

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ НАНОАНТЕНН, РАСПОЛОЖЕННЫХ В КАНАЛЕ TSV, В КАЧЕСТВЕ СИСТЕМЫ ПРИЕМА-ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

© 2023 г. Д. А. Серов<sup>1, 2, \*</sup>, И. А. Хорин<sup>1, \*\*</sup>

<sup>1</sup>Физико-технологический институт им. К.А. Валиева РАН, Нахимовский просп., 36, корп. 1, Москва, 117218 Россия

<sup>2</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, просп. Вернадского, 78, стр. 4, Москва, 119454 Россия

\*E-mail: d.serov589@gmail.com

\*\*E-mail: khorin@ftian.ru

Поступила в редакцию 17.01.2023 г.

После доработки 11.02.2023 г.

Принята к публикации 15.02.2023 г.

Представлены результаты теоретического исследования поведения системы устройств нанопотоники, состоящей из приемной и передающей плазмонных металлических антенн. На основе метода конечных элементов рассчитаны основные параметры антенн, располагающихся в канале TSV и принимающих сигнал в терагерцовом диапазоне частот. Определены предельная дальность передачи сигнала, а также коэффициент его усиления. Сделаны выводы о пригодности представленной конфигурации в качестве системы беспроводного приема-передачи данных в трехмерных интегральных схемах.

*Ключевые слова:* нанопотоника, оптика, наноантенна, TSV, моделирование

**DOI:** 10.31857/S0544126923700333, **EDN:** UEFFUV

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В связи с постоянно растущим количеством транзисторов, располагающихся на единице площади, и появлением дополнительных задач, требующих все больше вычислительных мощностей, специалисты прогнозируют интеграцию десятков и даже сотен вычислительных ядер в процессоры в течение следующего десятка лет. Системы с таким большим количеством ядер представляют значительные проблемы при проектировании сетевой архитектуры, поскольку их производительность все больше ограничивается обменом информацией между вычислительными блоками, а не самими вычислениями [1]. Требования по коммуникации многоядерных процессоров не могут быть удовлетворены стандартными электронными межсоединениями, поскольку обладают недостатками в виде высокого рассеивания мощности и ограниченной полосы пропускания. Поэтому ведутся активные работы по разработке систем коммуникации на новых принципах, в том числе с помощью фотонных нанопотонных устройств, исполняющих функцию оптических межсоединений, способных обеспечить более высокую пропускную способность и более низкое энергопотребление [2–4]. Базовым элементом таких систем является плазмонная антенна.

Падающий свет или ИК-волна индуцируют локализованный поверхностный плазмон в нанопотонной антенне на определенной длине волны, а колеблющиеся заряды, сконцентрированные на выводах антенны, приводят к усилению поля. Благодаря

малому отклику нанопотонной антенны в оптическом диапазоне частот, ранее они изучались в целях улучшения характеристик оптических детекторов и устройств сбора ИК-энергии [5, 6]. Теперь, в связи с причинами, перечисленными выше, нанопотонные рассматривают в качестве устройств приема и передачи данных в терагерцовом диапазоне частот.

Стоит отметить, что на данном этапе рассматривается создание системы связи на чипе, но только лишь на поверхности кристалла. Пока что не были рассмотрены возможности реализации беспроводной системы связи в трехмерной интегральной схеме между различными слоями. В связи с этим выдвигается предложение об интеграции оптических антенн с соединениями типа Through Silicon Via (TSV). TSV соединения обычно заполняются медью для осуществления процесса передачи сигнала между слоями 3D ИС. Однако у данного метода имеются недостатки. В процессе эксплуатации медь окисляется [7] и нагревается, что приводит к существенному ухудшению передаточных характеристик. Предлагается заменить медные столбики на оптические нанопотонные, таким образом устранятся ключевые недостатки данной технологии.

Основной проблемой нанопотонной является дальность передачи данных. Ширина сквозных каналов TSV соединений варьируется в диапазоне от 0.5 до 5 мкм, а их высота – от 1 до 50 мкм [7]. Следовательно, от оптических антенн следует добиться дальности передачи сигнала не менее не-

скольких микрометров для их потенциального применения в качестве устройств приема-передачи данных в дальнем поле.

## 2. ОПИСАНИЕ АНТЕНН В ДАЛЬНОМ ПОЛЕ

Характеристика антенны дальнего действия может быть получена путем рассмотрения потока мощности в условиях ограничения потребления энергии. Однако расстояние от антенны до ее дальнего поля зависит от геометрических размеров антенны, и обычно считается, что область дальнего поля начинается после расстояния

$$R = r = \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $D$  – размер наибольшего включения антенны. Это связано с различными расстояниями распространения вкладов поля от разных частей антенны до точки наблюдения. В дальнем поле каждая антенна считается точечным источником, и критерий дальнего поля в уравнении (1) получен исходя из предположения, что фазовые ошибки из-за из-

менения расстояний распространения сигнала меньше  $\pi/8$ . Представим, что антенна находится в центре сферы. Также предположим, что антенна передает сигнал. Она имеет следующие параметры:

- $P_t$  – мощность, принятая антенной, Вт;
- $P_{\text{rad}}$  – мощность, излучаемая антенной, Вт;
- $\eta$  – эффективность излучения.

Представленные параметры связаны уравнением (2):

$$\eta = \frac{P_{\text{rad}}}{P_t}. \quad (2)$$

Антенны также обладают параметром  $S_t(\theta, \varphi)$  – плотность мощности, который не зависит от расстояния от начала дальнего поля до антенны  $r$ . Полная мощность излучения может быть получена путем вычисления интеграла плотности мощности в пределах поверхности, содержащей антенну. Такая область может принимать любую форму. Для простоты данную область представляют в виде сферы.

$$P_{\text{rad}} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi S_t(\theta, \varphi) r^2 \sin\theta d\theta d\varphi \quad (3)$$

Средняя плотность мощности принимает значение:

$$P_{\text{avg}} = \frac{P_{\text{rad}}}{4\pi r^2}. \quad (4)$$

Представим следующий параметр  $D_t$  – направленность, то есть способность антенны концентрировать излучаемую мощность в определенном направлении. Она связана с плотностью мощности следующим образом:

$$D_t(\theta, \varphi) = \frac{S_t(\theta, \varphi)}{P_{\text{avg}}} = \frac{S_t(\theta, \varphi)}{P_{\text{rad}}/4\pi r^2}. \quad (5)$$

Направленность антенны – это отношение достигнутой плотности мощности в определенном направлении к плотности мощности изотропной антенны.

$G_t$  – коэффициент усиления антенны. Данный показатель связан с направленностью и излучаемой плотностью мощности уравнением (6):

$$G_t(\theta, \varphi) = \eta D_t(\theta, \varphi) = \frac{\eta S_t(\theta, \varphi)}{P_{\text{rad}}/4\pi r^2}. \quad (6)$$

Из которого следует, что

$$G_t(\theta, \varphi) = \frac{S_t(\theta, \varphi)}{P_t/4\pi r^2}. \quad (7)$$

В случае, если моделируется антенна без потерь, направленность и коэффициент усиления будут равны.

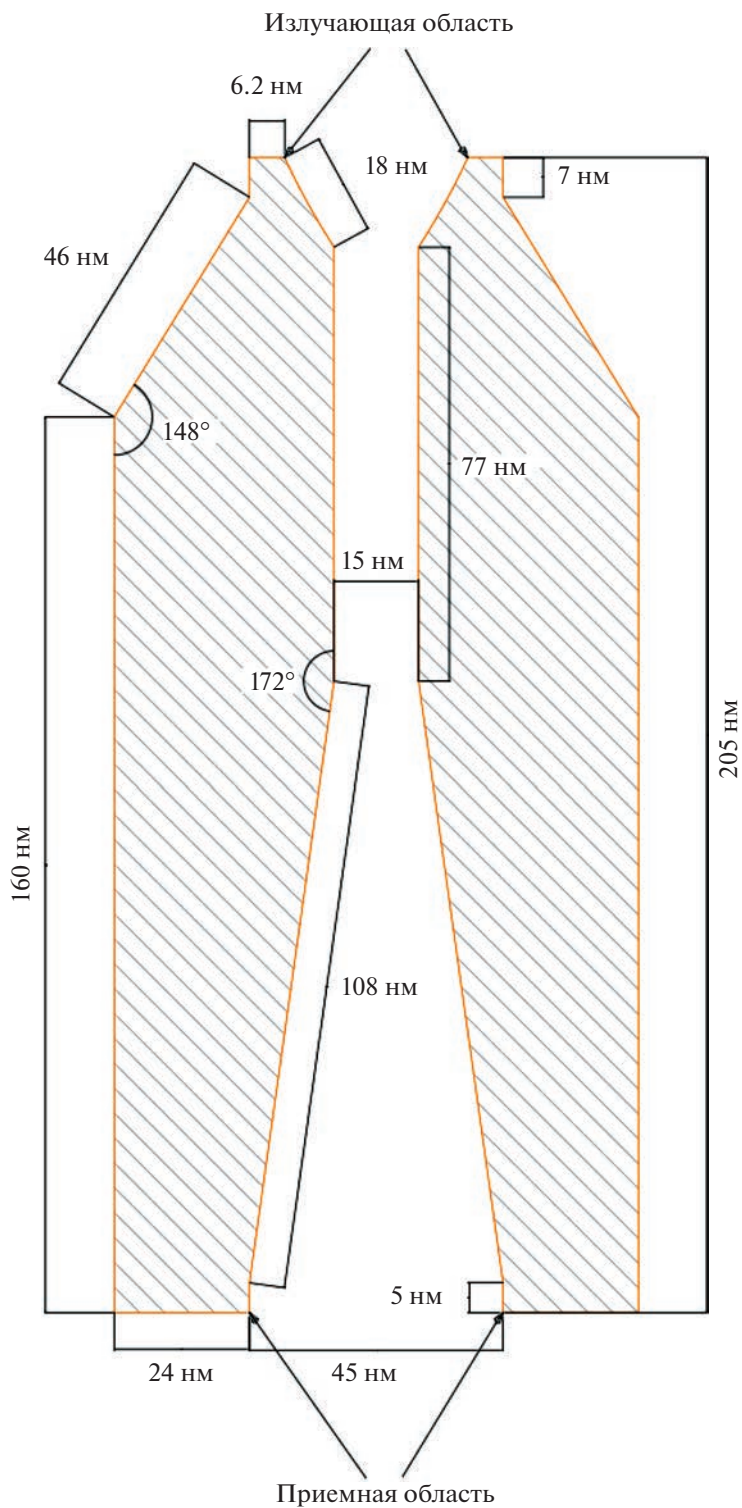
Рассмотрим приемную антенну, подверженную воздействию плотности мощности, излучаемой некоторой передающей антенной. Способность антенны к получению энергии вычисляется с помощью  $A_{e,r}$  – эффективной площади ( $\text{м}^2$ ), где предполагается расположение антенны в начале системы координат.

Эффективная площадь антенны связана с коэффициентом усиления формулой (8):

$$A_{e,r}(\theta, \varphi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r(\theta, \varphi), \quad (8)$$

где  $\lambda$  – длина волны. Заметим, что формула (7) зависит от длины волны и, следовательно, от частоты. Исходя из этого, определение характеристик антенны может быть выполнено либо как для передающего, либо как для принимающего устройства, при этом поведение для другого случая сразу известно.

Стоит отметить, что через эффективную площадь антенны возможно рассчитать мощность самой антенны по формуле (9):



**Рис. 1.** Двумерный чертеж модели наноантенны с заданными геометрическими размерами.

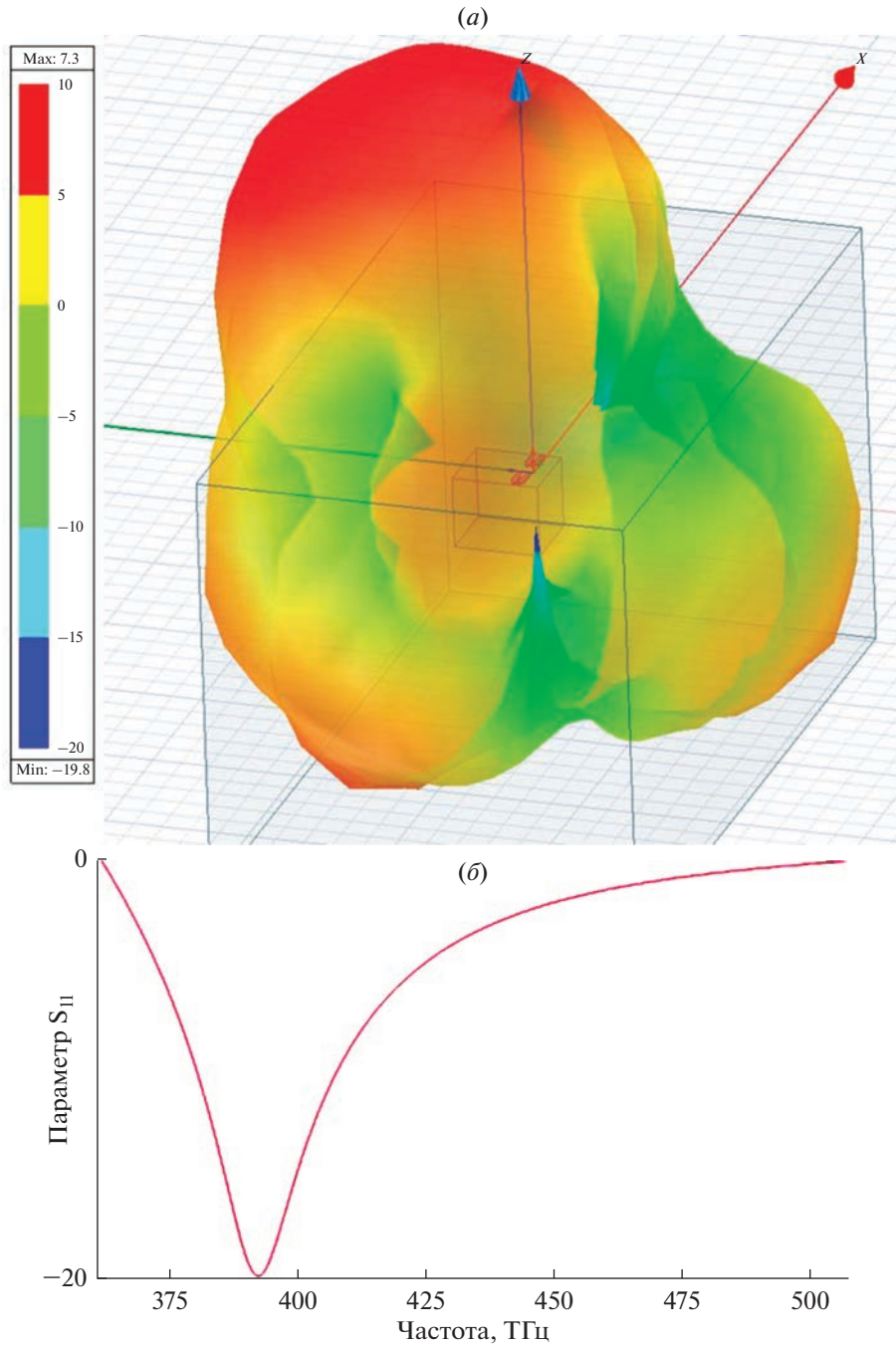
$$P_{\text{ant}} = \frac{E_0^2 A_{e,r}}{120\pi}, \quad (9)$$

где  $E_0$  – напряженность поля, В/м.

При устранении угловых зависимостей передающей и приемной антенн в их локальных си-

стемах координат, принимаемая мощность равна произведению плотности мощности падающей волны и эффективной апертуры приемной антенны (формула (10)):

$$P_r = S_t A_{e,r}. \quad (10)$$



**Рис. 2.** *a* – диаграмма направленности наноантенны с коэффициентом усиления сигнала; *б* – зависимость параметра  $S_{11}$  от частоты падающего излучения.

Из формулы (10) следует, что

$$P_r = \frac{G_t P_t \lambda^2 G_r}{4\pi r^2 4\pi} \quad (11)$$

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 G_t G_r D_t, \quad (12)$$

где  $G_t$  – коэффициент усиления передающей антенны в направлении принимающей и  $G_r$  – коэф-

фициент усиления приемной антенны в направлении передающей [8].

Угловую зависимость излучающих и приемных свойств антенны в дальнем поле часто называют диаграммой направленности антенны. Таким образом, шаблон представляет собой нормализованный график направленности, усиления или эффективной диафрагмы в зависимости от угла и часто приводится в масштабе дБ. Обычно излу-

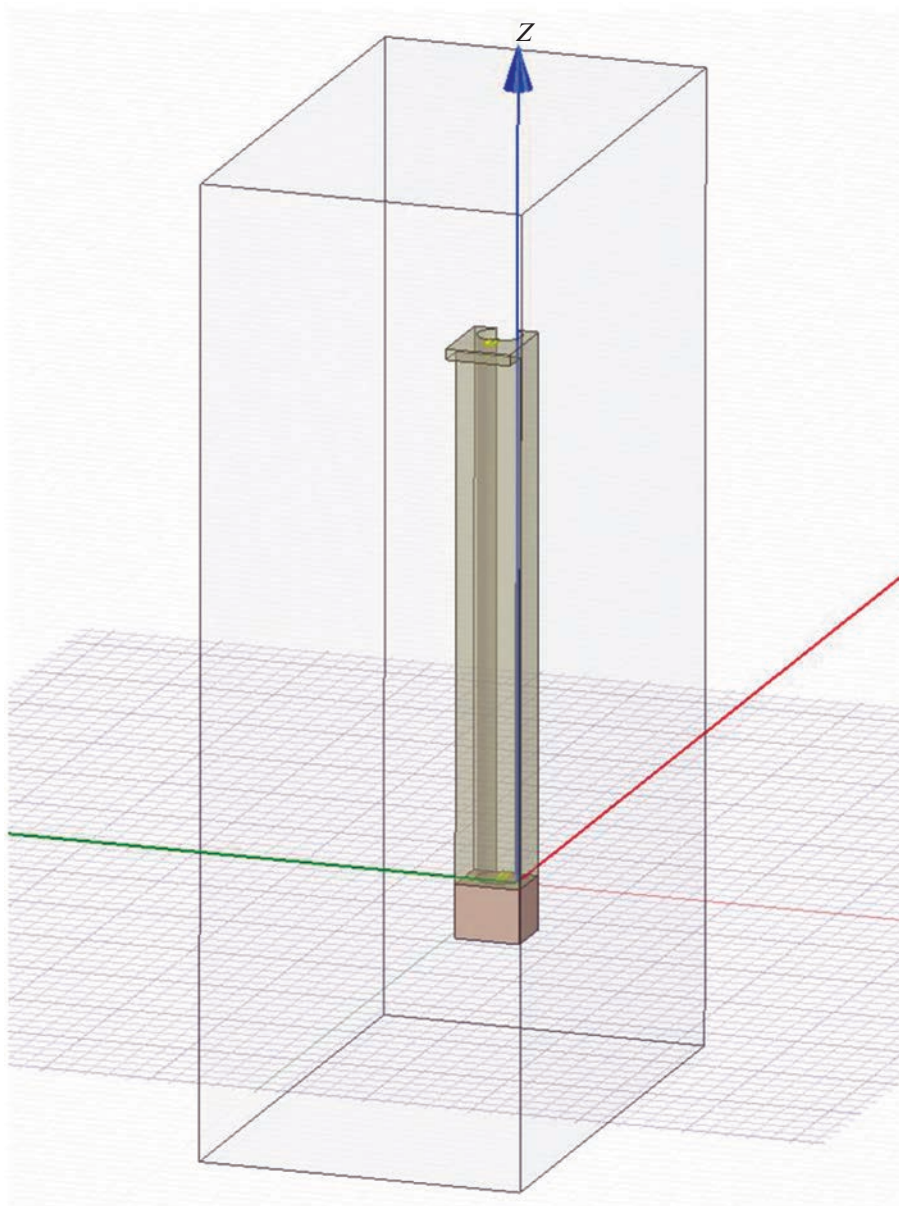


Рис. 3. Система связи плазмонных антенн в канале связи TSV.

емая нормированная плотность мощности или излучаемое поле отображаются в дБ.

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

С помощью метода конечных элементов было проведено моделирование наноантенны для выявления наиболее оптимальных геометрических параметров, подходящих для передачи сигнала в дальнем поле. Полученная модель представлена на рис. 1. Высота антенны составляет 20 нм. Моделирование проводилось при следующих условиях:

- материал наноантенны – золото;
- материал подложки – кремний;

- среда распространения излучения – воздух;
- частотный диапазон падающего излучения – от 1 до 600 ТГц (шаг – 0.05 ТГц).

Представленная модификация оптической наноантенны имеет хорошие передаточные характеристики, резонансную частоту 392.3 ТГц, что соответствует инфракрасному спектру, сформированное направление распространения излучения, коэффициент усиления сигнала, принимающий значение 7.3 (рис. 2а), а также низкий коэффициент пропускания  $S_{11}$ , равный –19.95 дБ (рис. 2б). Судя по диаграмме направленности, представленной на рис. 2, дальность передачи сигнала составляет ~5 мкм. Поскольку высота каналов TSV ва-

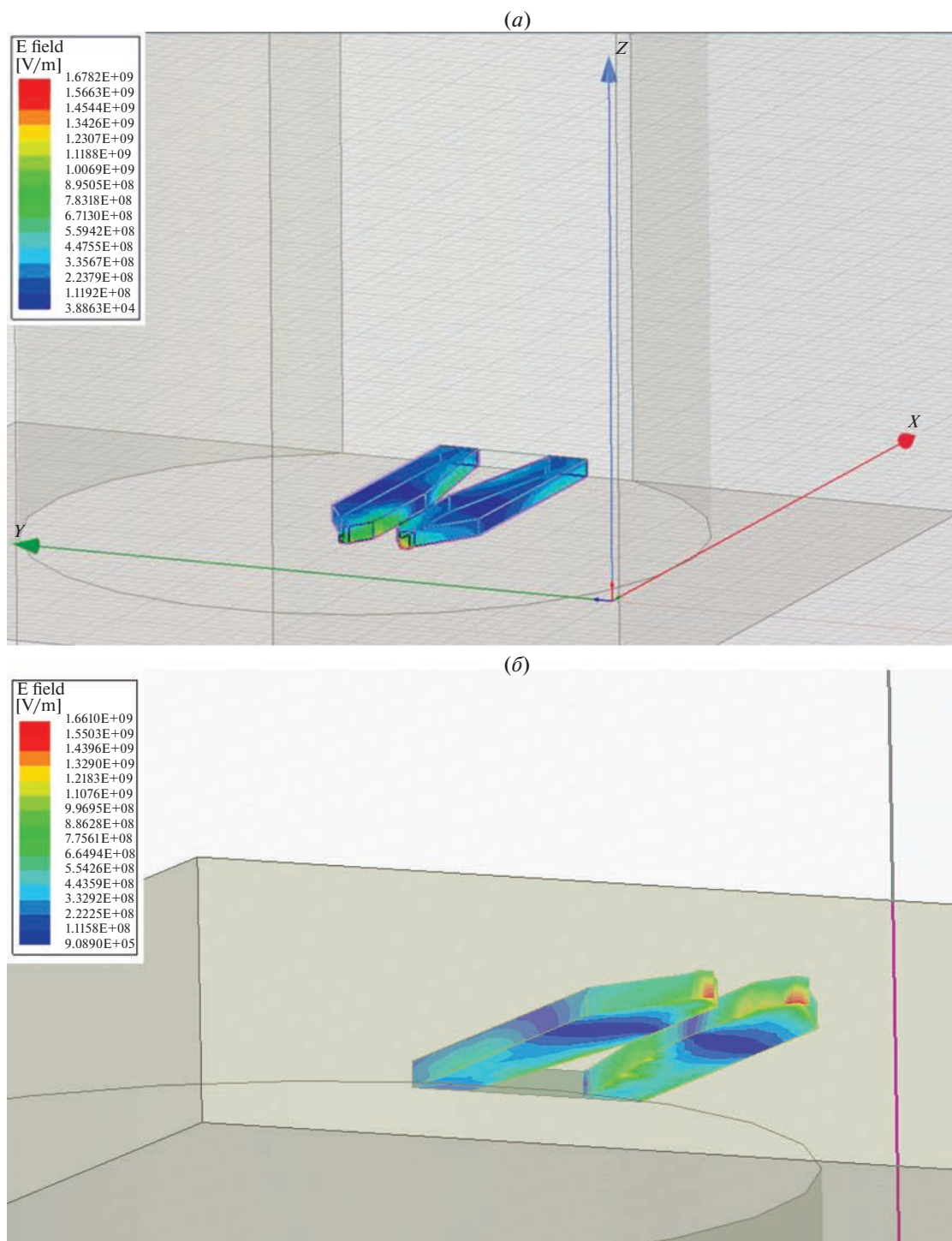


Рис. 4. Напряженность электрического поля антенны: а – передающая антенна; б – приемная антенна.

рируется в пределах от 1 до 50 мкм, то представленная модификация наноантенны может быть применена в определенных случаях, где высота сквозного канала не превышает 5 мкм.

Затем проводилось моделирование системы, состоящей из излучающей и приемной плазмонных

антенн, находящихся в канале связи TSV. Геометрические параметры антенн остались неизменными. Высота канала составляет 5 мкм, диаметр – 0.5 мкм. Полученная модель представлена на рис. 3.

Передающая антенна располагается внизу, в то время как приемная – сверху канала. Данный

шаг необходим для того, чтобы понять, что сигнал успешно дошел до приемной антенны, а также проверить эффективность передачи сигнала. Для этого была рассчитана напряженность электрического поля внутри каждой антенны. Полученные результаты моделирования представлены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, напряженность электрического поля внутри излучающей антенны принимает значение  $1.68 \times 10^9$  В/м, в то время как для приемной антенны (рис. 4б) она равна  $1.66 \times 10^9$  В/м. На основе полученных результатов возможно посчитать коэффициент полезного действия (КПД) передающей антенны. Поскольку КПД антенны — отношение излучаемой мощности, создаваемой антенной, к мощности подводимого к антенне сигнала, то его возможно рассчитать через соотношение напряженностей полей антенн (формула (9)). Таким образом, эффективность передачи сигнала внутри канала TSV на расстоянии 5 мкм составляет 97.63%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проводимого исследования производилось моделирование системы наноантенн, находящихся в канале TSV, в качестве устройств приема-передачи сигнала. Золотые наноантенны располагались на кремниевой подложке, среда распространения излучения — воздух. Частота падающего излучения варьировалась в диапазоне от 1 до 600 ТГц. Было установлено, что представленное исполнение оптической антенны способно передавать сигнал на расстояние до 5 мкм с КПД, равным 97.63 процентов, что делает его пригодным для совместного использования с технологией TSV в трехмерных интегральных схемах для пе-

редачи сигнала между их слоями. Резонансная частота наноантенны принимает значение 392.3 ТГц, что соответствует инфракрасному диапазону, коэффициент усиления антенны принимает значение 7.3, коэффициент пропускания  $S_{11}$  равен  $-19.95$  дБ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *O'Connor J.* Optical solutions for system-level interconnect, in: Proceedings of the 2004 International Workshop on System Level Interconnect Prediction, ACM.
2. *Shacham A., Bergman K., Carloni L.P.* Photonic networks-on-chip for future generations of chip multiprocessors // IEEE Trans. Comput. 2008. V. 57(9). P. 1246–1260.
3. *Guo P., Hou W., Guo L., Yang Q., Ge Y., Liang H.* Low insertion loss and non-blocking microring-based optical router for 3d optical network-on-chip // IEEE, Photon. J. 2018. V. 10(2). P. 1–10.
4. *Grani P., Bartolini S.* Scalable path-setup scheme for all-optical dynamic circuit switched noCs in cache coherent cmps // ACM J. Emerg. Technol. Comput. Syst. 2018. V. 14(1). P. 12.
5. *Sarabandi K., Choi S.* Design optimization of bowtie nanoantenna for high-efficiency thermophotovoltaics // Journal of Applied Physics. 2013. V. 114. № 21. P. 214303.
6. *Gadalla M.N., Abdel-Rahman M., Shamim A.* Design, optimization and fabrication of a 28.3 THz nano-rectenna for infrared detection and rectification // Scientific reports. 2014. V. 4. P. 4270.
7. *Jiawei Marvin Chan, Kheng Chooi Lee, Chuan Seng Tan.* Effects of Copper Migration on the Reliability of Through-Silicon Via (TSV) // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. V. 18. Is. 4. December 2018.
8. *Volakis J.L.* Antenna Engineering Handbook, McGraw-Hill Education, 2006.