

4. Knaizuk, J.J. An algorithm for testing random access memories [Text] / J.J. Knaizuk, C.R.P. Hartman. – IEEE transactions on computers, 1977. – P.414-416.

5. Ярмолик, В. Н. Контроль и диагностика вычислительных систем / В. Н. Ярмолик. – Минск: Бест- принт, 2019. – 387 с.

6. Wang, L.-T. VLSI Test Principles and Architectures: Design for Testability / L.-T. Wang, C.-W. Wu, X. Wen. – Amsterdam: Elsevier, 2006. – 808 p.

Бобров Александр Андреевич, студент гр. 6282-030401D, aleksandr.bobrov.99@mail.ru

УДК 621.396:620.3

## ТЕРАГЕРЦОВАЯ ФРАКТАЛЬНАЯ ГРАФЕНОВАЯ ПАТЧ-НАНОАНТЕННА ТИПА «КОВЕР СЕРПИНСКОГО»

Р.А. Браже, Е.Ю. Лебедев

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск

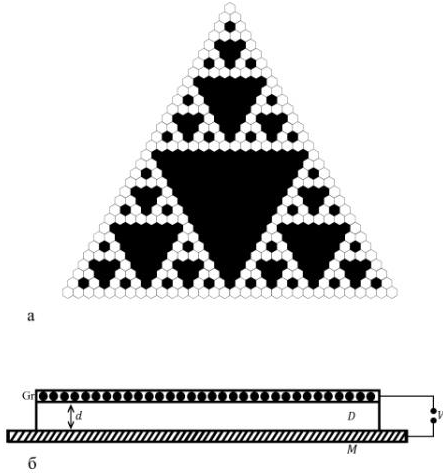
В современных системах беспроводной связи, особенно в терагерцовом диапазоне частот, огромную роль играют компактные широкополосные антенны, выполненные с использованием нанотехнологий. Этим требованиям в значительной мере удовлетворяют фрактальные наноантенны на графене [1–5]. При этом возникают определенные сложности, связанные с необходимостью учета симметрии строения кристаллической решетки графена и распространения в нем не просто электромагнитных волн, а их связанных состояний с волнами зарядовой плотности – поверхностных плазмон-поляритонов.

В настоящей работе предлагается модель графеновой патч-наноантенны в виде фрактальной структуры типа треугольного ковра Серпинского (рис. 1). Графеновая (Gr) структура нанесена на диэлектрическую подложку  $D$  из карбида кремния (SiC) и находится под затворным напряжением  $V_G$ , приложенным между Gr и металлическим электродом  $M$ , на котором смонтирована антенна.

Пренебрегая затуханием поверхностных плазмон-поляритонов (SPP) на масштабах порядка 10 нм, дисперсионное уравнение для них можно записать в виде [6]

$$\frac{\varepsilon_1}{\sqrt{(\hbar c q)^2 - \varepsilon_1 (\hbar \omega)^2}} + \frac{\varepsilon_2}{\sqrt{(\hbar c q)^2 - \varepsilon_2 (\hbar \omega)^2}} = \frac{4\alpha\mu_c}{(\hbar \omega)^2}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – соответственно относительные диэлектрические проницаемости диэлектриков сверху и снизу графена;  $\alpha = e^2 / (4\pi\varepsilon_0\hbar c) \approx 1/137$  – постоянная тонкой структуры;  $\mu_c$  – химический потенциал (энергия Ферми), связанный с двумерной электропроводностью среды следующим выражением:  $\sigma = i4\sigma_0\mu_c / (\pi\hbar\omega)$ ;  $\sigma_0 = e^2 / (4\hbar)$ ;  $\hbar$  – приведенная постоянная Планка;  $c$  – скорость света в вакууме;  $q$  – волновое число SPP,  $\omega$  – циклическая частота колебаний.



(а) – фрактальная геометрия; (б) – схема подключения затворного напряжения  
Рисунок 1 – Исследуемая антенна

Для случая  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_r$  уравнение (1) допускает простое аналитическое решение относительно длины волны SPP:

$$\lambda_{SPP} = \frac{\alpha c \mu_c}{\pi \hbar \varepsilon_r v^2}, \quad (2)$$

где  $v = \omega / (2\pi)$ . Химический потенциал можно выразить через скорость Ферми  $v_F$  (для графена  $v_F \sim 10^6$  м/с) и концентрацию свободных носителей заряда, определяемую затворным напряжением  $V_G$  и толщиной диэлектрической подложки  $d$  [7]:

$$\mu_c = \hbar v_F \sqrt{\pi n}; \quad n = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r V_G}{e d}, \quad (3)$$

где  $e$  – элементарный заряд. Для приведенных выше численных оценок приняты следующие значения:  $\varepsilon_r = 9,66$ ;  $V_G/d \sim 10^7$  В/м. Согласно (3) это дает значение  $\mu_c \approx 0,09$  эВ.

Изображенная на рисунке 1 фрактальная наноантенна представляет собой ковер Серпинского в 4-ой итерации. Ее основной резонанс наблюдается на длине волны SPP, равной периметру исходного большого треугольника (нулевая итерация) с учетом влияния подложки на эффективную длину стороны треугольника [1]:

$$s_e = s + d(\varepsilon_r)^{-1/2}, \quad (4)$$

где  $s = 7,86$  нм – геометрическая длина стороны этого треугольника, насчитывающего 32 гексагона графеновой структуры. Приравнивая величину  $\lambda_{SPP}$ , вычисленную по формуле (2), значению  $3s_e$ , найденному по формуле (4), можно найти частоту основного резонанса:  $\nu_0 = 17,2$  ТГц (при

$d = 10\text{нм}$ ). Резонансные частоты, соответствующие последующим итерациям, будут вычисляться по формуле

$$\nu_n = 2^n \nu_0, n = 1, 2, 3, 4. \quad (5)$$

Найденные по формуле (5) резонансные частоты многополосной фрактальной графеновой патч-антенны дают следующий ряд значений: 17,2 ТГц; 34,4 ТГц; 68,8 ТГц; 137,6 ТГц; 275,2 ТГц. Варьируя затворное напряжение, эти резонансные частоты можно изменять, настраивая антенну.

#### Список использованных источников

1. Mishra R.K., Ghatak R., Poddar D.R. Design Formula for Sierpinski Gasket Pre-Fractal Planar-Monopole Antennas // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2008. – Vol. 50, No. 3. – P. 104–107.
2. Rosa L., Sun K., Juodkakis S. Sierpinski Fractal Plasmonic Nanoantennas // Physica Status Solidi – Rapid Research Letters. 2011. – Vol. 5 (5–6). – P. 175–177.
3. Xu Y.-Y., Xu Y., Hu W.-Y. Design of a Novel Reconfigurable Sierpinski Fractal Graphene Antenna Operating at THZ Band // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). – 2013. – 07-13 July 2013.
4. 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.
5. Blackledge J.M., 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.
6. Bludov Y.V., Ferreira A., Peres N.M., Vasilevskiy. A Primer on Plasmon-Polarions in Graphene // Int. J. Modern Phys. – 2013. – Vol. 27, No. 10. – P. 1341001-74.
7. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V. et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Film // Science. – 2004. – Vol. 306, No. 5694. – P. 666–669.

Браже Рудольф Александрович, д.ф.-м.н., профессор, зав. каф. «Физика», brazhe@ulstu.ru.

Лебедев Егор Юрьевич, студент 3 курса РТФ, mrcrazyspace@gmail.com.

УДК 535

## **ФОТОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

П.В. Мокшин

«Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва», г. Самара

**Ключевые слова:** фотонно-кристаллический элемент, волновод, вычислительные устройства.