

УДК 621.3.091.22

doi: 10.21685/2072-3059-2024-2-7

Фрактальная графеновая плазмон-поляритонная патч-наноантенна для ближнего инфракрасного и оптического диапазонов частот

Р. А. Браже¹, Е. Ю. Лебедев²

^{1,2}Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

¹brazhe@ulstu.ru, ²lebedev.egor@ulsk173.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Благодаря своим мульти- и широкополосности, миниатюрности и планарной конструкции фрактальные патч-наноантенны получили широкое распространение в системах беспроводной связи в гигагерцовом диапазоне частот. Имеются успешные попытки их использования также на терагерцовых и оптических частотах. В этом случае весьма перспективным материалом для патча является графен ввиду его высокой электропроводности и удобства возбуждения поверхностных плазмон-поляритонных волн. В связи с этим целью работы является проектирование фрактальной графеновой плазмон-поляритонной патч-наноантенны для работы в ближней инфракрасной и оптической части спектра электромагнитных волн и математического моделирования ее характеристик. *Материалы и методы.* Предложен графеновый патч в форме треугольного «ковра» Серпинского в четвертой итерации на диэлектрической подложке из карбида кремния, арсенида галия или кварца, нанесенный на металлический заземленный электрод. Между патчем и заземленным электродом приложено затворное напряжение для сдвига уровня Ферми в графене относительно точки Дирака. В теоретической части работы использованы известные положения из физики графенов, теории фракталов и электроники сверхвысоких частот, плазмоники и антенно-фидерной техники. Моделирование производилось с использованием программного пакета CST Microwave Studio. *Результаты.* Для опорной модели наноантенны с фрактальным графеновым патчем в форме треугольника Серпинского в четвертой итерации со стороной большего треугольника 625 нм на диэлектрической подложке из карбида кремния толщиной 10 нм получены следующие результаты: резонансные частоты – 204, 356, 583, 912, 1294 ТГц; коэффициент стоячей волны напряжения – не выше 1,7; входной импеданс – от 29 до 42 Ом. Максимальный коэффициент усиления (на частоте 582 ТГц) достигает значения 7,43 дБм, угловая ширина основного лепестка 91,8°, уровень боковых лепестков на 9,1 дБ меньше уровня основного лепестка. С целью оптимизации параметров антенны исследовано влияние на них материала и толщины подложки. *Выводы.* Показана возможность создания фрактальных патч-наноантенн на графене для работы в ближней части инфракрасной и оптической части электромагнитного излучения. Результаты работы могут быть использованы при проектировании указанных антенн и расчете их характеристик.

Ключевые слова: фрактальные патч-наноантенны, графен, параметр рассеяния, коэффициент стоячей волны, входной импеданс, диаграмма направленности

Для цитирования: Браже Р. А., Лебедев Е. Ю. Фрактальная графеновая плазмон-поляритонная патч-наноантенна для ближнего инфракрасного и оптического диапазонов частот // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 2. С. 98–111. doi: 10.21685/2072-3059-2024-2-7

Fractal graphene patch plasmon-polariton nanoantenna for near infrared and optical frequency ranges

© Браже Р. А., Лебедев Е. Ю., 2024. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

R.A. Brazhe¹, E.Yu. Lebedev²^{1,2}Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia¹brazhe@ulstu.ru, ²lebedev.egor@ulsk173.ru

Abstract. *Background.* Due to their multi- and broadband, miniaturization and planar design, fractal patch nanoantennas are widely used in wireless communication system in the gigahertz frequency range. In this case, graphene is very promising material for the patch due to its high electrical conductivity and the convenience of exciting surface plasmon-polariton waves. In this regard, the purpose of the study is to design a fractal graphene plasmon-polariton patch nanoantenna for operation in the near IR and optical part of the electromagnetic wave spectrum and mathematical modeling of its characteristics. *Materials and methods.* A graphene patch in the form of a triangular Sierpinski gasket in the 4th iteration on a dielectric substrate of silicon carbide, gallium arsenide or quartz deposited on a metal ground electrode is proposed. A gate voltage is applied between the patch and the grounded electrode to shift the Fermi level in graphene relative to the Dirac point. In the theoretical part of the work, well-known provisions from graphene physics, fractal theory and microwave electronics and antenna-feeder technology are used. The simulation was performed using the Microwave Studio software package. *Results.* For the reference model of a nanoantenna with a graphene fractal patch in the form of a Sierpinski triangle in the 4th iteration with a side of a large triangle of 625 nm on the dielectric substrate of silicon carbide with a thickness of 10 nm, the following results were obtained: resonant frequencies is – 204 THz, 356 THz, 583 THz, 912 THz, 1294 THz; VSWR – no higher than 1.7; the input impedance is from 29 to 42 Ω . The maximum gain (at the frequency of 583 THz) reaches a value of 7.43 dB, the angular width of the main lobe is 91.8°, the level of the side lobes is 9.1 dBm less than the level of the main lobe. In order to optimize the material and thickness on them has been studied. *Conclusion.* The possibility of creating fractal patch nanoantennas on graphene for operation in the near-infrared and optical part of electromagnetic radiation is shown. The results of the work can be used in the design of these antennas and the calculation of their characteristics.

Keywords: fractal patch nanoantennas, graphene, scattering parameter, standing wave ratio, input impedance, emission pattern

For citation: Brazhe R.A., Lebedev E.Yu. Fractal graphene patch plasmon-polariton nanoantenna for near infrared and optical frequency ranges. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(2):98–111. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-2-7

Введение

В силу своей самоподобно разветвленной структуры фрактальные антенны позволяют существенно уменьшить габариты и вес элементов антенно-фидерного тракта, что особенно важно для миниатюризации быстродействующих мобильных систем беспроводной связи. В зарубежных публикациях историю их создания обычно связывают с теоретическими исследованиями Й. Кима и Д. Джаггарда по фрактальным решеткам (1986) [1], а практическое воплощение приписывают американскому инженеру Н. Козну (1995) [2]. Однако справедливости ради следует отметить, что безусловный приоритет (с 1979 г.) в деле разработки интеллектуальных радиотехнических систем и устройств, основанных на преимуществах фрактальной радиоэлектроники, в том числе и создание первых многочастотных фрактальных приемно-передающих антенн (в 1988 г.), принадлежит российскому ученому А. А. Потапову [3, 4].

Вместе с тем в настоящее время в зарубежной литературе начиная с начала XXI в. имеются десятки публикаций по фрактальным, в том числе, графеновым, патч-наноантеннам [5–20], в то время как в отечественной литературе данной теме уделено мало внимания [21–23]. Принимая во внимание названные обстоятельства, разработку отечественных фрактальных антенн, в том числе плазмон-поляритонных патч-наноантенн, работающих в инфракрасном (ИК) и оптическом диапазонах частот, следует признать актуальной.

Целью настоящей работы является проведение расчетов и математического моделирования технических характеристик графеновой плазмон-поляритонной патч-наноантенны, построенной на основе треугольного «ковра» Серпинского в четвертой итерации.

Материалы и методы

В качестве основного материала для исследуемой наноантенны рассматривается графен. Между графеном и заземленным металлическим электродом антенны расположен диэлектрический подслой. Для сдвига уровня Ферми в графене относительно точки Дирака между ним и заземленной пластиной прикладывается затворное напряжение в положительной полярности, чтобы реализовать электронную проводимость в графене. Величина приложенного напряжения зависит от толщины диэлектрика таким образом, чтобы напряженность затворного электрического поля не превышала пробойного значения. В качестве диэлектриков рассматривались карбид кремния (SiC), диоксид кремния (SiO₂) и арсенид галлия – широкозонный полупроводник (GaAs). Толщина диэлектрического подслоя задавалась равной 8, 10, 15 и 20 нм.

Математическое моделирование ожидаемых характеристик антенны осуществлялось в пакете прикладных программ CST Microwave Studio. Рассчитывались следующие характеристики: частотные зависимости элемента S_{11} матрицы рассеяния, коэффициента стоячей волны напряжения (КСВН) и входного импеданса антенны, а также диаграммы направленности антенны в полярных и сферических координатах на резонансных частотах. Частотная зависимость поверхностной электропроводности графена рассчитывалась в приближении Друде, справедливом для внутризонной составляющей проводимости. Обоснование этого подхода дано на основе предварительных числовых оценок.

Результаты

Предварительные расчеты и элементы конструкции. В отличие от электромагнитных волн, поверхностные плазмон-поляритоны обладают в графене сильной дисперсией, зависящей от его электропроводности. В свою очередь частотная зависимость поверхностной электропроводности графена содержит два комплексных слагаемых, отвечающих за внутризонную и межзонную проводимость, и имеет весьма сложный вид [19]. Ее точный расчет требует больших затрат машинного времени. Поэтому при расчетах плазмон-поляритонных наноантенн, предназначенных для работы в терагерцовом диапазоне частот, обычно пользуются приближением Друде, которое ограничивается учетом лишь внутризонной поверхностной проводимости графена [18, 20]:

$$\sigma_s \approx \frac{ie^2\mu_C}{\pi\hbar^2(\omega+i2\Gamma)} = -\frac{2e^2\mu_C\Gamma}{\pi\hbar^2(\omega^2+4\Gamma^2)} + i\frac{e^2\mu_C\omega}{\pi\hbar^2(\omega^2+4\Gamma^2)}, \quad (1)$$

где $\mu_C = \hbar v_F \sqrt{\pi n_2}$ – химический потенциал (энергия Ферми электрона), зависящий от скорости Ферми v_F электронов в графене и двумерной их концентрации $n_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_d E_G / e$ [24]; $2\Gamma = 1/\tau$ – удвоенное значение скорости рассеяния носителей заряда, обратное по смыслу их времени релаксации; причем $\tau = \mu \mu_c / (ev_F^2)$, где μ – подвижность носителей заряда (электронов). Смысл остальных обозначений следующий: e – элементарный заряд; \hbar – приведенная постоянная Планка; $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота колебаний сигнала (f – его линейная частота); ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; ε_d – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; E_G – напряженность затворного электрического поля.

В случае графена на подложке из карбида кремния ($\varepsilon_d = 9,66$) при предпробойном значении напряженности затворного электрического поля ($E_G = 10^7$ В/м) имеем $n_2 = 5,34 \cdot 10^{-15}$ м⁻², $v_F = 0,8 \cdot 10^6$ м/с, $\mu_c = 0,07$ эВ, $\tau = 2,13 \cdot 10^{-10}$ с, $2\Gamma = 4,69 \cdot 10^{-9}$ с⁻¹. Это означает, что в терагерцовом диапазоне $2\Gamma \ll \omega$, из (1) следует, что $\text{Re} \sigma_s = -9,58 \cdot 10^{17} / f^2$ см, а $\text{Im} \sigma_s = 1,28 \cdot 10^9 / f$ см.

Приняв за «толщину» графенового листа расстояние между слоями в кристаллической решетке графита $\Delta = 0,34$ нм, найдем эффективную объемную удельную проводимость графена:

$$\sigma_V(f) = \frac{2,82 \cdot 10^{25}}{f^2} + i \frac{3,76 \cdot 10^{18}}{f} \text{ (См/м)}. \quad (2)$$

Продольная и поперечная относительная диэлектрическая проницаемости графена находятся по формулам [19]:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_r + i \frac{\sigma_V(\omega)}{\varepsilon_0 \omega} = \varepsilon_r + i \frac{\sigma_V(f)}{2\pi \varepsilon_0 f}, \\ \varepsilon_{\perp} = \varepsilon_r, \end{cases} \quad (3)$$

где $\varepsilon_r = 2,5$ – относительная диэлектрическая проницаемость графена [25].

Тогда из (2)–(4) получаем

$$\varepsilon_{\parallel} = \left(2,5 - 6,77 \frac{10^{28}}{f^2} \right) - i 5,07 \frac{10^{35}}{f^3}. \quad (5)$$

Показатель преломления графена $n = \sqrt{\varepsilon_{\parallel}}$. Из (5) следует, что на частотах $f \geq 100$ ТГц мнимой частью ε_{\parallel} можно пренебречь, а действительная

часть дает действительный положительный показатель преломления на частотах $f \geq 165$ ТГц.

Сориентируемся в дальнейших численных оценках на стандартную длину волны электромагнитного излучения $\lambda = 1550$ нм ($f = 193,5$ ТГц) из С-диапазона для оптических систем связи. На соответствующей частоте сигнала из формулы (5) получаем значение $n = 0,83$. Длина возбуждаемой в графене плазмон-поляритонной волны $\lambda_{SPP} = c / (nf) = 1,86$ мкм. Тогда длина стороны исходного (большого) треугольника Серпинского $s = \lambda_{SPP} / 3 = 0,62$ мкм, что превышает ширину графенового гексагона, равную $0,123$ нм, в 5041 раз. На больших частотах значение s должно быть меньше. Исходя из этих соображений зададим длину стороны исходного треугольника Серпинского s равной 2500 графеновым гексагонам. Понятно, что в таких масштабах атомарной структурой графена можно пренебречь и считать графеновый патч сплошным металлом, а его границы прямыми линиями.

На рис. 1 представлено схематическое изображение описываемой антенны. В исходной опорной модели длина стороны большого треугольника Серпинского составляет 625 нм, в качестве диэлектрика подложки использован SiC с горизонтальным размером 900×700 нм.

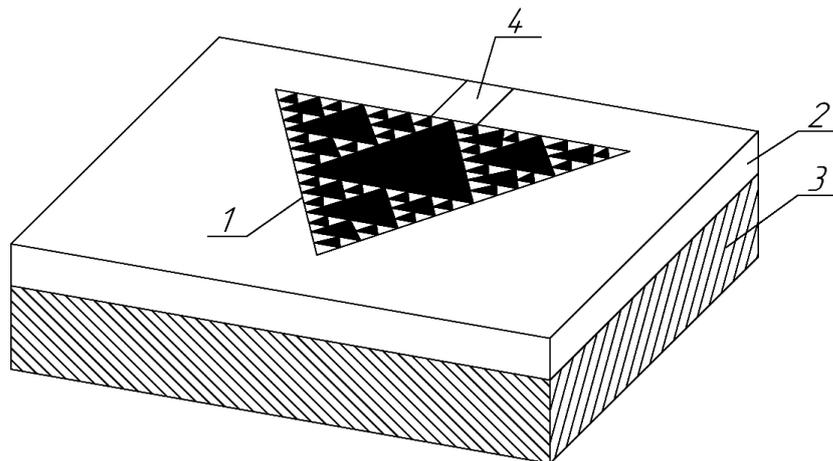


Рис. 1. Устройство фрактальной графеновой плазмон-поляритонной патч-наноантенны: 1 – графеновый патч; 2 – диэлектрическая подложка; 3 – металлическая заземленная пластина; 4 – сигнальный проводник

Результаты моделирования характеристик антенны с диэлектрической подложкой из SiC. Результаты расчетов частотной зависимости элемента S_{11} матрицы рассеяния, КСВН и входного импеданса для подложки из SiC представлены на рис. 2.

На рис. 3, 4 приведены диаграммы направленности антенны с SiC-подложкой толщиной 10 нм для резонансных частот, соответствующих различным итерациям фрактальной структуры.

Полученные результаты для удобства сведены в табл. 1.

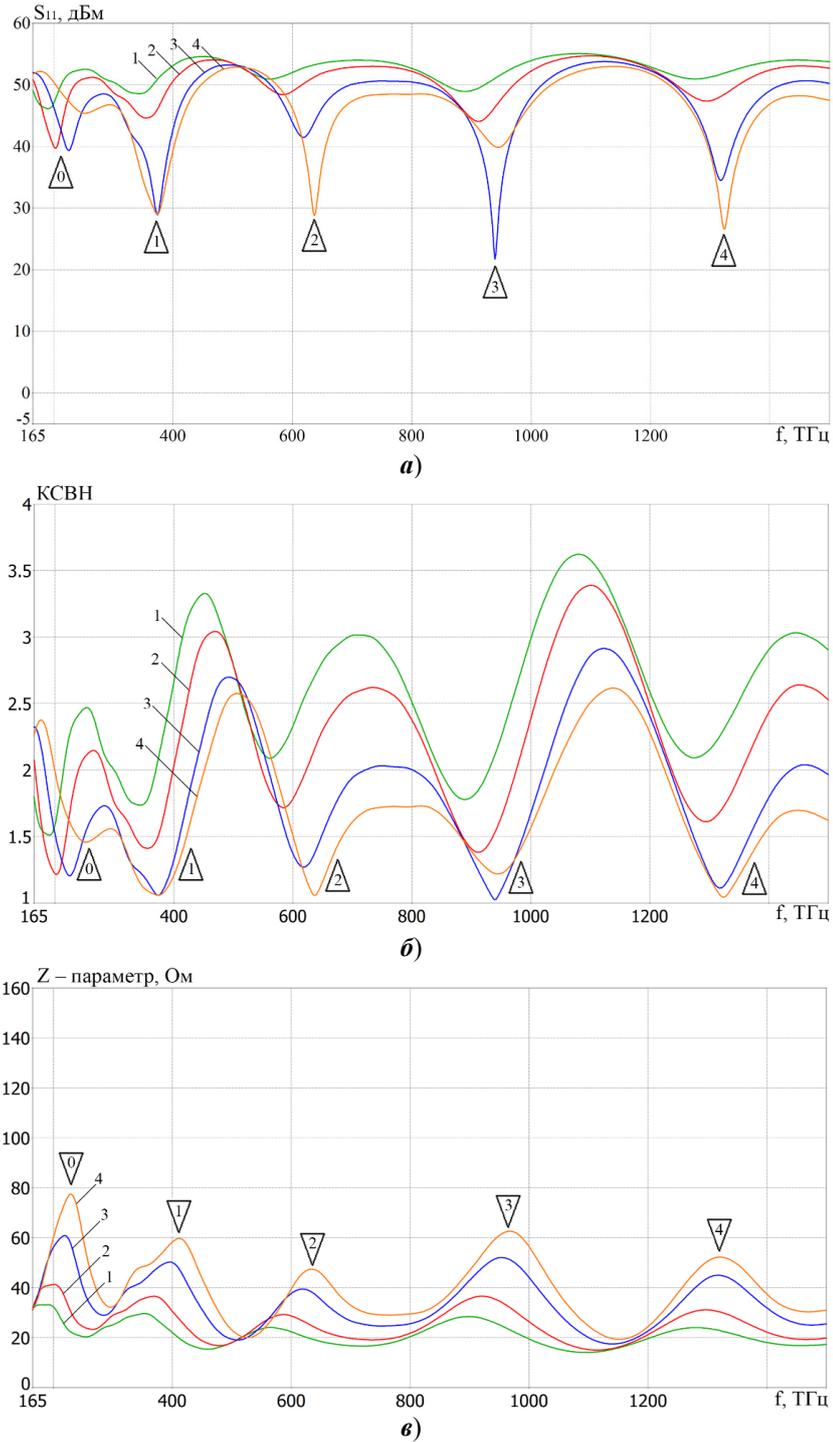


Рис. 2. Частотные зависимости параметра S_{11} в децибелах на милливатт (а), КСВН (б) и Z-параметра (в) антенны с SiC-подложкой для различных значений толщины подложки d : 1 – $d = 8$ нм, 2 – 10 нм, 3 – 15 нм, 4 – 20 нм (цифры в треугольниках напротив резонансных частот указывают порядок итерации фрактальной структуры антенны)

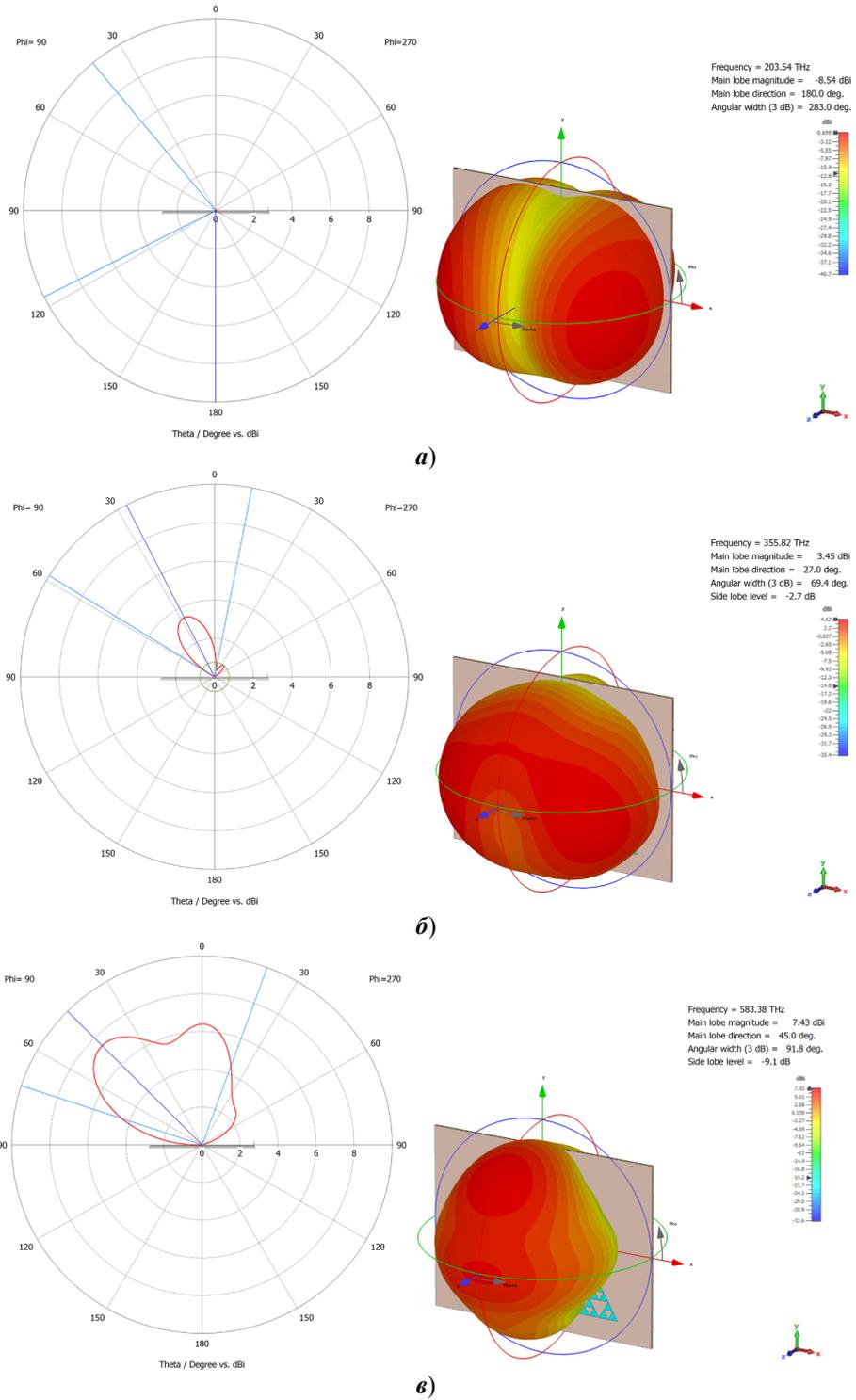


Рис. 3. Диаграммы направленности в полярных и сферических координатах исследуемой антенны с SiC-подложкой толщиной 10 нм на основной резонансной частоте $f_0 = 204$ ТГц (а) и резонансной частоте $f_1 = 356$ ТГц, соответствующей 1-й итерации (б); $f_2 = 583$ ТГц (2-я итерация) (в)

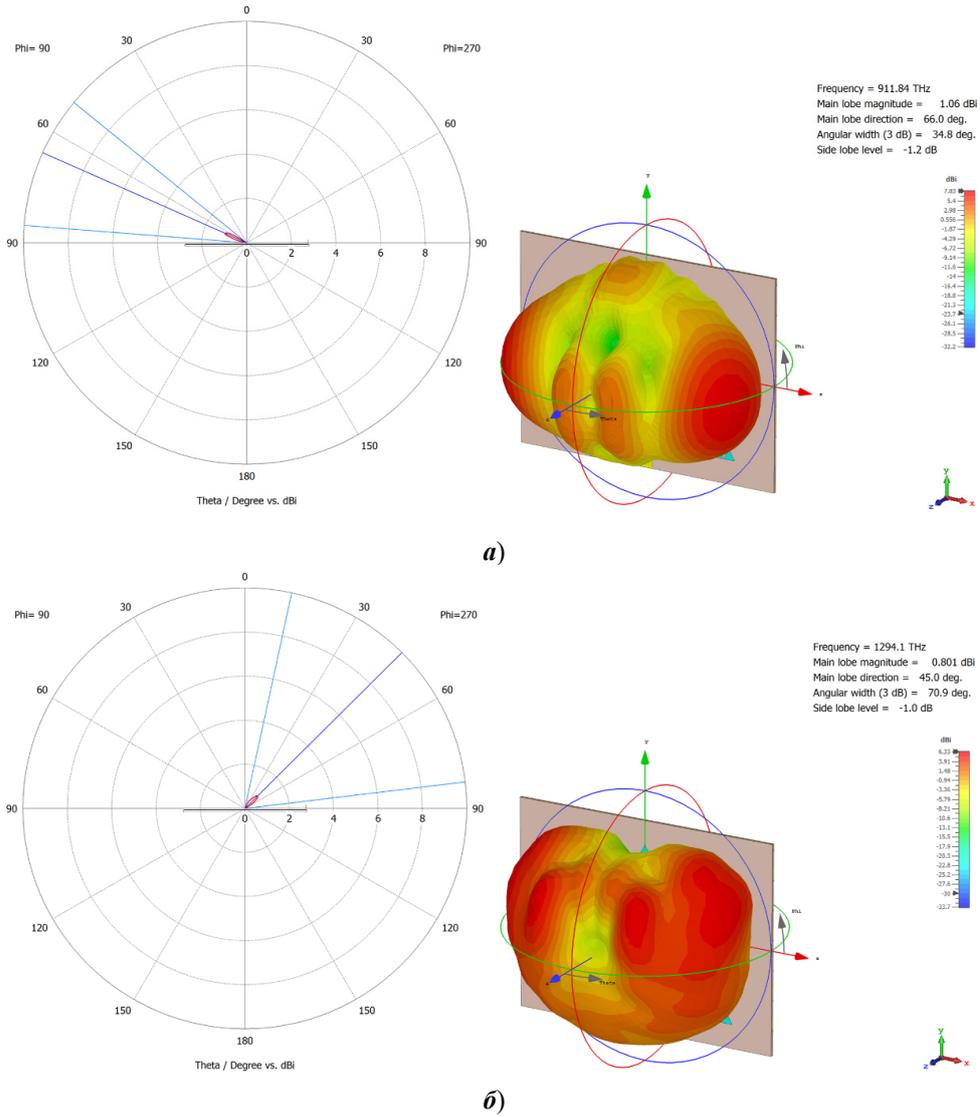


Рис. 4. Диаграммы направленности в полярных и сферических координатах исследуемой антенны с SiC-подложкой толщиной 10 нм на резонансных частотах: $f_3 = 912$ ТГц (3-я итерация) (а), $f_4 = 1294$ ТГц (4-я итерация) (б)

Влияние материала подложки. В качестве альтернативы карбиду кремния в модели фрактальной графеновой плазмон-поляритонной наноплазмонной антенны рассматривались кварц (SiO_2) с относительной диэлектрической проницаемостью в ИК-диапазоне $\epsilon_d = 3,75$ и арсенид галлия (GaAs) с $\epsilon_d = 12,94$. Полученные при этом результаты в целом похожи на аналогичные результаты для подложки из карбида кремния. Чтобы не перегружать статью обилием рисунков, приведем здесь лишь характеристики соответствующих антенн в табл. 2, 3.

Таблица 1

Характеристики исследуемой антенны с SiC-подложкой ($\epsilon_d = 9,66$)

Толщина подложки, нм	Резонансная частота, ТГц	КСВН	Входной импеданс, Ом	Уровень главного лепестка, дБи	Направленность, град	Угловая ширина, град	Уровень боковых лепестков, дБ
8	189	1,51	33	-8,39	30	273	-
	339	1,74	29	3,85	28	65	-4,0
	561	2,09	24	7,46	44	91	-8,3
	888	1,78	28	2,41	64	36	-2,6
	1273	2,09	24	2,04	37	113	-2,3
10	204	1,21	41	-8,54	180	283	-
	356	1,41	36	3,45	27	69	-2,7
	583	1,72	29	7,43	45	92	-9,1
	912	1,38	36	1,06	66	35	-1,2
	1294	1,61	31	0,80	45	71	-1,0
15	226	1,21	60	-1,78	34	77	-6,9
	374	1,05	48	0,90	24	125	-7,3
	618	1,26	40	6,62	1,0	115	-13
	939	1,04	52	2,64	13	58	-2,6
	1316	1,09	46	5,58	39	56	-12
20	251	1,47	58	0,67	36	74	-10
	372	1,06	51	0,25	20	50	-4,2
	637	1,05	48	5,44	1,0	83	-15
	943	1,24	61	4,45	9,0	63	-1,6
	1323	1,06	53	6,87	25	63	-1,5

Таблица 2

Характеристики исследуемой антенны с SiO₂-подложкой ($\epsilon_d = 3,75$)

Толщина подложки, нм	Резонансная частота, ТГц	КСВН	Входной импеданс, Ом	Уровень главного лепестка, дБи	Направленность, град	Угловая ширина, град	Уровень боковых лепестков, дБ
8	149	1,02	49	-2,03	34	113	-4,2
	295	1,23	61	1,32	24	69	-2,5
	536	1,17	44	5,64	44	88	-8,1
	904	1,37	37	8,4	57	70	-2,8
	1426	1,13	44	10,1	69	28	-3,8
10	160	1,02	51	-1,85	32	115	-5,5
	313	1,46	73	1,06	27	59	-1,1
	538	1,00	50	6,19	43	90	-8,9
	934	1,16	43	8,26	59	92	-5,6
	1452	1,08	54	9,76	71	29	-3,9
15	193	1,04	49	-1,98	51	99	-11
	476	1,15	46	4,73	35	101	-18
	986	1,24	62	8,73	3,0	58	-1,6
20	212	1,03	50	-4,24	32	121	-1,6
	478	1,04	48	4,1	44	69	-3,1
	1200	1,22	41	5,62	18	46	-1,0

Таблица 3

Характеристики исследуемой антенны с GaAs-подложкой ($\epsilon_d = 12,94$)

Толщина подложки, нм	Резонансная частота, ТГц	КСВН	Входной импеданс, Ом	Уровень главного лепестка, дБи	Направленность, град	Угловая ширина, град	Уровень боковых лепестков, дБ
8	178	1,81	28	-4,26	165	93	-2,0
	307	1,88	27	3,24	23	69	-4,8
	500	2,28	22	7,18	42	97	-11,1
	794	1,93	26	-0,26	61	67	-1,4
	1136	2,27	22	1,07	30	125	-7,5
10	180	1,33	38	-5,06	23	109	-1,6
	322	1,54	33	1,78	21	73	-5,2
	522	1,90	26	7,11	43	98	-9,1
	816	1,56	32	-0,21	1,0	64	-1,5
	1156	1,82	27	-0,10	38	75	-0,7
15	200	1,05	52	0,90	27	79	-7,7
	340	1,17	43	-0,32	15	117	-7,5
	552	1,42	35	6,24	5	106	-11,2
	843	1,09	46	2,37	9	59	-2,9
	1178	1,26	40	4,15	52	65	-7,7
20	214	1,26	61	1,34	30	79	-10,3
	347	1,02	49	-1,27	19	112	-
	570	1,17	43	5,61	4,0	95	-17,8
	850	1,12	56	3,74	16	68	-3,5
	1184	1,05	47	6,07	19	129	-12,6

Обсуждение

Из результатов, представленных на рис. 2–4 и в табл. 1–3, следует, что, независимо от материала подложки между графеновым патчем и заземленной пластиной, с увеличением ее толщины резонансные частоты антенны возрастают. Что касается КСВН и входного импеданса, то для этих параметров какой-либо их монотонной зависимости от толщины подложки не обнаружено. Однако на всех резонансных частотах при любом значении толщины подложки от 8 до 20 нм КСВН антенны практически всегда не превышает 2,0. Входной импеданс антенны варьирует в пределах от 22 до 62 Ом.

Из табл. 1–3 видно, что антенны с подложкой, имеющей большие значения диэлектрической проницаемости: SiSi GaAs, обладают похожими характеристиками.

В обоих случаях максимальное усиление сигнала достигается при толщине подложки $d = 8$ нм на частоте, соответствующей второй итерации, попадающей в оптический диапазон частот. При этом угловая ширина главного лепестка диаграммы направленности по уровню 3 дБ весьма велика: свыше 90° , а уровень боковых лепестков на 8–11 дБ ниже уровня главного лепестка.

Подложка из SiO_2 , имеющего меньшую диэлектрическую проницаемость, оказалась менее пригодной для фрактальных патч-наноантенн, предназначенных для работы в ближнем ИК- и оптическом диапазонах. Максимальная интенсивность сигнала здесь достигается на четвертой итерации фрактальной структуры антенны в ультрафиолетовой части спектра электро-

магнитных волн, а уровень боковых лепестков лишь на 3,8 дБ ниже уровня главного лепестка. Кроме того, при толщинах SiO_2 -подложки, равных 15 и 20 нм, резонансы, соответствующие третьей и четвертой итерациям, не обнаруживаются ввиду больших потерь на рассеяния сигнала.

Из представленных в табл. 2, 3 результатов видно, что использование в качестве антенной подложки кварца дает более низкие значения резонансных частот по сравнению с подложкой из арсенида галлия, что подтверждает выводы, полученные в работе [18] для графеновых плазмонных наноантенн терагерцового диапазона с прямоугольным патчем.

Заключение

Проведенное в работе математическое моделирование графеновых фрактальных плазмон-поляритонных патч-наноантенн на основе треугольного «ковра» Серпинского показывает, что такие антенны могут быть реализованы для работы в ближнем ИК- и оптическом диапазонах частот. Обладая миниатюрными размерами, многополосностью и возможностью оперативного перехода с одной рабочей частоты на другую, выполненные по планарной технологии, они могут найти применение в системах беспроводной связи. Характеристиками антенны можно управлять как на этапе расчетно-конструкторской работы, варьируя размеры патча и материалы его подложки, так и в процессе эксплуатации электронным путем, изменяя затворное напряжение и(или) перестраиваясь на другую полосу рабочих частот.

Список литературы

1. Ким Й., Джаггард Д. Л. Фрактальные случайные решетки // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. 1986. Т. 74, № 9. С. 124–126.
2. Cohen N. Fractal Antennas: Part 1 // Communications Quarterly. 1995. P. 7–22
3. Потапов А. А. Топологическая текстурно-фрактальная обработка сигналов и полей в радиофизике, радиотехнике и радиолокации: созданные методы и технологии (1997–2022 гг.) – Фрактальная инженерия // ГрафиКон-2022 : сб. тр. по материалам 32-й Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению. Рязань, 2022. С. 741–755. URL: https://www.graphicon.ru/paper_076.pdf
4. Потапов А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. М. : Университетская книга, 2005. 844 с.
5. Mishra R. K., Ghatak R., Poddar D. R. Design formula for Sierpinski gasket pre-fractal planar-monopole antennas // IEEE Antennas and Propagation. 2008. Vol. 50, № 3. P. 104–107. doi: 10.1109/MAP.2008.4563575
6. Sederberg S., Elezzabi A. Y. Sierpinski fractal plasmonic antenna: A fractal abstraction of the plasmonic bowtie antenna // Optic Express. 2011. Vol. 19, № 11. P. 10456–10461. doi: 10.1364/OE.19.010456
7. Rosa L., Sun K., Juodkazis S. Sierpinski fractal plasmonic nanoantennas // Physica Status Solidi (RRL). 2011. Vol. 5, № 5–6. P. 175–177. doi: 10.1002/pssr.201105136
8. Llatser I., Kremers C., Cabellos-Aparicio A., Jornet J. M., Alarcon E., Chigrin D. N. Graphene-based nano-patch antenna for terahertz radiation // Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications. 2012. № 10. P. 353–358. doi: 10.1016/j.photonics.2012.05.011
9. Yousefi L., Foster A. C. Waveguide-fed optical hybrid plasmonic patch nano-antenna // Optic Express. 2012. Vol. 20, № 16. P. 18326–18335. doi: 10.1364/OE.20.018326
10. Jornet J., Akyildiz I. Graphene-based plasmonic nano-antenna for terahertz band communication in nano-networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2013. Vol. 31. P. 685–694. doi: 10.1109/JSAC.2013.SUP2.1213001

11. Yao Y., Kats M. A., Genevet O., Yu N., Song Y., Kong J., Capasso F. Broad electrical tuning of graphene-loaded plasmonic antennas // *Nano Letters*. 2013. Vol. 13. P. 1257–1264. doi: 10.1021/nl3047943
12. Xu Y.-Y., Xu Y., Hu J., Yin W.-Y. Design of a novel reconfigurable Sierpinski fractal graphene antenna operating at THz band // *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*. 2013. P. 574–575.
13. Hussien R. T., Abood D. I. A wideband hybrid plasmonic patch nanoantenna // *International Journal of Electronics and Communication Engineering and Technology (IJECET)*. 2014. Vol. 5, № 9. P. 01–08
14. Zakrajsek L., Einarsson E., Tawdar N., Medley M., Jornet J. M. Lithographically defined plasmonic graphene antennas for terahertz-band communication // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2016. Vol. 15, P. 1553–1556. doi: 10.1109/LAWP.2016.2527001
15. Dash S., Patnaik A. Dual band reconfigurable plasmonic antenna using bilayer graphene // *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*. 2017. P. 921–922.
16. Dash S., Patnaik A. Graphene plasmonic bowtie antenna for UWB THz application // *IEEE 24th National Conference on Communications*. 2018. Hyderabad, 2018. P. 1–4.
17. Dash S., Patnaik A., Kaushik B. Performance enhancement of graphene plasmonic nanoantenna for THz communication // *IET Microwaves, Antennas and Propagation*. 2018. Vol. 13, № 1. P. 71–75. doi: 10.1049/iet-map.2018.5320
18. Dash S. Performance analysis of graphene plasmonic nanoantenna using different substrate at terahertz band // *ITEE Journal Information Technology and Electrical Engineering*. 2020. Vol. 9, № 2. P. 1–5.
19. Boretti A., Rosa L., Blackledge J., Castelletto S. A preliminary study of a graphene fractal Sierpinski antenna // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 840. P. 012003. doi: 10.1088/1757–899X/840/1/012003
20. Blackledge J., Boretti A., Rosa L., Castelletto S. Fractal graphene patch antennas and the THz communications revolution // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1060. P. 012001. doi: 10.1088/1757–899X/1060/1/012001
21. Слюсар В. И., Вишнеvский В. М., Ляхов А. И., Портной С. Л., Шахнович И. В. Фрактальные антенны – Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М. : Техносферы, 2005. С. 529–542.
22. Бойков И. В., Айкашев П. В. К вопросу об анализе и синтезе фрактальных антенн // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2017. № 4. С. 92–110. doi: 10.21685/2072-3059-2018-1-8
23. Сарайкин А. А., Макеева Г. С. Модели и характеристики электронноуправляемых плазмонных нанoантенн терагерцового диапазона на основе графена // *Инжиниринг и технологии*. 2021. Т. 6 (2). С. 1–5. doi: 10.21685/2587-7704-2021-6-2-6
24. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., Firsov A. A. Electric field effect in atomically thin carbon films // *Science*. 2004. Vol. 306, № 5696. P. 666–669. doi: 10.1126/science.112896
25. Gao W., Shu J., Qiu C., Xu Q. Excitation of plasmonic waves in graphene by guided-mode resonances // *ACS Nano*. 2012. Vol. 6, № 9. P. 7806–7813. doi: 10.1021/nn301888e

Referenes

1. Kim Y., Dzhaggard D.L. Fractal random lattice. *Trudy instituta inzhenerov po elektrotekhnike i radioelektronike = Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers*. 1986;74(9):124–126. (In Russ.)
2. Cohen N. Fractal Antennas: Part 1. *Communications Quarterly*. 1995:7–22
3. Potapov A.A. Topological textural-fraktal processing of signals and fields in radio physics, radio engineering and radiolocation: developed methods and technologies (1997–

- 2022) – Fraktal engineering. *GrafiKon-2022: sb. tr. po materialam 32-y Mezhdunar. konf. po kompyuternoy grafike i mashinnomu zreniyu = GrafiCon-2022: proceedings of the 32nd International conference of computer graphics and machine vision*. Ryazan', 2022:741–755. (In Russ.). Available at: https://www.graphicon.ru/paper_076.pdf
4. Potapov A.A. *Fraktaly v radiofizike i radiolokatsii: Topologiya vyborki = Fractals in radiophysics and radar: sample topology*. Moscow: Universitetskaya kniga, 2005:844. (In Russ.)
 5. Mishra R.K., Ghatak R., Poddar D.R. Design formula for Sierpinski gasket prefractal planar-monopole antennas. *IEEE Antennas and Propagation*. 2008;50(3):104–107. doi: 10.1109/MAP.2008.4563575
 6. Sederberg S., Elezzabi A.Y. Sierpinski fractal plasmonic antenna: A fractal abstraction of the plasmonic bowtie antenna. *Optic Express*. 2011;19(11):10456–10461. doi: 10.1364/OE.19.010456
 7. Rosa L., Sun K., Juodkazis S. Sierpinski fractal plasmonic nanoantennas. *Physica Status Solidi (RRL)*. 2011;5(5):175–177. doi: 10.1002/pssr.201105136
 8. Llatser I., Kremers C., Cabellos-Aparicio A., Jornet J.M., Alarcon E., Chigrin D.N. Graphene-based nano-patch antenna for terahertz radiation. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. 2012;(10):353–358. doi: 10.1016/j.photonics.2012.05.011
 9. Yousefi L., Foster A.C. Waveguide-fed optical hybrid plasmonic patch nano-antenna. *Optic Express*. 2012;20(16):18326–18335. doi: 10.1364/OE.20.018326
 10. Jornet J., Akyildiz I. Graphene-based plasmonic nano-antenna for terahertz band communication in nano-networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2013;31:685–694. doi: 10.1109/JSAC.2013.SUP2.1213001
 11. Yao Y., Kats M.A., Genevet O., Yu N., Song Y., Kong J., Capasso F. Broad electrical tuning of graphene-loaded plasmonic antennas. *Nano Letters*. 2013;13:1257–1264. doi: 10.1021/nl3047943
 12. Xu Y.-Y., Xu Y., Hu J., Yin W.-Y. Design of a novel reconfigurable Sierpinski fractal graphene antenna operating at THz band. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*. 2013:574–575.
 13. Hussien R.T., Abood D.I. A wideband hybrid plasmonic patch nanoantenna. *International Journal of Electronics and Communication Engineering and Technology (IJCET)*. 2014;5(9):01–08
 14. Zakrajsek L., Einarsson E., Tawdar N., Medley M., Jornet J.M. Lithographically defined plasmonic graphene antennas for terahertz-band communication. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2016;15:1553–1556. doi: 10.1109/LAWP.2016.2527001
 15. Dash S., Patnaik A. Dual band reconfigurable plasmonic antenna using bilayer graphene. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*. 2017:921–922.
 16. Dash S., Patnaik A. Graphene plasmonic bowtie antenna for UWB THz application. *IEEE 24th National Conference on Communications. 2018*. Hyderabad, 2018:1–4.
 17. Dash S., Patnaik A. Kaushik B. Performance enhancement of graphene plasmonic nanoantenna for THz communication. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*. 2018;13(1):71–75. doi: 10.1049/iet-map.2018.5320
 18. Dash S. Performance analysis of graphene plasmonic nanoantenna using different substrate at terahertz band. *ITEE Journal Information Technology and Electrical Engineering*. 2020;9(2):1–5.
 19. Boretti A., Rosa L., Blackledge J., Castelletto S. A preliminary study of a graphene fractal Sierpinski antenna. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;840:012003. doi: 10.1088/1757-899X/840/1/012003
 20. Blackledge J., Boretti A., Rosa L., Castelletto S. Fractal graphene patch antennas and the THz communications revolution. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1060:012001. doi: 10.1088/1757-899X/1060/1/012001

21. Slyusar V.I., Vishnevskiy V.M., Lyakhov A.I., Portnoy S.L., Shakhnovich I.V. *Fraktal'nye anteny – Shirokopolosnye besprovodnye seti peredachi informatsii = Fractal antennas – Broadband wireless information transmission networks*. Moscow: Tekhnosfery, 2005:529–542. (In Russ.)
22. Boykov I.V., Aykashev P.V. On the issue of analysis and synthesis of fractal antennas. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2017;(4):92–110. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2018-1-8
23. Saraykin A.A., Makeeva G.S. Models and characteristics of electronically controlled plasmonic nanoantennas of the terahertz range based on graphene. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and technology*. 2021;6(2):1–5. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2021-6-2-6
24. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*. 2004;306(5696):666–669. doi: 10.1126/science.112896
25. Gao W., Shu J., Qiu C., Xu Q. Excitation of plasmonic waves in graphene by guided-mode resonances. *ACS Nano*. 2012;6(9):7806–7813. doi: 10.1021/nn301888e

Информация об авторах / Information about the authors

Рудольф Александрович Браже

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
физики, Ульяновский государственный
технический университет (Россия,
г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32)

E-mail: brazhe@ulstu.ru

Rudolf A. Brazhe

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, head of the sub-
department of physics, Ulyanovsk State
Technical University (32 Severniy Venets
street, Ulyanovsk, Russia)

Егор Юрьевич Лебедев

студент, Ульяновский государственный
технический университет
(Россия, г. Ульяновск,
ул. Северный Венец, 32)

E-mail: lebedev.egor@ulsk173.ru

Egor Yu. Lebedev

Student, Ulyanovsk State Technical
University (32 Severniy Venets street,
Ulyanovsk, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 10.03.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 03.04.2024

Принята к публикации / Accepted 01.05.2024