

УДК 621.382:004.052.2

Конвертер терагерцового излучения на основе метаматериала

© 2023 г. А. В. Саблук¹, А. А. Башарин¹

¹ *Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация*

✉ Автор для переписки: sablukandrey@gmail.com

Аннотация. С начала восьмидесятых годов XX века терагерцовый диапазон (от 0,1 до 10 ТГц) привлекает неослабевающее внимание как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. Благодаря своим уникальным свойствам терагерцовое излучение используется для решения широкого спектра задач в спектроскопии, дефектоскопии и обеспечения безопасности. Создание эффективных поглотителей и преобразователей терагерцового излучения является сейчас основой для развития терагерцовых технологий. В настоящей работе рассматривается использование частотно-избирательного высокодобротного метаматериала для создания конвертера терагерцового излучения в инфракрасный диапазон длин волн. Предложен конвертер, состоящий из метаматериального поглотителя терагерцового излучения, покрытого микрометровым слоем графита, переизлучающим поглощенную метаматериалом энергию в инфракрасном диапазоне. Произведен численный электродинамический и сопряженный с ним тепловой расчет предлагаемого конвертера излучения. Результаты численного моделирования метаматериала на частоте 96 ГГц (окно прозрачности атмосферы) показали коэффициент поглощения электромагнитного излучения равный 99,998 %, а аналитически рассчитанный коэффициент полезного действия разработанного конвертера составил 93,8 %. Благодаря этому разработанный нами конвертер терагерцового излучения может найти применение в области досмотрового контроля в сфере транспортной безопасности и дефектоскопии.

Ключевые слова: метаматериал, терагерцовое излучение, инфракрасное излучение, конвертер излучения, частотно-избирательная поверхность

Благодарности: Авторы благодарят Малееву Н.А. за помощь в оформлении результатов данного исследования в научную статью. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания НИТУ МИСИС (код научной темы 0718-2020-0025).

Для цитирования: Саблук А.В., Башарин А.А. Конвертер терагерцового излучения на основе метаматериала. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2023; 26(1): 56—65. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-1-56-65>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на 2-й международной школе «Сверхпроводниковые технологии для обработки квантовой информации» (Superconducting Quantum Hardware, SQH-2022), Казань, 22—27 августа 2022 г.

© 2023 National University of Science and Technology MISIS.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Terahertz radiation converter based on metamaterial

A. V. Sabluk¹✉, A. A. Basharin¹

¹ *National University of Science and Technology MISIS,
4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation*

✉ *Corresponding author: sablukandrey@gmail.com*

Abstract. Since the early 1980s, the terahertz range (from 0.1 to 10 THz) attracts constant attention of both fundamental and applied physics. Due to its unique properties, terahertz radiation finds its applications in spectroscopy, defectoscopy, and security systems. The construction of efficient absorbers and converters in terahertz range is crucial for further development of terahertz technologies. In this work, we use a frequency-selective high-Q metamaterial to construct a converter of terahertz radiation into the infrared radiation. The converter consists of a metamaterial absorber of terahertz radiation covered with a micrometer thick layer of graphite, which emits in the infrared range the energy absorbed by the metamaterial. We have made a numerical electrodynamic and associated thermal simulation of the radiation converter. The metamaterial simulation at 96 GHz (low opacity window of the atmosphere) shows the electromagnetic radiation absorption coefficient of 99.998%, and the analytically calculated converter efficiency of 93.8%. Concluding the above our terahertz radiation converter may contribute to security systems and defectoscopy setups.

Keywords: metamaterial, terahertz range, infrared range, radiation converter, frequency selective surface

Acknowledgments: The Authors are grateful to N.A. Maleev for help with the presentation of these results as a scientific article. The work was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within State Assignment for the NUST MISIS (Assignment Code 0718–2020–0025).

For citation: Sabluk A.V., Basharin A.A. Terahertz radiation converter based on metamaterial. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2023; 26(1): 56–65. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-1-56-65>

Введение

Терагерцовый (ТГц) диапазон частот, лежащий в пределах от 0,1 до 10 ТГц [1–3], является важным частотным диапазоном для науки и техники в ближайшие десятилетия [4]. Перспективность использования ТГц спектрального диапазона для диагностики обусловлена возможностью достичь в нем более высокого, по сравнению с гигагерцовым диапазоном, пространственного разрешения в получаемом изображении и большей, по сравнению с инфракрасным (ИК) излучением, глубиной проникновения терагерцовых волн в исследуемые объекты [5]. Отметим, что, не являясь ионизирующим, ТГц-излучение, проникает в большинство материалов, отражаясь только от металлов и воды [6]. Системы безопасности на основе рассматриваемого в данной работе конвертера — потенциальная альтернатива металлоискателям и рентгеновскому досмотровому оборудованию [6]. Детекторы в ТГц-диапазоне — перспективные устройства об-

наружения скрытых дефектов, полостей, пустот и трещин, инородных включений при анализе материалов в промышленности [7]. Создание ТГц-детекторов сопряжено с технической сложностью реализации чувствительной ТГц-матрицы [8, 9].

Перспективным является использование существующих, хорошо зарекомендовавших себя ИК микроболометрических матриц для обработки ТГц-излучения, конвертированного в ИК-диапазон. Конвертацию одного частотного диапазона в другой можно произвести с помощью искусственно сформированных и особым образом структурированных сред — метаматериалов [10], состоящих из повторяющихся элементов — метаатомов. Взаимодействие электромагнитных волн (ЭМВ) с такой средой возбуждает ряд эффектов, недостижимых при помощи других технологий, а также не встречающихся в природе [10]. Среди необычных эффектов можно выделить клокнинг, сверхсильную локализацию полей, преодоление дифракционного предела [11–13].

В последние годы особое внимание обращено на метаматериалы благодаря возможности реализации с их помощью высокочастотных резонаторов в широком диапазоне ТГц-частот [13—15] при различных температурах [16, 17]. Метаматериалы подходят для создания ТГц источников излучения [18], модуляторов [19—22] и детекторов [23, 24]. Терагерцовые детекторы взрывчатых веществ используются в системах транспортной безопасности [2], астрономии [25], биомедицины [26].

Актуальность задачи конвертации ТГц-излучения заключается не столько в самой необходимости понижения или повышения частоты, сколько в практическом удобстве использования приборов и устройств, работающих в определенном технически доступном диапазоне, которые можно адаптировать под другой диапазон. Конвертер конструктивно состоит из двух частей. Как и у детектора, основной частью конвертера является приемник, вторую составную часть представляет

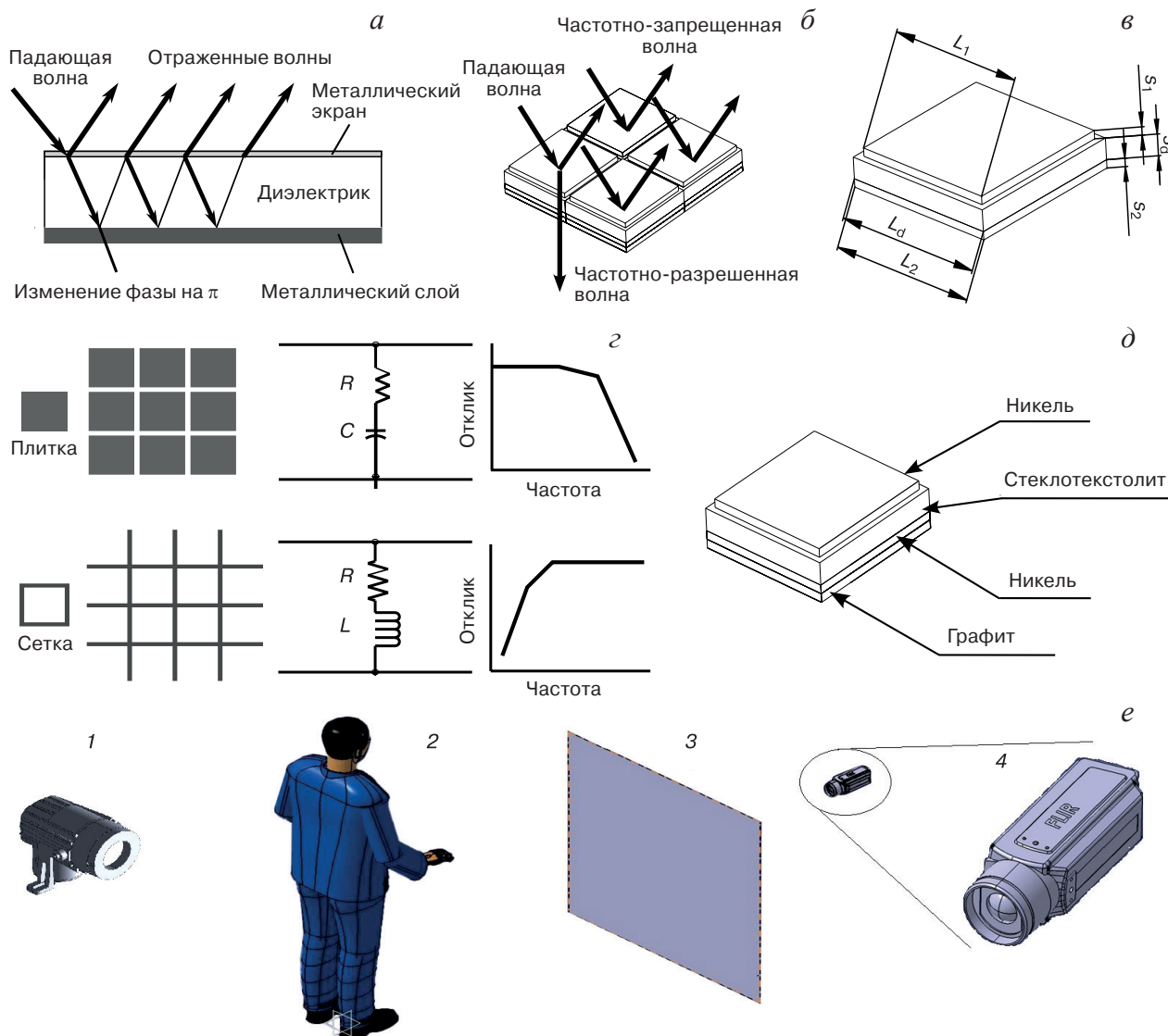


Рис. 1. Физические принципы работы и основные параметры конвертера излучения: а — экран Солсбери; б — частотно-избирательная поверхность; в — мета-атом; г — ЧИПы двух топологий и их эквивалентные схемы (плитка используется в низкочастотной области, сетка находит применение в области высоких частот); д — верхний и нижний проводящие слои в мета-атоме выполнены из никеля, в качестве диэлектрика выбран стеклотекстолит, на нижнюю поверхность метаматериала нанесен графит для конвертации излучения; е — пример использования конвертера ТГц излучения в области безопасности; 1 — источник электромагнитных волн с частотой 96 ГГц; 2 — человек, находящийся в зоне дозора; 3 — экран; 4 — ИК-камера

Fig. 1. Physical working principles and main parameters of converter: (a) salisbury screen [31] consisting of a thick screening metallic layer coated with a dielectric layer having a specially selected thickness and a thin transparent metallic screen; (b) frequency selective surface in the form of a 2D array of metallic elements on a dielectric substrate which reflects or absorbs electromagnetic waves at the preset frequency depending on the surface topology; (v) metaatom; (r) frequency selective surfaces of two topologies and their equivalent circuits (tiles are used in the low-frequency range, and grid is used at high frequencies); (d) top and bottom conducting layers in the metaatom are nickel, the dielectric being fiberglass plastic. The bottom surface of the metamaterial is coated with graphite for radiation conversion; (e) example of THz converter application in security domain. The person 2 is in the inspection zone between the 96 GHz electromagnetic source 1 and the screen 3 which is the THz converter. The radiation passes through the transparent media and is incident on the terahertz converter for further conversion to IR radiation. The infrared radiation of the converter is read by the IR camera 4

излучатель. Хороший приемник сигнала эквивалентен идеальному поглотителю, который может быть выполнен из метаматериалов [27—30].

Идеальные поглотители

По своей природе поглотители ЭМВ делятся на две группы: резонансные и нерезонансные. Первым соответствует идеальное поглощение в узкой полосе пропускания, в то время как нерезонансные поглотители используются для неидеального широкополосного поглощения. Для того чтобы понять причину выбора метаматериала в качестве идеального поглотителя в составе нашего конвертера, рассмотрим принцип работы резонансных поглотителей. Первый резонансный поглотитель ЭМВ был изобретен американским инженером Уинфилдом Солсбери [31], получил название экрана Солсбери в честь изобретателя (рис. 1, а) и состоит из толстого, экранирующего металлического слоя, на который нанесен слой диэлектрика специально подобранной толщины и тонкого, пронизываемого металлического экрана. Принцип работы экранов Солсбери основан на явлении деструктивной интерференции, аналогично просветляющим покрытиям в оптике. При падении на экран ЭМВ проходит сквозь верхний пронизываемый слой и диэлектрик толщиной в четверть длины волны, деленный на показатель преломления. Электромагнитная волна отражается от нижнего экранирующего металлического слоя, при этом ее фаза меняется на 180° и вызывает деструктивную интерференцию, в результате которой ЭМВ затухает в толще диэлектрика [32].

Метод частотно–избирательной поверхности

Другой разновидностью резонансного поглотителя является частотно–избирательная поверхность (ЧИП) [33]. При падении на ЧИП, представляющий собой двумерный массив металлических элементов на диэлектрической подложке, который на заданной частоте отражает или поглощает ЭМВ в зависимости от топологии (рис. 1, б) волны, совпадающей по частоте с резонансной частотой элементов ЧИП, могут проходить через нее, либо отражаться полностью или частично, в зависимости от топологии поверхности. Частотно–избирательная поверхность проектируются в виде периодических массивов металлических элементов, вытравленных на диэлектрическом материале. Структуры ЧИП с позиции электродинамики могут быть емкостными или индуктивными, их также называют пространственными фильтрами (рис. 1, г). Фильтры в зависимости от назначения могут либо пропускать, либо задерживать определенный частотный диапазон. Фильтру

высоких частот, RC –фильтру, соответствует поверхностный узор–плитка, эквивалентной схемой фильтра является последовательное соединение емкости и сопротивления. Фильтру низких частот, RL –фильтру, соответствует сетчатый узор, представляющий собой последовательное соединение индуктивности и сопротивления. Точной границы применимости того или иного узора не существует, в каждом конкретном случае необходимо учитывать геометрические параметры структуры. Известной проблемой является непрозрачность металлов для ЭМВ с частотами ниже плазменной частоты металла. Поэтому при проектировании верхнего слоя метаматериального поглотителя необходимо понизить его эффективную плазменную частоту ниже рабочей частоты. Плазменная частота ω_p пропорциональна квадратному корню из плотности заряда:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{m^* \epsilon_0}}, \quad (1)$$

где e — электрический заряд; n — плотность заряда; m^* — эффективная масса электрона.

Как видно из (1), понизить плазменную частоту возможно только уменьшением плотности заряда n , так как другие величины (e , m^* и ϵ_0) являются константами. Понижение плотности заряда обеспечивается дизайном металлических элементов верхнего слоя ЧИП. Разработанный нами метаматериал, представляющий собой три наложенных друг на друга слоя квадратного сечения, основные геометрические размеры: $L_1 = 0,535$ мм, $L_2 = L_d = 0,585$ мм, толщины $s_1 = s_2 = 0,024$ мм, $s_d = 0,067$ мм, общая толщина метаматериала составляет 0,115 мм (рис. 1, в, д) — ЧИП, которая поглощает сигнал на частоте 96 ГГц. Выбор частоты обусловлен окном прозрачности в атмосфере [34].

Схема конвертации терагерцового излучения

Один из вариантов использования предложенного нами конвертера ТГц–излучения представлен на рис. 1, г. Человек (2) (см. рис. 1) находится в зоне досмотра между источником ЭМВ с частотой 96 ГГц (1) и экраном (3), являющимся конвертером ТГц–излучения. Излучение проходит сквозь прозрачные для него среды и достигает экрана–конвертера терагерцового излучения. Конвертация ТГц–излучения в ИК–диапазон происходит за счет нагрева и переизлучения, для переизлучения на заднюю поверхность метаматериала наносится тонкий слой вещества, максимально близкий по свойствам к абсолютно черному телу, в нашем случае графиту. Таким образом, в предложенном нами конвертере за поглощение падающего излу-

чения отвечает метаматериал, а за ИК-излучение — слой графита. В качестве ИК-приемника предполагается использовать тепловизор. Инфракрасное излучение конвертера считывается ИК-камерой (4). Современные тепловизоры [35] имеют болометрическую матрицу с разрешением от 160×120 до 1280×720 чувствительных элементов, на которую оптическая система прибора фокусирует тепловое изображение объекта исследования. Такие матрицы не требуют охлаждения, а их спектральная чувствительность в диапазоне от 1 до 14 мкм одинакова. Предел чувствительности для неохлаждаемых микроболометрических матриц в коммерческих моделях составляет 20 мК [35]. Пространственное распределение падающего на конвертер ТГц-излучения соответствует распределению плотности потока тепла от слоя графита. Тепловое поле конвертера будет преобразовано в видимое цветное изображение на экране дисплея тепловизора.

Электродинамическое моделирование

Коэффициенты отражения и поглощения в диапазоне частот от 50 до 150 ГГц предложенного

нами метаматериала были рассчитаны численно в пакете электродинамического моделирования Microwave Studio CST. На частоте 96 ГГц соответствующей длине волны $\lambda = 3,122$ мм коэффициент поглощения достигает своего максимального значения в 99,998 % (рис. 2, а), что достаточно для того, чтобы считать такой поглотитель идеальным [29]. Рассмотрим пример применения сконструированного нами конвертера в области детектирования. Поместим треугольную стальную пластину с размерами катетов 3 и 6 мм, на расстоянии 20 мм от метаповерхности (рис. 2, б). Пластина смещена к правому верхнему углу метаповерхности, расстояние от края пластины до верхнего края метаповерхности 4,7 мм, расстояние от края пластины до правого края метаповерхности 0,9 мм. Метаповерхность представляет собой массив размерами $23,4 \times 23,4$ мм², состоящий из 1600 мета-атомов (см. рис. 2, б). Электромагнитный отклик метаматериала был визуализирован с помощью расчета в программе электромагнитного моделирования CST Microwave Studio методом конечных разностей во временной области (FDTD) [36]. Результаты FDTD [36] распределения напряженности электрического и магнитного полей, а также

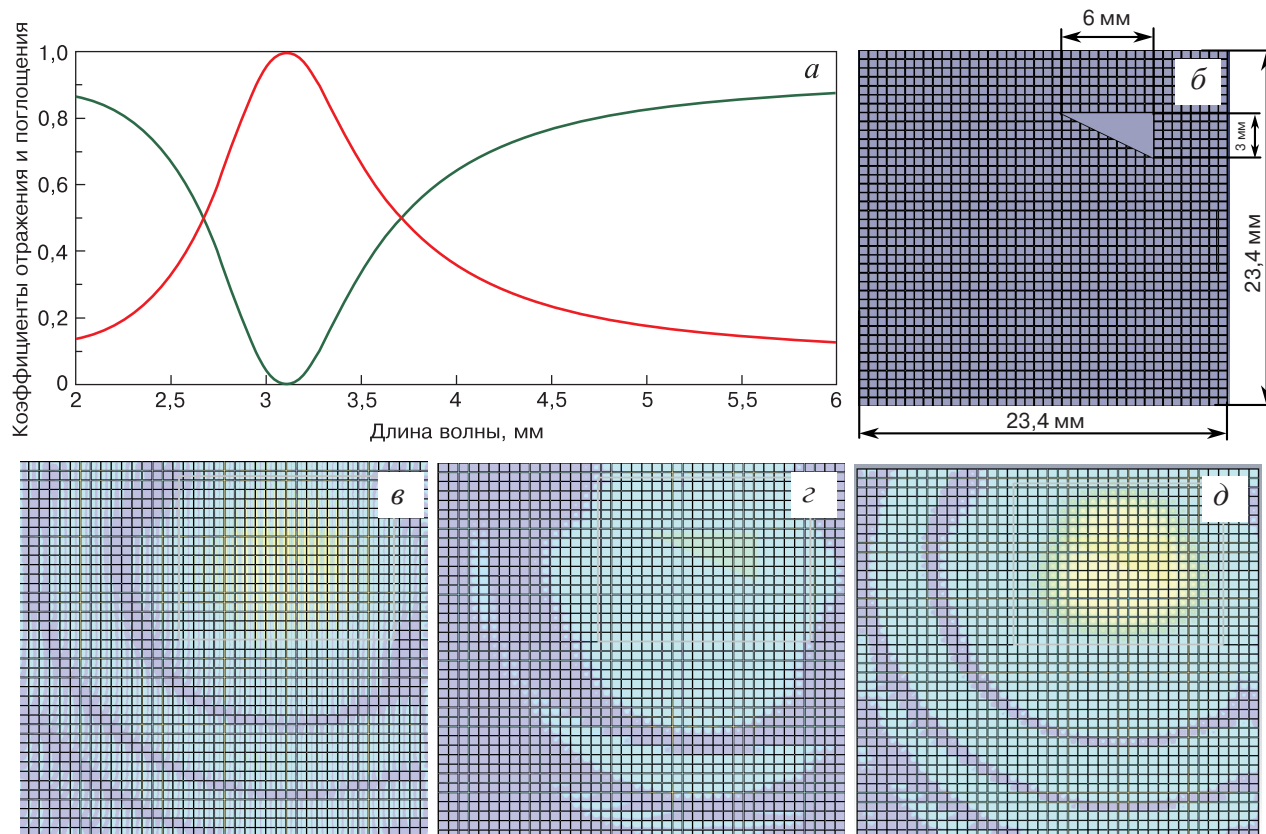


Рис. 2. Результаты численного моделирования поглощения излучения (а), зависимость коэффициентов поглощения (красная линия) и отражения (зеленая линия) от частоты падающего излучения. Пример детектирования треугольной стальной пластины (б); распределения (в) напряженности электрического поля в диэлектрическом слое; напряженности магнитного поля (г) и плотности поверхностного тока в металлическом слое (д)

Fig. 2. Results of numerical simulation of radiation absorption: (a) absorption coefficient (red curve) and reflection coefficient (green curve) as a function of incident radiation wavelength; (б) example of detection of a triangular steel plate; simulation output data were (в) electric field magnitude in the dielectric layer, (г) magnetic field magnitude and (д) surface current density in the metallic layer

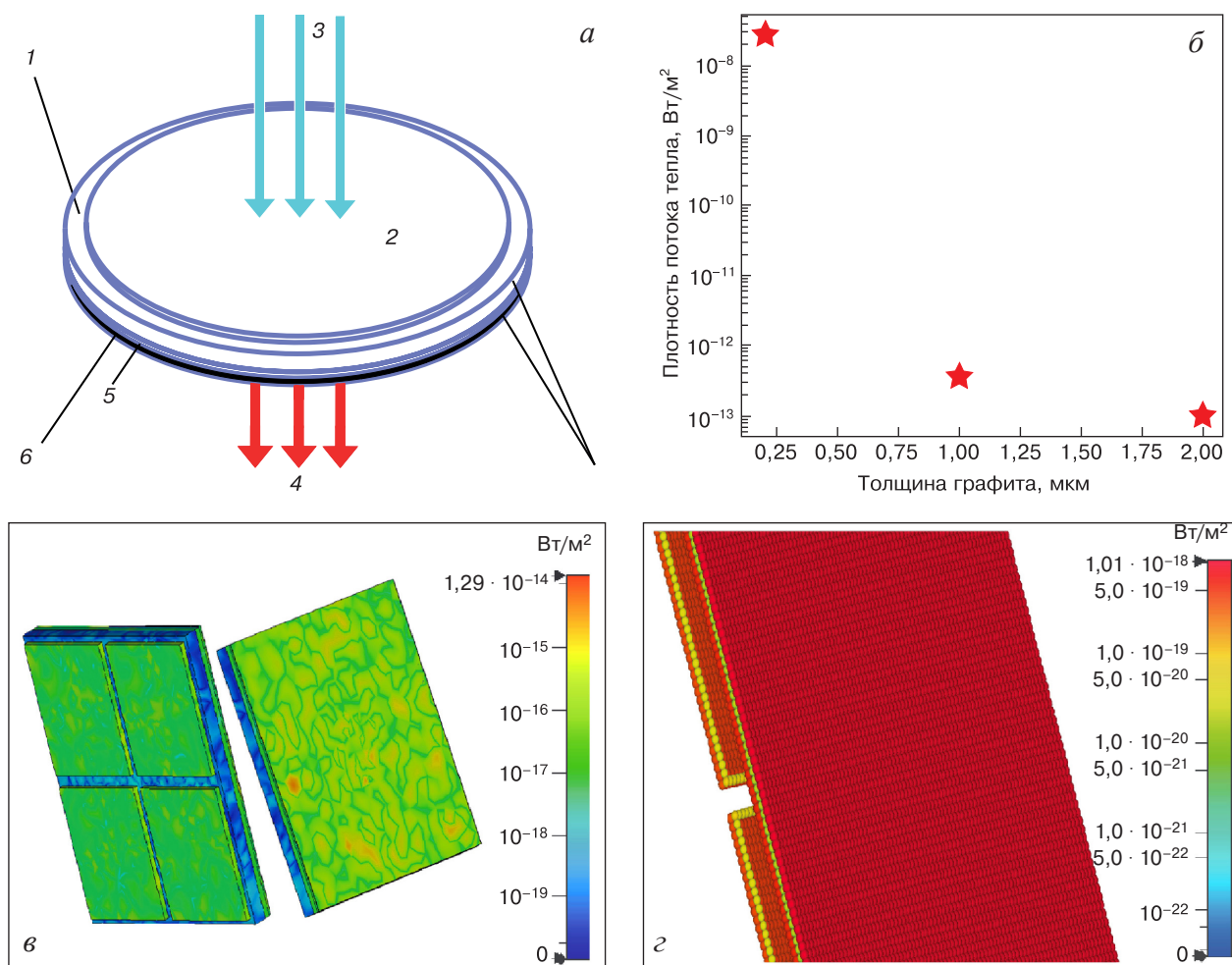


Рис. 3. Результаты конвертации излучения: а — радиально-симметричная модель ячейки конвертера: 1 — стеклотекстолит; 2 — верхний слой ячейки метаматериала из никеля; 3 — детектируемое ТГц-излучение; 4 — ИК-излучение; 5 — нижний слой ячейки из никеля; 6 — эмиссионный слой из графита; б — плотность потока тепла преобразованного ТГц-излучения для трех толщин графита 0,2, 1 и 2 мм; в — визуализация поверхностной плотности потока тепла; г — визуализация объемной плотности потока тепла указывают на то, что именно эмиссионный слой в созданном конвертере отвечает за тепловое излучение

Fig. 3. Radiation conversion results: (a) radially symmetrical model of radiation converter cell (1 is the fiberglass plastic, 2 is the top nickel layer of the metamaterial cell, 3 is detected THz radiation, 4 is IR radiation, 5 is the bottom nickel layer of the metamaterial cell and 6 is the graphite emitting layer); (б) heat flow density of converted THz radiation for three graphite layer thicknesses (0.2, 1 and 2 mm); images of (в) surface heat flow density and (г) bulk heat flow density suggest that it is the emitting layer in the radiation converter that provides for heat emission

плотности поверхностного тока на частоте 96 ГГц в метаматериальном экране показаны на рис. 2, с—е. Размеры рассмотренной нами стальной пластины сопоставимы с длиной волны падающего излучения, что вызывает дифракцию и интерференцию, которую мы видим в распределениях полей и токов в метаматериальном экране.

В правом верхнем углу метаповерхности (см. рис. 2) видна характерная дифракционная картина. Напротив объекта на экране мы видим яркое пятно, которому соответствует максимум напряженности электрического и магнитного полей, а также плотности поверхностного тока. При удалении от центра, возбуждение расходится по метаповерхности в виде концентрических окружностей со спадающей интенсивностью.

Моделирование и расчет КПД конвертера терагерцового излучения

Для преобразования ТГц в инфракрасный диапазон метаматериальный поглотитель покрывается слоем переизлучателя с максимальной спектральной степенью черноты, толщину которого необходимо выбрать с учетом обеспечения быстродействия конвертера. Также важным условием является равномерное распределение материала переизлучателя по поверхности нижнего слоя поглотителя. Следовательно, материал переизлучателя должен иметь возможность наноситься достаточно тонким слоем и иметь хорошую адгезию к поверхности. Исходя из выше перечисленных требований и учитывая хорошую

адгезию к никелю [37], был выбран графит. В целях оптимизации толщины переизлучателя были выполнены сопряженные электродинамический и тепловой расчеты в пакете Microwave Studio CST для трех толщин графита (0,2, 1 и 2 мкм), коэффициент излучения графита принимался равным 0,97. Лучший результат получен для толщины графита 0,2 мкм, ему соответствуют самая высокая, плотность потока тепла, и следовательно максимальная контрастность изображения на микроболометрической матрице тепловизора. При моделировании конвертера излучения со слоем графита равным 0,2 мкм, который в 200 раз больше толщины графена, термодинамические параметры были выбраны следующим образом: теплопроводность 2000 Вт/(м · К), теплоемкость 650 Дж/(кг · К), коэффициент теплового расширения при $t = 293,15$ К составлял 3,7 м/К [39]. Для конвертеров с толщиной графита 1 и 2 мкм, параметры графита были заданы библиотекой материалов Microwave Studio CST. Коэффициент излучения полированного никеля равен 0,072, что на порядок ниже коэффициента излучения графита, таким образом, в расчете плотности потока тепла излучением никеля уместно пренебречь. Результаты сопряженных расчетов для четырех ячеек метаматериала, представлены на рис. 3, б—г. Визуализация поверхностной и объемной плотности потока тепла указывают на то, что именно эмиссионный слой в созданном конвертере отвечает за тепловое излучение. Для расчета КПД конвертера ячейка метаматериала была адаптирована к радиально-симметричной модели для удобства решения задачи теплопроводности рис. 3, а. По условию численного моделирования ячейка конвертера находилась в вакууме, ее ось симметрии коллинеарна падающему на поверхность ячейки ТГц излучению. Для цилиндрической ячейки площадь элементов и толщина элементов соответствовала оригинальной ячейке. Диаметр нижней части ячейки метаматериала и диэлектрика составил 0,66 мм, диаметр верхней ячейки — 0,6 мм.

КПД конвертера определялся как отношение энергии теплового излучения E_{out} к падающей энергии ТГц-излучения E_{in} . Значение ИК-излучения E_{out} рассчитывалось в CST с помощью сопряженного расчета. Длительность импульса ТГц-излучения составляла 3 с. Граничные условия были следующими: температура конвертера при-

нималась фиксированной и равной 293,15 К, максимальная плотность потока энергии падающего излучения P принималась равной 10 Вт/м², время накопления тепловой энергии метаматериала было выбрано равным $t_{\text{mm}} = 20$, что обусловлено относительно низкой теплопроводностью диэлектрика и его значительной толщиной. Коэффициент полезного действия конвертера η в процентах, рассчитывался по следующим формулам:

$$\eta = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} \times 100\%;$$

$$E_{\text{in}} = \int_0^{t_{\text{imp}}} dt \int_0^R P(t, r) 2\pi r dr;$$

$$E_{\text{out}} = \int_0^{t_{\text{mm}}} dt \int_0^R \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) 2\pi r dr,$$

где ε — коэффициент излучения; σ — постоянная Стефана—Больцмана, $P(t, r)$ — максимальная плотность потока энергии падающего излучения; t_{mm} — время накопления тепловой энергии ячейки метаматериала; t_{imp} — длительность импульса ТГц излучения.

Наилучший КПД конвертера был достигнут при минимальной толщине эмиссионного слоя равной 0,2 мкм и составил 93,8 %.

Заключение

В данной работе была предложена модель конвертера ТГц-излучения из метаматериала. Принцип работы конвертера основан: на поглощении ТГц излучения резонансным метаматериальным поглотителем, нагреве конвертера и переизлучении тепла тонким слоем графита. Излучение в ИК спектре может быть зарегистрировано болометрической матрицей тепловизора. Метаматериальный поглотитель рассчитан на частоту 96 ГГц, при которой коэффициент поглощения конвертера равен 99,998 %. Конвертер обладает малой теплоемкостью и, как следствие, высокой чувствительностью. Наилучший рассчитанный на основе численного моделирования КПД для конвертера составил 93,8 %. Такой конвертер может найти применение в визуализации ТГц-излучения для дефектоскопии на производстве, а также в сфере безопасности.

Библиографический список

1. Кульчицкий Н.А., Наумов А.В., Старцев В.В., Демянченко М.А. Детектирование в терагерцевом диапазоне. Часть 1. *Фотоника*. 2021; 15(1): 52—69. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.1.52.68>
2. Handbook of terahertz technologies: devices and applications. Song H.D., Nagatsuma T., eds. 1st ed. NY,

USA: Jenny Stanford Publishing; 2015. 612 p. <https://doi.org/10.1201/b18381>

3. Terahertz spectroscopy and imaging. Peiponen K.E., Zeitler J.A., Kuwata-Gonokami M., eds. Springer Berlin, Heidelberg; 2013. 644 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29564-5>

4. Usanov D.D., Romanova N.V., Saldina D.D. Prospects and trends in the development of terahertz technologies: patent landscape. *The Economics of Science*. 2017; 3(3): 189—202. <https://doi.org/10.22394/2410-132X-2017-3-3-189-202>
5. Ахманов А.С., Ангелуц А.А., Балакин А.В., Назаров М.М., Ожередов И.А., Сапожников Д.А., Соколов В.И., Хайдуков Е.В., Шкуринов А.П., Панченко В.Я. Терагерцовая оптоэлектроника и ее применения. М.: Интерконтакт Наука; 2014. 785 с.
6. Zimdars D., White J., Stuck G., Sucha G., Fichter G., Williamson S.L. Time domain terahertz imaging of threats in luggage and personnel. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*. 2007; 17(2): 271—287. <https://doi.org/10.1142/S0129156407004497>
7. Carranza I.E., Grant J., Gough J., Cumming D.R.S. Metamaterial-based terahertz imaging. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2015; 5(6): 892—901. <https://doi.org/10.1109/THZ.2015.2463673>
8. Advanced millimeter-wave technologies: antennas, packaging and circuits. Liu D., Gaucher B., Pfeiffer U., Grzyb J., eds. John Wiley & Sons, Ltd; 2009. 769 p. <https://doi.org/10.1002/9780470742969>
9. Terahertz optoelectronics/ Sakai K., ed. Springer Berlin, Heidelberg; 2005. 389 p. <https://doi.org/10.1007/b80319>
10. Ali A., Mitra A., Aïssa B. Metamaterials and metasurfaces: A review from the perspectives of materials, mechanisms and advanced metadevices. *Nanomaterials*. 2022; 12(6): 1027—1059. <https://doi.org/10.3390/nano12061027>
11. Pendry J.B. Negative refraction makes a perfect lens. *Physical Review Letters*. 2000; 85(18): 3966—3969. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.3966>
12. Fedotov V.A., Rose M., Prosvirnin S.L., Papasimakis N., Zheludev N.I. Sharp trapped-mode resonances in planar metamaterials with a broken structural symmetry. *Physical Review Letters*. 2007; 99(14): 147401—147406. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.147401>
13. Al-Badri K. Very high Q-factor based on G-shaped resonator type metamaterial absorber. *Ibn Al-Haitham Journal For Pure and Applied Science*. 2017 (IH-SCICONF). 2018: 160—168. <https://doi.org/10.30526/2017.IHSCICONF.1788>
14. Savinov V., Fedotov V.A., Anlage S.M., de Groot P.A.J., Zheludev N.I. Modulating sub-THz radiation with current in superconducting metamaterial. *Physical Review Letters*. 2012; 109(24): 243904—243909. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.243904>
15. Al-Naib I., Yang Y., Dignam M.M., Zhang W., Singh R. Ultra-high Q even eigenmode resonance in terahertz metamaterials. *Applied Physics Letters*. 2015; 106(1): 011102—011109. <https://doi.org/10.1063/1.4905478>
16. Vahala K.J. Optical microcavities. *Nature*. 2003; 424(6950): 839—846. <https://doi.org/10.1038/nature01939>
17. Savinov V., Tsiatmas A., Buckingham A.R., Fedotov V.A., de Groot P.A.J., Zheludev N.I. Flux exclusion superconducting quantum metamaterial. *Scientific Reports*. 2012; 2(1): 450—456. <https://doi.org/10.1038/srep00450>
18. Liu D., Yan Y. Investigations on a dual-frequency operation terahertz gyrotron. In: *OSA Technical Digest (online). The 8th Inter. symp. on ultrafast phenomena and terahertz waves. 10–12 October 2016. Chongqing, China*. Washington, DC, USA: Optica Publishing Group; 2016. <https://doi.org/10.1364/ISUPTW.2016.IW2A.4>
19. Savinov V., Fedotov V.A., Anlage S.M., de Groot P.A.J., Zheludev N.I. Modulating sub-THz radiation with current in superconducting metamaterial. *Physical Review Letters*. 2012; 109(24): 243904—243909. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.243904>
20. Chen H., Padilla W.J., Zide O., Gossard A.C., Taylor A.J., Averitt R.D. Active terahertz metamaterial devices. *Nature*. 2006; 444: 597—600. <https://doi.org/10.1038/nature05343>
21. Srivastava Y.K., Manjappa M., Cong L., Krishnamoorthy H.N.S., Savinov V., Pitchappa P., Singh R. A superconducting dual-channel photonic switch. *Advanced Materials*. 2018; 30(29): e1801257. <https://doi.org/10.1002/adma.201801257>
22. Srivastava Y.K., Manjappa M., Krishnamoorthy N.S., Singh R. Accessing the high-Q dark plasmonic fano resonances in superconductor metasurfaces. *Advanced Optical Materials*. 2016; 4(11): 1875—1881. <https://doi.org/10.1002/adom.201600354>
23. Wang Y., Han Z., Du Y., Qin J. Ultrasensitive terahertz sensing with high-Q toroidal dipole resonance governed by bound states in the continuum in all-dielectric metasurface. *Nanophotonics*. 2021; 10(4): 1295—1307. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0582>
24. Strikwerda A., Tao H., Kadlec E.A., Fan K., Padilla W., Zhang X., Shaner E.A., Averitt R. Metamaterial based terahertz detector. In: *OSA Technical Digest (online). Conf. on lasers and electro-optics 2011 (CLEO 2011). 1–6 May 2011. Baltimore, MD, USA*. Washington, DC, USA: Optica Publishing Group; 2011. <https://doi.org/10.1364/QELS.2011.QTuD6>
25. Feldman Y., Puzenko A., Ishai P.B., Caduff A., Agranat A.J. Human skin as arrays of helical antennas in the millimeter and submillimeter wave range. *Physical Review Letters*. 2008; 100(12): 128102—128107. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.128102>
26. Convergence of terahertz sciences in biomedical systems. Park G.-S., Kim Y.H., Han H., Han J.K., Ahn J., Son J.-H., Park W.-Y., Jeong Y.U., eds. Springer Dordrecht; 2012. 435 p.
27. Alves F., Pimental L., Grbovic D., Karunasiri G. MEMS terahertz-to-infrared band converter using frequency selective planar metamaterial. *Scientific Reports*. 2018; 8(1): 12466—12480. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30858-z>
28. Bilgin H., Zahertar S., Sadeghzadeh S., Yalcinkaya A.D., Torun H. A MEMS-based terahertz detector with metamaterialbased absorber and optical interferometric readout. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2016; 244: 292—298. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.04.021>
29. Landy N.I., Sajuyigbe S., Mock J.J., Smith D.R., Padilla W.J. Perfect metamaterial absorber. *Physical Review Letters*. 2008; 100(20): 207402—207409. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.207402>
30. Askerzade I. Physical properties of unconventional superconductors. In: *Unconventional superconductors. Springer series in materials science*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2012. Vol 153. P. 1—26. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22652-6_1
31. Tao H., Bingham C.M., Strikwerda A.C., Pilon D., Shrekenhamer D., Landy N.I., Fan K., Zhang X., Padilla W.J., Averitt R.D. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: design, fabrication, and characterization. *Physical Review B. Condensed Matter*. 2008; 78: 241103 (R). <https://doi.org/10.1103/PHYSREVB.78.241103>

32. Munk B.A. Frequency selective surfaces: Theory and design. Wiley; 2000. 440 p.

33. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Частотно-избирательные поверхности. Основные области применения. *Радиотехника*. 2005; (9(100)): 4—12.

34. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Кульчицкий Н.А., Мельников А.А., Мальцев П.П. Детектирование в терагерцовом диапазоне. *Нано- и микросистемная техника*. 2012; (2(139)): 28—35.

35. Карманное практическое руководство по термографии. Testo AG; 2018. 56 с. URL: https://domikelectrica.ru/wp-content/uploads/2018/11/Testo_Prakticheskoe_rukovodstvo_po_termografii.pdf

36. Hao Y., Mittra R. FDTD modeling of metamaterials: Theory and applications. Boston; London: Artech House Publishers; 2009. 33 p.

37. Адамчук Ю.О., Богуславский Ю.О., Богуславский Л.З., Синчук А.В. Нанесение углеродных наноструктурированных покрытий на металлические поверхности электроразрядным способом в среде углеводородов. *Электронная обработка материалов*. 2017; 53(6): 1—7. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1051302>

38. Научно-исследовательскому институту конструкционных материалов на основе графита – 55 лет: сб. статей; под ред. Е.П. Маянова, П.Г. Елизарова, Н.Ю. Бейлиной, И.А. Бубненко, С.А. Колесникова, А.Н. Проценко, Т.Д. Фирсовой. М.: Научные технологии; 2015. 246 с.

39. Браже Р.А., Кочаев А.И., Мефтахутдинов Р.М. Графены и их физические свойства. Ульяновск: УЛГТУ; 2016. 139 с.

References

1. Kulchitsky N.A., Naumov A.V., Startsev V.V., Demyanenko M.A. Detection in the terahertz range. Part 1. *Photonics Russia*. 2021; 15(1): 52—69. (In Russ.). <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.1.52.68>

2. Song H.D., Nagatsuma T., eds. Handbook of terahertz technologies: devices and applications. 1st ed. NY, USA: Jenny Stanford Publishing; 2015. 612 p. <https://doi.org/10.1201/b18381>

3. Peiponen K.E., Zeitler J.A., Kuwata-Gonokami M., eds. Terahertz spectroscopy and imaging. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2013. 644 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29564-5>

4. Usanov D.D., Romanova N.V., Saldina D.D. Prospects and trends in the development of terahertz technologies: patent landscape. *The Economics of Science*. 2017; 3(3): 189—202. <https://doi.org/10.22394/2410-132X-2017-3-3-189-202>

5. Akhmanov A.S., Angeluts A.A., Balakin A.V., Nazarov M.M., Ozheredov I.A., Sapozhnikov D.A., Sokolov V.I., Khaidukov E.V., Shkurinov A.P., Panchenko V.Ya. Terahertz optoelectronics and its applications. Moscow: Interkontakt Nauka; 2014. 785 p. (In Russ.)

6. Zimdars D., White J., Stuck G., Sucha G., Fichter G., Williamson S.L. Time domain terahertz imaging of threats in luggage and personnel. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*. 2007; 17(2): 271—287. <https://doi.org/10.1142/S0129156407004497>

7. Carranza I.E., Grant J., Gough J., Cumming D.R.S. Metamaterial-based terahertz imaging. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2015; 5(6): 892—901. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2015.2463673>

8. Liu D., Gaucher B., Pfeiffer U., Grzyb J., eds. Advanced millimeter-wave technologies: antennas, packaging and circuits. John Wiley & Sons, Ltd; 2009. 769 p. <https://doi.org/10.1002/9780470742969>

9. Sakai K., ed. Terahertz optoelectronics Springer Berlin, Heidelberg; 2005. 389 p. <https://doi.org/10.1007/b80319>

10. Ali A., Mitra A., Aïssa B. Metamaterials and metasurfaces: A review from the perspectives of materials, mechanisms and advanced metadevices. *Nanomaterials*. 2022; 12(6): 1027—1059. <https://doi.org/10.3390/nano12061027>

11. Pendry J.B. Negative refraction makes a perfect lens. *Physical Review Letters*. 2000; 85(18): 3966—3969. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.3966>

12. Fedotov V.A., Rose M., Prosvirnin S.L., Papasimakis N., Zheludev N.I. Sharp trapped-mode resonances in

planar metamaterials with a broken structural symmetry. *Physical Review Letters*. 2007; 99(14): 147401—147406. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.147401>

13. Al-Badri K. Very high Q-factor based on G-shaped resonator type metamaterial absorber. *Ibn Al-Haitham Journal for Pure and Applied Science*. 2017 (IH-SCICONF). 2018: 160—168. <https://doi.org/10.30526/2017.IHSCICONF.1788>

14. Savinov V., Fedotov V.A., Anlage S.M., de Groot P.A.J., Zheludev N.I. Modulating sub-THz radiation with current in superconducting metamaterial. *Physical Review Letters*. 2012; 109(24): 243904—243909. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.243904>

15. Al-Naib I., Yang Y., Dignam M.M., Zhang W., Singh R. Ultra-high Q even eigenmode resonance in terahertz metamaterials. *Applied Physics Letters*. 2015; 106(1): 011102—011109. <https://doi.org/10.1063/1.4905478>

16. Vahala K.J. Optical microcavities. *Nature*. 2003; 424(6950): 839—846. <https://doi.org/10.1038/nature01939>

17. Savinov V., Tsiatmas A., Buckingham A.R., Fedotov V.A., de Groot P.A.J., Zheludev N.I. Flux exclusion superconducting quantum metamaterial. *Scientific Reports*. 2012; 2(1): 450—456. <https://doi.org/10.1038/srep00450>

18. Liu D., Yan Y. Investigations on a dual-frequency operation terahertz gyrotron. In: *OSA Technical Digest (online). The 8th Inter. symp. on ultrafast phenomena and terahertz waves. Chongqing, China. October 10–12, 2016*. Washington, DC, USA: Optica Publishing Group; 2016. <https://doi.org/10.1364/ISUPTW.2016.IW2A.4>

19. Savinov V., Fedotov V.A., Anlage S.M., de Groot P.A.J., Zheludev N.I. Modulating sub-THz radiation with current in superconducting metamaterial. *Physical Review Letters*. 2012; 109(24): 243904—243909. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.243904>

20. Chen H., Padilla W.J., Zide O., Gossard A.C., Taylor A.J., Averitt R.D. Active terahertz metamaterial devices. *Nature*. 2006; 444: 597—600. <https://doi.org/10.1038/nature05343>

21. Srivastava Y.K., Manjappa M., Cong L., Krishnamoorthy H.N.S., Savinov V., Pitchappa P., Singh R. A superconducting dual-channel photonic switch. *Advanced Materials*. 2018; 30(29): e1801257. <https://doi.org/10.1002/adma.201801257>

22. Srivastava Y.K., Manjappa M., Krishnamoorthy N.S., Singh R. Accessing the high-Q dark plasmonic fano resonances in superconductor metasurfaces. *Ad-*

vanced Optical Materials. 2016; 4(11): 1875—1881. <https://doi.org/10.1002/adom.201600354>

23. Wang Y., Han Z., Du Y., Qin J. Ultrasensitive terahertz sensing with high-Q toroidal dipole resonance governed by bound states in the continuum in all-dielectric metasurface. *Nanophotonics*. 2021; 10(4): 1295—1307. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0582>

24. Strikwerda A., Tao H., Kadlec E.A., Fan K., Padilla W., Zhang X., Shaner E.A., Averitt R. Metamaterial based terahertz detector. In: *OSA Technical Digest (online). Conf. on lasers and electro-optics 2011 (CLEO 2011). May 1–6, 2011. Baltimore, MD, USA*. Washington, DC, USA: Optica Publishing Group; 2011. <https://doi.org/10.1364/QELS.2011.QTuD6>

25. Feldman Y., Puzenko A., Ishai P.B., Caduff A., Agranat A.J. Human skin as arrays of helical antennas in the millimeter and submillimeter wave range. *Physical Review Letters*. 2008; 100(12): 128102—128107. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.128102>

26. Park G.-S., Kim Y.H., Han H., Han J.K., Ahn J., Son J.-H., Park W.-Y., Jeong Y.U., eds. Convergence of terahertz sciences in biomedical systems. Springer Dordrecht; 2012. 435 p.

27. Alves F., Pimental L., Grbovic D., Karunasiri G. MEMS terahertz-to-infrared band converter using frequency selective planar metamaterial. *Scientific Reports*. 2018; 8(1): 12466—12480. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30858-z>

28. Bilgin H., Zahertar S., Sadeghzadeh S., Yalcinkaya A.D., Torun H. A MEMS-based terahertz detector with metamaterialbased absorber and optical interferometric readout. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2016; 244: 292—298. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.04.021>

29. Landy N.I., Sajuyigbe S., Mock J.J., Smith D.R., Padilla W.J. Perfect metamaterial absorber. *Physical Review Letters*. 2008; 100(20): 207402—207409. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.207402>

30. Askerzade I. Physical properties of unconventional superconductors. In: *Unconventional superconductors. Springer series in materials science*. Berlin, Heidelberg:

Springer; 2012. Vol. 153. P. 1—26. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22652-6_1

31. Tao H., Bingham C.M., Strikwerda A.C., Pilon D., Shrekenhamer D., Landy N.I., Fan K., Zhang X., Padilla W.J., Averitt R.D. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: design, fabrication, and characterization. *Physical Review B. Condensed Matter*. 2008; 78: 241103 (R). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.78.241103>

32. Munk B.A. Frequency selective surfaces: Theory and design. Wiley; 2000. 440 p.

33. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Frequency-selective surfaces. Main Applications. *Radioengineering*. 2005; (9(100)): 4—12. (In Russ.)

34. Voytsehovskiy A.V., Nesmelov S.N., Kulchitskiy N.A., Melnikov A.A., Maltsev P.P. Detection in terahertz range. *Nano- and Microsystems Technology*. 2012; (2(139)): 28—35. (In Russ.)

35. Pocket practical guide to thermography. Testo AG; 2018. 56 p. (In Russ.). URL: https://domikelectrica.ru/wp-content/uploads/2018/11/Testo_Prakticheskoe_rukovodstvo_po_termografii.pdf

36. Hao Y., Mittra R. FDTD modeling of metamaterials: Theory and applications. Boston; London: Artech House Publishers; 2009. 33 p.

37. Adamchuk Yu.O., Boguslavskii Yu.O., Boguslavskii L.Z., Sinchuk A.V. Deposition of carbon nanostructured coatings on metal surfaces by electric discharge method in a hydrocarbon medium. *Elektronnaya obrabotka materialov = Electronic Processing of Materials*. 2017; 53(6): 1—7. (In Russ.). <https://doi.org/10.5281/zenodo.1051302>

38. Mayanov E.P., Elizarov P.G., Beilina N.Yu., Bubnenkov I.A., Kolesnikov S.A., Protchenko A.N., Firsova T.D., eds. The research institute of structural materials based on graphite is 55 years old. Moscow: Nauchnye tekhnologii; 2015. 246 p. (In Russ.)

39. Brazhe R.A., Kochaev A.I., Meftakhutdinov R.M. Graphenes and their physical properties. Ulyanovsk: ULGTU; 2016. 139 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Саблук Андрей Викторович — аспирант кафедры теоретической физики и квантовых технологий, инженер научного проекта лаборатории «Сверхпроводящие метаматериалы», Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6853-8913>; e-mail: sablukandrey@gmail.com

Башарин Алексей Андреевич — канд. техн. наук, доцент кафедры теоретической физики и квантовых технологий, старший научный сотрудник лаборатории «Сверхпроводящие метаматериалы», Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0851-5642>, e-mail: alexey.basharin@gmail.com

Andrey V. Sabluk — Postgraduate Student, Department of Theoretical Physics and Quantum Technologies, Engineer of the Scientific Project of the Laboratory “Superconducting Metamaterials”, National University of Science and Technology MISIS, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6853-8913>; e-mail: sablukandrey@gmail.com

Alexey A. Basharin — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Theoretical Physics and Quantum Technologies, Senior Researcher, Laboratory of Superconducting Metamaterials, National University of Science and Technology MISIS, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0851-5642>, e-mail: alexey.basharin@gmail.com

Поступила в редакцию 24.10.2022; поступила после доработки 28.11.2022; принята к публикации 22.12.2022
Received 24 October 2022; Revised 28 November 2022; Accepted 22 December 2022