

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-109-120>



УДК 004.94

Моделирование наноантенн для их дальнейшего применения в качестве устройств приема-передачи данных на 3D-интегральных схемах

**Д.А. Серов[@],
Х.В. Першина,
И.В. Бурдина**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: d.serov589@gmail.com

В статье описано применение оптических наноконструкций для использования в компьютерных и информационных системах. На основе анализа выявлено, что усовершенствование существующих наноконструкций позволит реализовать их полный потенциал. Это касается и наноантенн, которые могут найти применение в области создания линий связи на платах устройств в качестве приборов приема-передачи данных. Наноантенны являются перспективными устройствами, которые успешно применяются в современных устройствах микроскопии. Однако с недавних пор оптические антенны начали внедрять в приборы, используемые и в других сферах жизни человека. В результате применение данной технологии может привести к увеличению скорости и объема передачи данных между компонентами интегральной схемы, что, в свою очередь, повысит качество и скорость проведения расчетов при сложных вычислениях. Предложена технология моделирования, а также проведены расчеты необходимых геометрических параметров, которые будут подходить под заданные данной работой цели. На основе предложенной технологии разработаны четыре модели наноантенн, отвечающие необходимым требованиям. Две из них реализованы на основе ранее предложенных аналогов антенн – «галстук-бабочка» и С-антенна, две другие являются оригинальными разработками. Проведены расчеты созданных трехмерных моделей наноантенн. Рассмотрена модификация одной из оптических антенн для изучения влияния из-

менения общих геометрических размеров на ее передаточные характеристики. В результате исследования выявлена модель, имеющая наиболее сбалансированные параметры, подходящие для ее дальнейшего применения в качестве основного устройства приема-передачи данных в трехмерных интегральных схемах.

Ключевые слова: оптические наноконпоненты, наноантенны, приборы приема-передачи данных, передача сигнала, разработка моделей, диаграмма направленности антенны.

Для цитирования: Серов Д.А., Першина Х.В., Бурдина И.В. Моделирование наноантенн для их дальнейшего применения в качестве устройств приема-передачи данных на 3D-интегральных схемах. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):109-120. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-109-120>

Nanoantenna modelling for their further use as data transmitter-receiver devices on 3-d integral circuits

Dmitry A. Serov[@],
Khristina V. Pershina,
Irina V. Burdina

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
^{@Corresponding author, e-mail: d.serov589@gmail.com}

This article describes the application of optical nanocomponents for their further use in computer and information systems. It was found on the basis of the analysis that the improvement of existing nanocomponents will allow to realize their full potential, as well as to find the use of nanoantennas in the field of creating communication lines on device boards as devices for receiving and transmitting data. Nanoantennas are promising devices that are already successfully used in modern microscopy devices. However, recently, optical antennas have begun to be applied in devices used in other areas of human life. As a result, the use of this technology can lead to an increase in the speed and volume of data transfer between the components of the integrated circuit. This, in turn, will increase the quality and speed of calculations in complex equations. A modeling technology has been proposed, and calculations of the necessary geometric parameters have been made, which will be suitable for the goals set by this work. On the basis of the proposed technology, four models that meet the required parameters have been developed. Calculations of the created three-dimensional models of nanoantennas have been performed. As a result of the study, a model has been identified that has the most balanced parameters suitable for its further use as the main device for receiving and transmitting data on three-dimensional integrated circuits.

Keywords: optical nanocomponents, nanoantennas, devices for receiving and transmitting data, signal transmission, model development, antenna directivity pattern.

For citation: Serov D.A., Pershina K.V., Burdina I.V. Nanoantenna modelling for their further use as data transmitter-receiver devices on 3-d integral circuits. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(6):109-120 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-109-120>

Введение

Одной из современных и главных задач нанوفотоники является применение оптических наноконструкций в интегральных схемах и компьютерных и информационных системах. Однако до сих пор отсутствуют источники света, подходящие под размеры чипа, и оптические усилители с большим диапазоном длин волн и высокой энергетической эффективностью, а также комплекты, позволяющие осуществлять высокоскоростную модуляцию света [1]. Основным устройством, способным помочь создать подобные структуры, являются наномантенны.

Наномантенны являются перспективным устройством для дальнейшего развития современных технологий. Они применяются в различных сферах жизни человека [2–5], особенно в медицине [6], например, в качестве сенсоров молекул вируса [7]. Однако, несмотря на все это, до сих пор не реализован полный потенциал данных наномантенн. Дальнейшим путем их развития может стать создание линий связи на платах вычислительных устройств с наномантеннами в качестве приборов приема-передачи данных. Это станет существенным улучшением уже применяемых классических технологий [8].

Чтобы получить полностью рабочее устройство и готовую структуру, которую возможно применять в различных приборах, требуется создать целый массив оптических антенн с заданными параметрами. Такие массивы можно применять для передачи данных в интегральных схемах, что приведет к улучшению их базовых характеристик, таких как скорость и объем передачи данных. Однако до сих пор нет разработанной топологии, которую можно было бы использовать для передачи сигнала. В связи с этим разработка подобных массивов является актуальной задачей, требующей детального рассмотрения [9–11].

Моделирование наномантенн

Для наиболее эффективной передачи сигнала в массиве наномантенн нужно выбрать их дизайн – подходящую геометрию структуры. Он зависит от основных характеристик, влияющих на качество приема и передачи данных. К их числу относятся направленность, эффективность и коэффициент пропускания.

Хорошая направленность излучения требуется для более точной передачи сигнала в массиве. В связи с этим качественная диаграмма направленности играет большую роль при моделировании и создании наномантенн. Степень концентрации излучения в некотором направлении диаграммы характеризуется коэффициентом направленности. Стандартное определение вычисляется по формуле:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4\pi p(\theta, \varphi)}{P_{rad}},$$

где P_{rad} – полная мощность, излучаемая системой в дальнюю зону, $p(\theta, \varphi)$ – угловое распределение излучаемой мощности.

Большая эффективность требуется для нивелирования диссипативных потерь в материале элементов антенны. Эта величина определяется отношением мощности, излученной системой в дальнюю зону, к полной подведенной мощности:

$$\varepsilon_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{loss}}.$$

Важным параметром также является S-параметр антенны. Он показывает общую степень рассеяния излучения в структуре антенны. Его минимальное значение на определенной частоте показывает, что на ней возникает резонанс, и, следовательно, происходит максимальное усиление сигнала.

Для расчета полного поля используется волновое уравнение:

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu_r(x, y)} \nabla \cdot \bar{E}_{(x, y, z)} \right) - k_0^2 \epsilon_r(x, y) \cdot \bar{E}_{(x, y, z)} = 0.$$

При моделировании определяется электромагнитное поле на поверхностях излучения с помощью **3D-Solver**, а затем вычисляется электрическое поле в дальней зоне, используя следующее уравнение:

$$E(x, y, z) = \oint ((i\omega\mu_0 H_{tan})G + (E_{tan} \nabla G) + (E_{norm} \nabla G))dK,$$

где K – поверхность излучения; G – функция Грина свободного пространства, равная:

$$G = \frac{e^{-Z_0|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|},$$

где \vec{r} и \vec{r}' – радиус-векторы, определяющие точку «наблюдения» (r) и точку на поверхности излучения (r'), соответственно.

Обобщенная S-матрица связывает амплитуды волн, падающих на входы многополюсника, которым в данном случае является структура наноантенны, с амплитудами отраженных волн. Под падающими волнами понимаются волны, бегущие к многополюснику, а под отраженными – бегущие от него. Например, одномодовая S-матрица для трехпортовой структуры имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix},$$

где S_{ij} – комплексные элементы матрицы рассеяния, a_i – амплитуда волны, падающей на вход с номером i , а b_i – амплитуда волны, отраженной от входа с номером i .

Определение S-матрицы, приведенное выше, не использует понятий характеристического сопротивления линии передачи или сопротивления порта, которое обычно совпадает с вышеуказанным сопротивлением линии, формирующей порт (вообще говоря, последнее условие необязательно, так как часто под портом понимают некоторую нагрузку, которая может иметь комплексное сопротивление, например, входное сопротивление усилителя). В то же время эти понятия оказываются полезными при моделировании элементов с сосредоточенными параметрами (диоды, транзисторы и т. д.), описание которых идет в терминах эквивалентных схем, токов и напряжений [12].

Расчетная часть

Расчет созданных трехмерных моделей наноантенн проводился с помощью программы, в основе которой лежит метод конечных разностей. Частота падающего излучения

варьировалась от 520 до 550 ТГц. Был выбран именно этот диапазон, соответствующий зеленому цвету видимого спектра, так как источник излучения сигнала на данных частотах требует гораздо меньше мощности для его генерации. Измерения проводились с шагом 0.1 ТГц. В качестве материала антенн рассматривалось золото (Au). Толщина кремниевых подложек составляла 500 нм. Были получены данные по 4 моделям антенн, трехмерные изображения которых приведены на рис. 1.

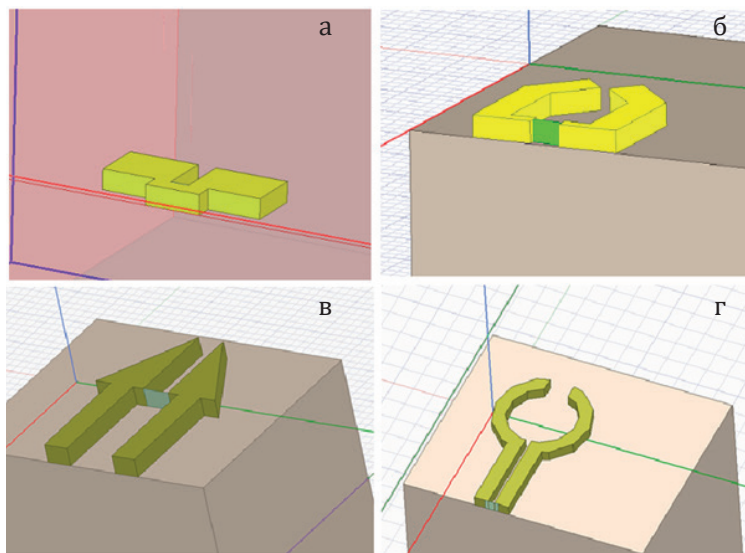


Рис. 1. Трехмерные модели nanoантенн, использующиеся при расчетах:
а – комплексная nanoантенна; б – модифицированная антенна типа «галстук-бабочка»;
в – антенна-стрелка; г – С-антенна.

Рассмотрим модель, представленную на рис. 1а. Она обладает следующими параметрами (рис. 2):

- Длина блоков – 39 нм;
- Ширина блоков – 30 нм;
- Высота блоков – 11 нм;
- Длина соединительной секции – 28 нм;
- Ширина соединительной секции – 10 нм;
- Высота соединительной секции – 11 нм.

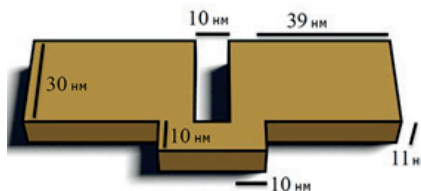


Рис. 2. Геометрические параметры nanoантенны 1а.

В итоге проведенного моделирования были получены результаты, представленные на рис. 3.

Можно видеть, что значение параметра S_{11} (параметр рассеивания излучения) достигает своего минимума при частоте излучения 524 ТГц и оно равно -1.20. Это означает, что при данной частоте возникает резонанс и происходит максимальное усиление сигнала. Коэффициент усиления принимает значение 5.8. По сравнению со стандартными антеннами, а также с патч-антеннами, где требуется усиление сигнала в десятки раз, получен-

ное значение данной модели весьма мало, однако поскольку передача сигнала требуется на расстояния, измеряемые в микрометрах, оно вполне приемлемо. При этом на диаграмме, показанной на рис. 3а, явно видна направленность излучения сигнала в определенном направлении, что говорит о хорошей геометрии выбранной модели антенны.

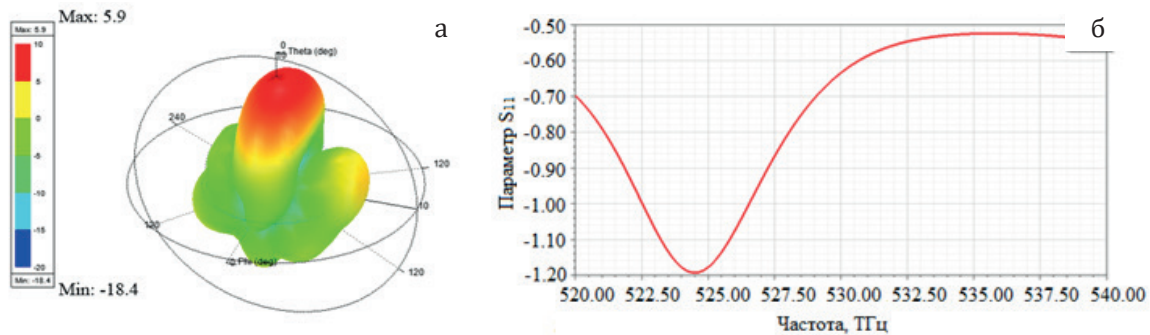


Рис. 3. Результаты моделирования антенны 1а:
а – диаграмма направленности и коэффициент усиления сигнала;
б – кривая зависимости параметра S_{11} от частоты излучения.

Далее был проведен расчет антенны, представленной на рис. 1б (модификация антенны «галстук-бабочка»). Она обладает следующими геометрическими параметрами (рис. 4):

- Ширина блоков – 35 нм;
- Высота блоков – 25 нм;
- Длина основных блоков – 100 нм;
- Ширина нижней секции – 15 нм;
- Длина нижней секции – 30 нм;
- Расстояние между нижними секциями – 30 нм;
- Расстояние между верхними секциями – 10 нм.

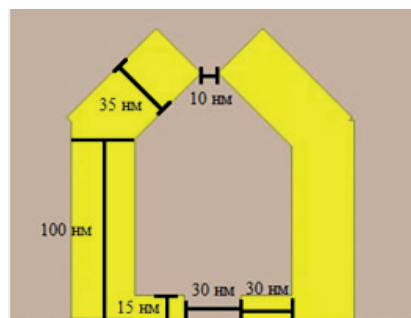


Рис. 4. Геометрические параметры антенны типа «галстук-бабочка».

Стандартная модель антенны была модифицирована посредством дополнительно проложенных направляющих областей, проходя через которые, сигнал должен получить хорошую направленность. Полученные в результате моделирования данные представлены на рис. 5.

Сравнивая полученные результаты для антенн 1а и 1б, можно увидеть существенные различия. Коэффициент усиления второй модели выше, чем у антенны 1а, и составляет 6.7. Однако диаграмма направленности показывает отсутствие конкретных направлений распространения излучения. Также различаются и резонансные частоты, что можно заметить по расположению точки минимума параметра S_{11} . Для второй антенны она соответствует значению 542.7 ТГц.

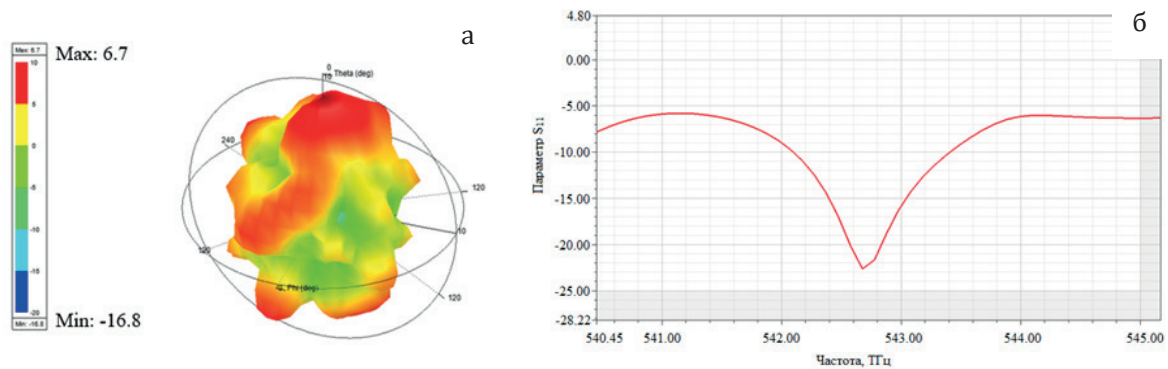


Рис. 5. Результаты моделирования антенны 1б:
а – диаграмма направленности и коэффициент усиления сигнала;
б – кривая зависимости параметра S_{11} от частоты.

Далее была исследована антенна 1в. Она имеет следующие параметры:

- Длина направляющего блока – 80 нм;
- Ширина направляющего блока – 35 нм;
- Высота направляющего блока – 25 нм;
- Длина горизонтального катета верхнего треугольника – 60 нм;
- Длина вертикального катета верхнего треугольника – 80 нм;
- Расстояние между треугольниками – 20 нм;
- Расстояние между направляющими блоками – 60 нм.

Результаты моделирования представлены на рис. 6.

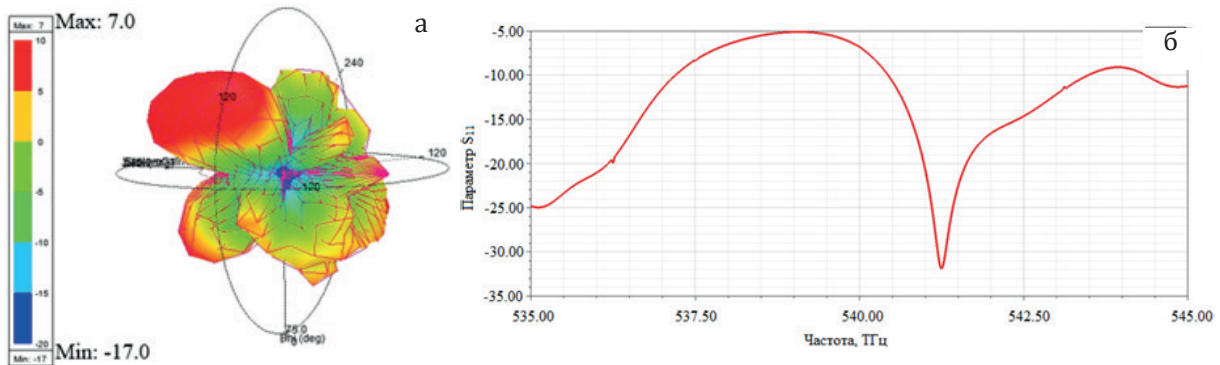


Рис. 6. Результаты моделирования антенны 1в:
а – диаграмма направленности и коэффициент усиления сигнала;
б – кривая зависимости параметра S_{11} от частоты.

Можно отметить положительную динамику в формировании диаграммы направленности по сравнению с данными, полученными для антенны 1б. Имеется явно выраженное направление распространения излучения. При этом коэффициент усиления наноантенны с текущими геометрическими параметрами выше коэффициента усиления антенны 1а и равен 7.0.

Произошло также смещение пика параметра S_{11} . Коэффициент усиления сигнала принимает свое максимальное значение при частоте падающего излучения 541.3 ГГц.

Далее было проведено исследование антенны 1г. Она является модификацией антенны, ранее рассмотренной учеными из UPV (Политехнический университет Валенсии) [12].

В процессе изучения влияния формы выходной грани щелевого волновода на направленность антенны ученые отказались от традиционной V-образной конструкции излучателя. Эвристическим путем удалось определить, что С-образная форма излучателей антенны (длина каждого – 0.5 мкм) является оптимальной, при этом лучшее значение направленности достигается когда величина угла изгиба каждого излучателя равна 20° (рис. 7).

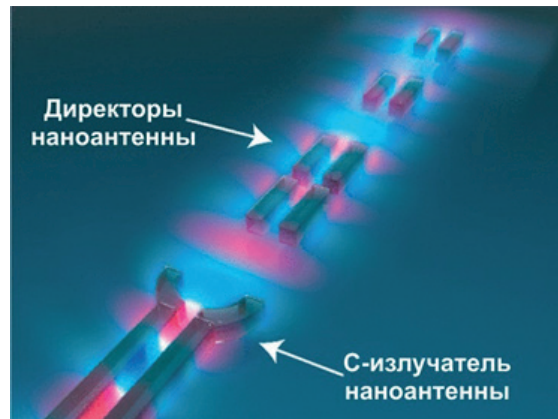


Рис. 7. Схематическое изображение плазмонно-кремниевой наноантенны [13].

Кроме того, авторы работы изучили влияние кремниевых щелевых плоских элементов, размещаемых перед С-антенной, которые имитировали стандартные директоры, известные из классической теории антенн. Классическая антенна такого типа, например, телевизионная, состоит из активного вибратора, отражающего рефлектора и направляющего директора (или нескольких). Все вместе они создают узконаправленную диаграмму и повышают коэффициент усиления антенны [12].

В отличие от модели антенны ученых из UPV, модификация, представленная на рис. 1г, обладает следующими параметрами:

- Длина направляющих блоков – 250 нм;
- Ширина направляющих блоков – 35 нм;
- Высота антенны – 25 нм;
- Расстояние между блоками – 25 нм;
- Радиус цилиндрической области – 150 нм;
- Толщина стенок цилиндра – 35 нм;
- Ширина разрыва в цилиндре – 40 нм.

После проведения расчетов были получены результаты, представленные на рис. 8.

Представленные данные показывают, что данная модификация наноантенны не позволила достигнуть желаемого результата в виде узкой диаграммы направленности. Как можно заметить, явно выраженного направления распространения излучения нет. Коэффициент усиления имеет немного большую величину, чем у модели антенны 1а, однако увеличение его значения на две десятых не является значительным.

После внесения изменений в геометрические параметры антенны 1г (рис. 9) были проведены дополнительные расчеты. Длины направляющих блоков были уменьшены до 100 нм, радиус цилиндрической области уменьшен до 70 нм, расстояние между направляющими блоками составило 15 нм, цилиндр имеет более открытое пространство.

В результате были получены результаты, выгодно отличающиеся от предыдущих (рис. 10).

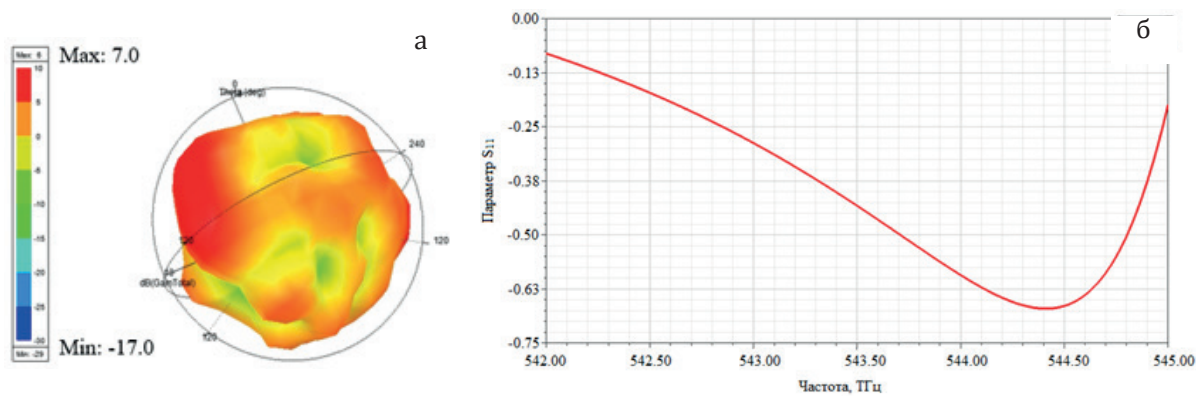


Рис. 8. Результаты моделирования антенны 1г:
а – диаграмма направленности и коэффициент усиления сигнала;
б – кривая зависимости параметра S_{11} от частоты.

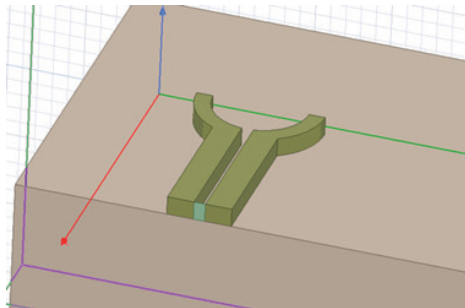


Рис. 9. Модифицированная С-антенна.

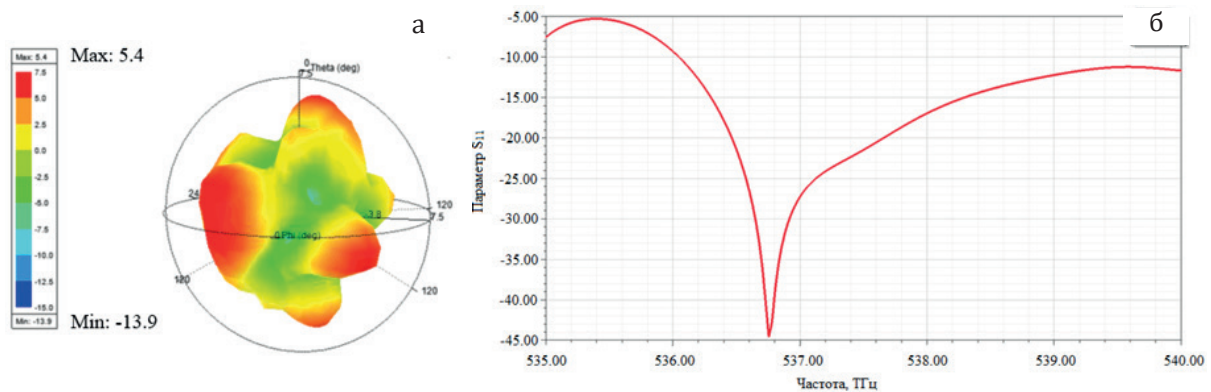


Рис. 10. Результаты моделирования антенны, представленной на рис. 9:
а – диаграмма направленности и коэффициент усиления сигнала;
б – кривая зависимости параметра S_{11} от частоты.

Видно, что произошли изменения в форме диаграммы направленности. Теперь, в отличие от предыдущей модели, она имеет заданный вектор распространения сигнала, но в результате пострадал коэффициент усиления сигнала. При повторном расчете его величина составила 5.4, в то время как предыдущая версия антенны имеет коэффициент равный 6. Также изменилась и резонансная частота антенны. Ранее максимальное усиление сигнала наблюдалось на частоте 541.5 ТГц. После изменения геометрии наномантенны пик сместился до значения 536.7 ТГц. В результате уменьшения общего размера структуры также уменьшилась и ее резонансная частота.

Заключение

В работе были рассмотрены и рассчитаны 4 модели наноантенн, изготовленных из золота. Все они имеют разные геометрические параметры, влияющие на их передаточные характеристики. Полученные данные представлены в таблице.

Характеристики исследованных наноантенн

Тип антенны	Антенна 1а	Антенна 1б	Антенна 1в	Антенна 1г
Резонансная частота, ТГц	524.0	542.7	541.3	536.7
Коэффициент усиления	5.8	6.7	7.0	5.4
Сформированная направленность излучения	да	нет	да	нет

Установлено, что наилучшими результатами обладает антенна, показанная на рис. 1в. Она имеет наиболее сбалансированные параметры, подходящие для ее дальнейшего применения в качестве основного устройства приема-передачи данных в трехмерных интегральных схемах. Однако возможно и применение другой модификации (1а), которая практически ничем не уступает модификации 1в и является неплохой альтернативной заменой. При общем уменьшении геометрических размеров структуры наноантенны происходит сдвиг пика резонансной частоты в сторону ее уменьшения.

В дальнейшем планируется проведение дополнительного моделирования наноантенн с другими параметрами, разработка топологии системы приема-передачи данных в интегральной схеме с использованием выбранной модели и, наконец, создание полноценно работающего массива наноантенн, способного на высоких скоростях передавать обширный пакет данных.

Работа выполнялась в рамках проведения конкурса «Инновации в реализации приоритетных направлений развития науки и технологий».

Литература:

1. Petronijevic E., Centini M., Cesca T., Mattei G., Bovino F.A., Sibilia C. Control of Au nano-antenna emission enhancement of magnetic dipolar emitters by means of VO₂ phase change layers. *Opt. Express*. 2019;27(17):2460-24273. <https://doi.org/10.1364/OE.27.024260>
2. Chen P.Y., Argyropoulos C., D'Aguzzo G., Alù A. Enhanced second-harmonic generation by metasurface nanomixer and nanocavity. *ACS Photonics*. 2015;2(8):1000-1006. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.5b00205>
3. Sikdar D., Rukhlenko I.D., Cheng W., Premaratne M. Optimized gold nanoshell ensembles for biomedical applications. *Nanoscale Res. Lett.* 2013;8(1):142. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-142>
4. Ni X.J., Emani N.K., Kildishev A.V., Boltasseva A., Shalaev V.M. Broadband light bending with plasmonic nanoantennas. *Science*. 2012;335(6067):427. <https://doi.org/10.1126/science.1214686>
5. Curto A.G., Volpe G., Taminiau T.H., Kreuzer M.P., Quidant R., Van Hulst N.F. Unidirectional emission of a quantum dot coupled to a nanoantenna. *Science*. 2010;329(5994):930-933. <https://doi.org/10.1126/science.1191922>
6. Sugumaran S., Jamlos M.F., Ahmad M.N., Bellan C.S., Sivaraj M., Krishnan P. Nanoantenna Based Wireless Communication for Cancer Tumour Detection- An Overview. In: Proc. IEEE 3rd International conference on electronics and communication systems (ICECS 2016). P. 1111-1114.
7. Zang F., Su Z., Zhou L., Konduru K., Kaplan G., Chou S.Y. Ultra-sensitive Ebola virus antigen sensing via 3D nanoantenna arrays. *Advanced Materials*. 2019;31(30):1902331. <https://doi.org/10.1002/adma.201902331>
8. Писаренко А.В., Витряк Е.А., Павлючин Т.А. Организация скоростной передачи данных в современных программируемых логических интегральных схемах. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2013;1(60):54-57.

9. Bazgir M., Zarrabi F.B. A switchable split ring resonator nanoantenna design with organic material composite as a refractive index sensor. *Opt. Commun.* 2020;475:126211.
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126211>
10. Campbell S.D., Whiting E.B., Werner P.L., Werner D.H., Zhu D.Z. Three-dimensional Nanoantenna Inverse-design. In: *Proceedings 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*. 2019.
<https://doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8889257>
11. Shirzadian M., Rashed-Mohassel J., Naser-Moghaddasi M., Khatir M. Design of a wideband microstrip nanoantenna array. *Opt. Quant. Electron.* 2019;51(5):132.
<https://doi.org/10.1007/s11082-019-1852-6>
12. <https://mcs.mail.ru/blog/nanoantenny-dlya-sverhbystryh>
13. Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д. Анализ и оптимизация СВЧ-структур с помощью HFSS. Серия «Системы проектирования». М.: Солон-Пресс; 2012. С. 29-31.

References:

1. Petronijevic E., Centini M., Cesca T., Mattei G., Bovino F.A., Sibilia C. Control of Au nano-antenna emission enhancement of magnetic dipolar emitters by means of VO₂ phase change layers. *Opt. Express*. 2019;27(17):2460-24273.
<https://doi.org/10.1364/OE.27.024260>
2. Chen P.Y., Argyropoulos C., D'Aguanno G., Alù A. Enhanced second-harmonic generation by metasurface nanomixer and nanocavity. *ACS Photonics*. 2015;2(8):1000-1006.
<https://doi.org/10.1021/acsphotonics.5b00205>
3. Sikdar D., Rukhlenko I.D., Cheng W., Premaratne M. Optimized gold nanoshell ensembles for biomedical applications. *Nanoscale Res. Lett.* 2013;8(1):142.
<https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-142>
4. Ni X.J., Emani N.K., Kildishev A.V., Boltasseva A., Shalaev V.M. Broadband light bending with plasmonic nanoantennas. *Science*. 2012;335(6067):427.
<https://doi.org/10.1126/science.1214686>
5. Curto A.G., Volpe G., Taminiau T.H., Kreuzer M.P., Quidant R., Van Hulst N.F. Unidirectional emission of a quantum dot coupled to a nanoantenna. *Science*. 2010;329(5994):930-933.
<https://doi.org/10.1126/science.1191922>
6. Sugumaran S., Jamlos M.F., Ahmad M.N., Bellan C.S., Sivaraj M., Krishnan P. Nanoantenna Based Wireless Communication for Cancer Tumour Detection- An Overview. In: *Proc. IEEE 3rd International conference on electronics and communication systems (ICECS 2016)*. P. 1111-1114.
7. Zang F., Su Z., Zhou L., Konduru K., Kaplan G., Chou S.Y. Ultra-sensitive Ebola virus antigen sensing via 3D nanoantenna arrays. *Advanced Materials*. 2019;31(30):1902331.
<https://doi.org/10.1002/adma.201902331>
8. Pisarenko A.V., Vitriak E.A., Pavliuchyn T.O. Organization of high-speed data transfer in modern field-programmable gate arrays. *Radio electronic and computer systems*. 2013;1(60):54-57 (in Russ.).
9. Bazgir M., Zarrabi F.B. A switchable split ring resonator nanoantenna design with organic material composite as a refractive index sensor. *Opt. Commun.* 2020;475:126211.
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126211>
10. Campbell S.D., Whiting E.B., Werner P.L., Werner D.H., Zhu D.Z. Three-dimensional Nanoantenna Inverse-design. In: *Proceedings 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*. 2019.
<https://doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8889257>
11. Shirzadian M., Rashed-Mohassel J., Naser-Moghaddasi M., Khatir M. Design of a wideband microstrip nanoantenna array. *Opt. Quant. Electron.* 2019;51(5):132.
<https://doi.org/10.1007/s11082-019-1852-6>
12. <https://mcs.mail.ru/blog/nanoantenny-dlya-sverhbystryh>
13. Bankov S.E., Kurushin A.A., Razevig V.D. *Analiz i optimizatsiya SVCh-struktur s pomoshch'yu HFSS. Seriya «Sistemy proektirovaniya»* (Analysis and optimization of microwave structures using HFSS. Series «Design systems»). Moscow: Solon-Press; 2012. P. 29-31 (in Russ.).

Об авторах:

Серов Дмитрий Алексеевич, инженер Инжинирингового центра мобильных решений ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).
<http://orcid.org/0000-0002-9248-0130>

Першина Христина Валерьевна, лаборант Инжинирингового центра мобильных решений ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).
<http://orcid.org/0000-0003-2688-0897>

Бурдина Ирина Владимировна, лаборант Инжинирингового центра мобильных решений ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). <http://orcid.org/0000-0002-8668-0929>

About the authors:

Dmitry A. Serov, Engineer, Engineering Center for Mobile Solutions, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <http://orcid.org/0000-0002-9248-0130>

Khristina V. Pershina, Laboratory Assistant, Engineering Center for Mobile Solutions, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <http://orcid.org/0000-0003-2688-0897>

Irina V. Burdina, Laboratory Assistant, Engineering Center for Mobile Solutions, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <http://orcid.org/0000-0002-8668-0929>

Поступила: 01.08.2020; получена после доработки: 13.10.2020; принята к опубликованию: 30.10.2020.