 – 5.3) следует, что ось ДН ориентирована параллельно в первом случае



5.1

5.2

5.3

Рис. 5. ДН плазмонной антенны на основе прямоугольной графеновой наноленты на диэлектрической подложке на резонансных частотах f_{p1}^{p1} основной моды ППП при р-поляризации возбуждающей ТЕМ-волны и сканирование по частоте в ТГц, далее и среднем ИК-диапазонах при изменении значения химического потенциала μ_c : 2D ДН в E-плоскости (в зависимости от θ , $\varphi = 90^\circ$) (a), в E-плоскости (в зависимости от θ , $\varphi = 0^\circ$) (б) в полярной (a, б) и 3D ДН в сферической (в) системах координат и распределение вектора плотности поверхностного электрического тока \mathbf{j}_s на прямоугольной графеновой наноленте (г); 5.1 – $f_1^{p1} = 7,747 \text{ ТГц}$, $\mu_{c1} = 0,3$; 5.2 – $f_2^{p1} = 11,803 \text{ ТГц}$, $\mu_{c2} = 0,7 \text{ эВ}$; 5.3 – $f_3^{p1} = 14,104 \text{ ТГц}$, $\mu_{c3} = 1 \text{ эВ}$; интенсивность излучения и плотности поверхностного электрического тока \mathbf{j}_s обозначены цветом в электронной версии журнала

Fig. 5. The plasmon antenna pattern based on a rectangular graphene nanoribbon on a dielectric substrate at resonant frequencies f_{p1}^{p1} of the fundamental SPP mode with p-polarization of the exciting TEM wave and frequency scanning in the THz, far and mid-IR ranges with a change in the value of the chemical potential of μ_c : 2D RP in the E-plane (depending on θ , $\varphi = 90^\circ$) (a), in the E-plane (depending on θ , $\varphi = 0^\circ$) (b) in the polar (a, b) and 3D RP in the spherical (c) coordinate systems and the distribution of the surface electric current density vector \mathbf{j}_s on a rectangular graphene nanoribbon (d); 5.1 – $f_1^{p1} = 7,747 \text{ THz}$, $\mu_{c1} = 0,3$; 5.2 – $f_2^{p1} = 11,803 \text{ THz}$, $\mu_{c2} = 0,7 \text{ eV}$; 5.3 – $f_3^{p1} = 14,104 \text{ THz}$, $\mu_{c3} = 1 \text{ eV}$; the radiation intensity and surface electric current density \mathbf{j}_s are indicated by color in the electronic version of the journal

продольному, а во втором – поперечному излучающему току, а следовательно, и ориентация плоскости поляризации излучения полуволнового (по длине волны ППП) электрического излучателя [17] развернулась на 90° в меридианальной плоскости.

Таким образом, плазмонная антенна на основе прямоугольной графеновой наноленты на диэлектрической подложке имеет возможность излучать волны двух ортогональных поляризаций при изменении рабочей частоты с резонансной частоты моды ППП $f_{рез}^s$ при s-поляризации на резонансную частоту моды ППП $f_{рез}^p$ при p-поляризации возбуждающей ТЕМ-волны. Следовательно, поляризация ТГц-, ИК-излучения таких антенн управляема выбором рабочих частот в зависимости от характера плазмонного резонанса (продольный или поперечный) в прямоугольной графеновой наноленте.

Заключение

В результате моделирования показано, что плазмонные антенны на основе прямоугольных графеновых нанолент могут излучать ТГц-, ИК-волны двух ортогональных поляризаций. Выявлены способы управления поляризацией ТГц-, ИК-излучения таких антенн, основанные на выборе рабочих частот, соответствующих плазмонным резонансам мод ППП, и нанесении металлизации на диэлектрическую подложку.

Возможность управления поляризацией ТГц-, ИК-излучения позволит создавать как новые элементы плазмонных графеновых антенных решеток [18], так и новые коммуникационные технологии, в том числе будущих сетей 6G [2]. Эти технологии включают энергоэффективную связь, сети когнитивного радио, которые могут перестраиваться самостоятельно, и внутрислойный полнодуплексный режим, который способен увеличить пропускную способность в два раза [2].

Список литературы

1. Nagatsuma T. Terahertz technologies: present and future // IEICE Electronics Express. 2011. Vol. 8, no. 14. P. 1127–1142. DOI: <https://doi.org/10.1587/elex.8.1127>
2. Polarization control of THz emission using spin-reorientation transition in spintronic heterostructure / D. Khusyainov [et al.] // Scientific Reports. 2021. Vol. 11, no. 1. P. 697. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80781-5>
3. Cox J.D., García de Abajo F.J. Nonlinear graphene nanoplasmonics // Accounts of Chemical Research. 2019. Vol. 52, no. 9. P. 2536–2547. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.9b00308>
4. Graphene-based Yagi-Uda antenna with reconfigurable radiation patterns / Y. Wu [et al.] // AIP Advances. 2016. Vol. 6, no. 6. P. 065308. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4953916>
5. Naghdehforushha S.A., Moradi G. High directivity plasmonic graphene-based patch array antennas with tunable THz band communications // Optik. 2018. Vol. 168. P. 440–445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.04.104>
6. Design and development of a graphene-based reconfigurable patch antenna array for THz applications / E.L. Isam [et al.] // Frequenz. 2023. Vol. 77, no. 3-4. P. 219–228. DOI: <https://doi.org/10.1515/freq-2022-0051>
7. A proximity coupled wideband graphene antenna with the generation of higher order TM modes for THz applications / G. Varshney [et al.] // Optical Materials. 2018. Vol. 85. P. 456–463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.09.015>
8. Математическое моделирование управляемых поляризаторов терагерцового диапазона на основе периодических 2D-структур из прямоугольных нанолент графена / Г.С. Макеева [и др.] // Известия вузов. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2015. № 2 (34). С. 203–216. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-upravlyaemyh-polyarizatorov-teragertsovogo-diapazona-na-osnove-periodicheskikh-2d-struktur-iz>
9. Макеева Г.С., Голованов О.А., Горелов Р.А. Способы и эффективность управления дисперсией электромагнитных волн в волноведущей структуре «углеродная нанотрубка – графен» в терагерцовом и инфракрасном диапазонах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18, № 4. С. 24–33. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7225>
10. Lerer A.M., Makeeva G.S. Reconfigurable terahertz polarizers and absorbers based on graphene metasurfaces // 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). 2018. P. 363–370. DOI: <https://doi.org/10.1109/APEDE.2018.8542192>
11. Лерер А.М., Макеева Г.С. Поляризационные эффекты и резонансное поглощение при дифракции терагерцовых волн на графеновых метаповерхностях // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125, № 6. С. 838–843. DOI: <https://doi.org/10.21883/OS.2018.12.46948.257-18>
12. Расчет эффективности управления проводимостью графена действием электрического поля в терагерцовом диапазоне частот / О.А. Голованов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18, № 2. С. 27–32. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7311>
13. Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств в CST Studio Suite. М.: Солон-пресс, 2018. 428 с.
14. Курушин А.А., Банков С.Е. Моделирование антенн и СВЧ-структур с помощью HFSS. М.: Солон-пресс, 2018. 280 с.
15. CST Microwave Studio 2023. URL: <https://www.3ds.com/products/simulia>

16. Голованов О.А., Makeeva Г.С., Вареница В.В. Математическое моделирование дифракции ТЕМ-волн на периодических 2D-структурах из микролент графена конечной длины в терагерцовом диапазоне // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17, № 4. С. 17–25. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7251>
17. Драбкин А.Л., Зуенко В.Л. Антенно-фидерные устройства. М.: Советское радио, 1961. 816 с.
18. Nefedov N.N., Makeeva G.S. Electronic beam control and frequency scanning of a graphene antenna array in the terahertz and far-IR frequency ranges // Technical Physics Letters. 2023. Vol. 49, no. 5. P. 37–42. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063785023040028>

Информация об авторе

Makeeva Galina Stepanovna, доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиотехники и радиоэлектронных систем Пензенского государственного университета, г. Пенза, Россия. После окончания с отличием в 1968 г. Пензенского политехнического института по специальности «Радиотехника» в 1969–1972 гг. обучалась в аспирантуре ЛЭТИ. Ученая степень кандидата технических наук присуждена Диссертационным советом ЛЭТИ в апреле 1973 г. и утверждена ВАК СССР в декабре 1973 г. С 1973 г. работает в Пензенском политехническом институте сначала в должности ассистента, с 1974 г. – доцента (ученое звание доцента по кафедре радиотехники присвоено ВАК СССР в 1977 г.); с 1993 г. – профессора кафедры радиотехники Пензенского государственного технического университета. В 1997 г. защитила докторскую диссертацию по специальности 01.04.03 «Радиофизика, включая квантовую радиофизику» в Диссертационном совете Института радиотехники и электроники РАН. Ученая степень доктора физико-математических наук присуждена ВАК РФ 10 октября 1997 г. В декабре 1997 г. присвоено ученое звание профессора по кафедре радиотехники. В ноябре 2000 г. избрана действительным членом Академии инженерных наук РФ им. А.М. Прохорова по Поволжскому отделению.

Область научных интересов: радиофизика, вычислительная электродинамика, теория электромагнитного поля и численные методы, наноэлектродинамика, устройства и приборы СВЧ- и миллиметрового диапазонов, компоненты и устройства терагерцового диапазона, магнитные наноматериалы и наноструктуры, графеновые метаматериалы и плазмоника, микроволновая фотоника.

E-mail: radiotech@pnzgu.ru

Physics of Wave Processes and Radio Systems

2027, vol. 27, no. 3, pp. 81–90

DOI [10.18469/1810-3189.2024.27.3.81-90](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2024.27.3.81-90)
UDC 621.371.334:537.874.6
Original Research

Received 2 April 2024
Accepted 6 May 2024
Published 30 September 2024

Plasmonic antennas based on rectangular graphene nanoribbons with controlled polarization of terahertz and infrared radiation

Galina S. Makeeva

Penza State University
40, Krasnaya Street,
Penza, 440026, Russia

Abstract – Background. To develop new terahertz wireless communication systems with high throughput and transmission speeds, such as 6G and above, effective control of the polarization direction of emitted terahertz waves is necessary, but most methods are technologically complex and expensive. The implementation of terahertz antennas and devices based on 2D materials such as graphene solves the problem associated with developing effective control. **Aim.** Study of the possibility of controlling the polarization of terahertz and IR radiation of plasmonic antennas based on rectangular graphene nanoribbons by changing the chemical potential (application of an external electric field). **Methods.** This important scientific problem related to the design of terahertz antennas can largely be solved by simulation using the electrodynamic simulation program CST MWS 2023. **Results.** Plasmon terahertz antennas based on rectangular graphene nanoribbons were chosen as the object of analysis and the possibility of emitting waves of two orthogonal polarizations was shown. Methods have been identified for controlling the polarization of terahertz and IR radiation from such antennas, based on the selection of operating frequencies corresponding to the resonances of the modes of surface plasmon-polaritons, and the application of metallization to the dielectric substrate. **Conclusion.** The ability to control the polarization of terahertz and IR radiation makes it possible to create both new elements of plasmonic antenna arrays and new communication technologies, including future 6G networks.

Keywords – plasmonic antennas; rectangular graphene nanoribbons; polarization; plasmon resonance; radiation pattern.

✉ radiotech@pnzgu.ru (Galina S. Makeeva)

 © Galina S. Makeeva, 2024

References

1. T. Nagatsuma, “Terahertz technologies: present and future,” *IEICE Electronics Express*, vol. 8, no. 14, pp. 1127–1142, 2011, doi: <https://doi.org/10.1587/elex.8.1127>.
2. D. Khusyainov et al., “Polarization control of THz emission using spin-reorientation transition in spintronic heterostructure,” *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 697, 2021, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80781-5>.

3. J. D. Cox and F. J. Abajo, "Nonlinear graphene nanoplasmonics," *Accounts of Chemical Research*, vol. 52, no. 9, pp. 2536–2547, 2019, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.9b00308>.
4. Y. Wu et al., "Graphene-based Yagi–Uda antenna with reconfigurable radiation patterns," *AIP Advances*, vol. 6, no. 6, p. 065308, 2016, doi: <https://doi.org/10.1063/1.4953916>.
5. S. A. Naghdehforushha and G. Moradi, "High directivity plasmonic graphene-based patch array antennas with tunable THz band communications," *Optik*, vol. 168, pp. 440–445, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.04.104>.
6. E. L. Isam et al., "Design and development of a graphene-based reconfigurable patch antenna array for THz applications," *Frequenz*, vol. 77, no. 3, pp. 219–228, 2023, doi: <https://doi.org/10.1515/freq-2022-0051>.
7. G. Varshney et al., "A proximity coupled wideband graphene antenna with the generation of higher order TM modes for THz applications," *Optical Materials*, vol. 85, pp. 456–463, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.09.015>.
8. G. S. Makeeva et al., "Mathematical modeling of controlled terahertz polarizers based on periodic 2D structures made of rectangular graphene nanoribbons," *Izvestiya vuzov. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki*, no. 2 (34), pp. 203–216, 2015, url: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-upravlyaemyh-polyarizatorov-teragertsovogo-diapazona-na-osnove-periodicheskikh-2d-struktur-iz>. (In Russ.)
9. G. S. Makeeva, O. A. Golovanov, and R. A. Gorelov, "Methods and efficiency of control of dispersion of electromagnetic waves in the waveguiding structure based on carbon nanotube-graphene at terahertz and infrared frequency ranges," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 24–33, 2015, url: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7225>. (In Russ.)
10. A. M. Lerer and G. S. Makeeva, "Reconfigurable terahertz polarizers and absorbers based on graphene metasurfaces," *2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*, pp. 363–370, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/APEDE.2018.8542192>.
11. A. M. Lerer and G. S. Makeeva, "Polarization effects and resonant absorption during diffraction of terahertz waves on graphene metasurfaces," *Optika i spektroskopiya*, vol. 125, no. 6, pp. 838–843, 2018, doi: <https://doi.org/10.21883/OS.2018.12.46948.257-18>. (In Russ.)
12. O. A. Golovanov et al., "Calculation of efficiency of control of graphene conductivity by the external electric field at terahertz frequency range," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 27–32, 2015, url: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7311>. (In Russ.)
13. A. A. Kurushin, *Designing Microwave Devices in CST Studio Suite*. Moscow: Solon-press, 2018. (In Russ.)
14. A. A. Kurushin and S. E. Bankov, *Modeling Antennas and Microwave Structures Using HFSS*. Moscow: Solon-press, 2018. (In Russ.)
15. CST Microwave Studio 2023. URL: <https://www.3ds.com/products/simulia>
16. O. A. Golovanov, G. S. Makeeva, and V. V. Varenitsa, "Mathematical modeling of diffraction of tem-wave on the periodic 2D structures of graphene micro-ribbons with finite length at terahertz frequency range," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 17, no. 4, pp. 17–25, 2014, url: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7251>. (In Russ.)
17. A. L. Drabkin and V. L. Zuzenko, *Antenna-Feeder Devices*. Moscow: Sovetskoe radio, 1961. (In Russ.)
18. N. N. Nefedov and G. S. Makeeva, "Electronic beam control and frequency scanning of a graphene antenna array in the terahertz and far-IR frequency ranges," *Technical Physics Letters*, vol. 49, no. 5, pp. 37–42, 2023, doi: <https://doi.org/10.1134/S1063785023040028>.

Information about the Author

Makeeva Galina Stepanovna, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Radio Engineering and Radioelectronic Systems, Penza State University, Penza, Russia. After graduating with honors in 1968 from the Penza Polytechnic Institute with a degree in Radio Engineering, she studied in the graduate school of LETI in 1969–1972. The academic degree of Candidate of Technical Sciences was awarded by the Dissertation Council of LETI in April 1973 and approved by the Higher Attestation Commission of the USSR in December 1973. Since 1973 she has been working at the Penza Polytechnic Institute, first as an assistant, and since 1974 as an associate professor (the academic title of associate professor in the Department of Radio Engineering was awarded by the Higher Attestation Commission of the USSR in 1977); since 1993 – Professor of the Department of Radio Engineering, Penza State Technical University. In 1997, she defended her doctoral dissertation in specialty 01.04.03 «Radiophysics, including quantum radiophysics» at the Dissertation Council of the Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences. The academic degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences was awarded by the Higher Attestation Commission of the Russian Federation on October 10, 1997. In December 1997, she was awarded the academic title of Professor in the Department of Radio Engineering. In November 2000, she was elected a full member of the A.M. Prokhorov Academy of Engineering Sciences of the Russian Federation, Volga Region Branch.

Research interests: radiophysics, computational electrodynamics, electromagnetic field theory and numerical methods, nanoelectrodynamics, microwave and millimeter range devices and instruments, terahertz range components and devices, magnetic nanomaterials and nanostructures, graphene metamaterials and plasmonics, microwave photonics.

E-mail: radiotech@pnzgu.ru