

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-03-32-43

УДК 535.42, 53-155

Формирование геликоидального волнового фронта излучения в среднем инфракрасном диапазоне

Антон Сергеевич Бударин¹, Леонид Александрович Скворцов^{2✉},
Евгений Викторович Кузнецов³, Илья Владимирович Силантьев⁴,
Андрей Валерьевич Мяконьких⁵, Александр Юрьевич Павлов⁶,
Ринат Радифович Галиев⁷, Асия Радифовна Давлятшина⁸,
Александр Васильевич Аврамчук⁹, Рустам Анварович Хабибуллин¹⁰

^{1, 2, 3, 4}Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, Москва, Россия

^{1, 2}Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный Московской обл., Россия

⁵Физико-технический институт им. К.А. Валиева Российской академии наук, Москва, Россия

^{6, 7, 8, 9, 10}Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук, Москва, Россия

¹bereg@niipolyus.ru <https://orcid.org/0009-0008-3417-809X>

²lskvortsov@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-7504-4778>

³bereg@niipolyus.ru <https://orcid.org/0000-0002-5024-1932>

⁴bereg@niipolyus.ru <https://orcid.org/0009-0009-2947-2080>

⁵lukichev@ftian.ru <https://orcid.org/0000-0002-9547-1619>

⁶alexup@bk.ru <https://orcid.org/0009-0004-0643-2282>

⁷rgaliev@isvch.ru <https://orcid.org/0000-0001-8448-3203>

⁸isvch@isvch.ru <https://orcid.org/0009-0003-3747-4592>

⁹aavramchuck@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-6736-8550>

¹⁰khabibullin@isvch.ru <https://orcid.org/0000-0002-8414-7653>

Аннотация

Предмет исследования. Взаимодействие оптического излучения среднего инфракрасного диапазона с метаповерхностью на основе кремниевых рассеивающих элементов на подложке из сапфира и последующее его распространение в дальнем поле. **Цель работы.** Разработка дизайна метаповерхности, ее изготовление и формирование с ее помощью вихревого пучка с геликоидальным волновым фронтом в средневолновом инфракрасном диапазоне с измерением профиля интенсивности преобразованного излучения. **Метод.** Для расчета характеристик рассеяния излучения на элементе метаповерхности применен алгоритм Finite Difference Time Domain. Для анализа пространственного спектра излучения, полученного в результате прохождения плоской волны через пластину с выбранным дизайном, применен алгоритм динамического модового разложения. Для изготовления метаповерхности использовались методы плазменного химического осаждения из паровой фазы, электронно-лучевой литографии, термического испарения, атомно-слоевого осаждения, реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме, анизотропного криотравления. **Основные результаты.** Разработан дизайн метаповерхности для формирования лазерного пучка с геликоидальным волновым фронтом в средневолновом инфракрасном диапазоне. С помощью численного моделирования определены параметры кремниевых рассеивающих

элементов на сапфировой подложке. Исследованы эффективность и характеристики пространственного спектра сконструированной метаповерхности. Установлено, что энергетическая доля вторичных гармоник уменьшается с расстоянием вдоль распространения пучка. В результате проделанной работы в среднем инфракрасном диапазоне спектра экспериментально получен вихревой пучок, имеющий кольцевое распределение интенсивности в поперечном сечении. **Практическая значимость.** Созданная в процессе работы метаповерхность, включая процесс ее конструирования и технологию изготовления, может представлять потенциальный интерес для использования в атмосферных оптических линиях связи на базе квантово-каскадных лазеров среднего инфракрасного диапазона спектра с мультиплексированием ортогонально-пространственных мод.

Ключевые слова: геликоидальный волновой фронт, метаповерхность, фазовые пластины, пространственный спектр, средний инфракрасный диапазон спектра, пространственные фильтры, квантово-каскадные лазеры, атмосферные оптические линии связи

Ссылка для цитирования: Бударин А.С., Скворцов Л.А., Кузнецов Е.В., Силантьев И.В., Мяконьких А.В., Павлов А.Ю., Галиев Р.Р., Давлятшина А.Р., Аврамчук А.В., Хабибуллин Р.А. Формирование геликоидального волнового фронта излучения в среднем инфракрасном диапазоне // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 3. С. 32–43. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-03-32-43>

Коды OCIS: 140.0140, 160.3918

Formation and practical implementation of a helical wavefront of radiation in the mid-infrared range

ANTON S. BUDARIN¹, LEONID A. SKVORTSOV²✉, EVGENIY V. KUZNETSOV³,
ILYA V. SILANTYEV⁴, ANDREW V. MIAKONKIKH⁵, ALEKSANDR YU. PAVLOV⁶, RINAT R. GALIEV⁷,
ASIYA R. DAVLYATSHINA⁸, ALEXANDER V. AVRAMCHUK⁹, RUSTAM A. KHABIBULLIN¹⁰

^{1, 2, 3, 4}M.F. Stelmakh Polyus Research Institute, Moscow, Russia

^{1, 2}Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Moscow region, Russia

⁵A.K. Valiev Institute of Physics and Technology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^{6, 7, 8, 9, 10}V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹bereg@niipolyus.ru <https://orcid.org/0009-0008-3417-809X>

²iskvortsov@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-7504-4778>

³bereg@niipolyus.ru <https://orcid.org/0000-0002-5024-1932>

⁴bereg@niipolyus.ru <https://orcid.org/0009-0009-2947-2080>

⁵lukichev@ftian.ru <https://orcid.org/0000-0002-9547-1619>

⁶alexup@bk.ru <https://orcid.org/0009-0004-0643-2282>

⁷rgaliev@isvch.ru <https://orcid.org/0000-0001-8448-3203>

⁸isvch@isvch.ru <https://orcid.org/0009-0003-3747-4592>

⁹aavramchuck@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-6736-8550>

¹⁰khabibullin@isvch.ru <https://orcid.org/0000-0002-8414-7653>

Abstract

Subject of study. Interaction of mid-infrared light with a metasurface based on silicon scattering elements on a sapphire substrate and its subsequent propagation in the far field. **Aim of study.** Development of the metasurface design, its manufacture and formation with its help of a vortex beam with a helicoidal wavefront in the medium-wave infrared range with measurement of the intensity profile of the converted radiation. **Method.** The Finite Difference Time Domain algorithm is used to calculate the characteristics of radiation scattering on a metasurface element. An algorithm of dynamic mode decomposition was applied to analyze the spatial spectrum of radiation obtained as a result of the passage of a plane wave through a plate with the selected design. For the manufacture of the metasurface, the following methods were used: plasma chemical vapor deposition, electron

beam lithography, thermal evaporation, atomic layer deposition, reactive ion etching in inductively coupled plasma, anisotropic cryo etching. **Main results.** A metasurface design has been developed for the formation of a laser beam with a helicoidal wavefront in the medium-wave infrared range. The parameters of silicon scattering elements on a sapphire substrate have been determined using numerical modeling. The efficiency and characteristics of the spatial spectrum of the constructed metasurface are investigated. It is established that the energy fraction of the secondary harmonics decreases with the distance along the beam propagation. As a result of the work done, a vortex beam with an annular intensity distribution in the cross section was experimentally obtained in the middle IR range of the spectrum. **Practical significance.** The metasurface created in the course of work, including the process of its design and manufacturing technology, may be of potential interest for use in atmospheric optical communication lines based on quantum cascade lasers of the mid-infrared range of the spectrum with multiplexing orthogonal spatial modes.

Keywords: helicoidal wavefront, metasurfaces, phase plates, spatial spectrum, mid-infrared range of the spectrum, spatial filters, quantum cascade lasers, free space optics

For citation: Budarin A.S., Skvortsov L.A., Kuznetsov E.V., Silantsev I.V., Miakonkikh A.V., Pavlov A.Yu., Galiev R.R., Davlyatshina A.R., Avramchuk A.V., Khabibullin R.A. Formation and practical implementation of a helical wavefront of radiation in the mid-infrared range [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 3. P. 32–43. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-03-32-43>

OCIS codes: 140.0140, 160.3918

ВВЕДЕНИЕ

Вихревые лазерные пучки, несущие орбитальный угловой момент (ОУМ), являются объектами исследований важного направления в современной науке — сингулярной оптики. За более чем тридцатилетнюю историю этой области знаний опубликовано значительное число оригинальных статей, фундаментальных обзоров и монографий. Часть обзоров, опубликованных за последние годы, приведена в работах [1–6].

Как следует из приведенных в этом списке обзорных статей, большая их часть посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям, а также процессам моделирования поведения (распространения) и формирования вихревых лазерных пучков в видимом, ближнем и коротковолновом инфракрасном (ИК) диапазонах спектра. Очевидно, во многом это связано с вопросами применения вихревых пучков на практике. Уникальные физические свойства вихревых пучков открывают новые возможности или улучшают параметры в таких областях, как оптическая связь [7, 8], высокоточное манипулирование микрочастицами [9, 10], оптическая визуализация [12, 13], квантовые информационные технологии [14, 15], астрономия [16, 17], оптическое обнаружение [18, 19], медицинская диагностика [20, 21], и во многих других областях [6]. Кроме того, значительный интерес представляет

использование лазерных пучков с геликоидальным волновым фронтом в атмосферных оптических линиях связи (АОЛС) [22–26], что обусловлено ортогональностью между геликоидальными модами с различными топологическими зарядами. Мультиплексирование логических каналов с различными пространственными модами, отличающимися значениями орбитального углового момента, представляет собой относительно новый подход, позволяющий расширить пропускную способность физического канала связи в несколько раз.

Атмосферные оптические линии связи обладают одним существенным недостатком: надежность и устойчивость их работы во многом зависят от метеоусловий. В то же время влияние метеоусловий можно уменьшить, если в АОЛС используется лазерное излучение среднего ИК диапазона спектра [27]. Перспективными источниками излучения для применения их в АОЛС, работающих в среднем инфракрасном диапазоне, являются квантово-каскадные лазеры (ИК ККЛ), излучающие в области средне- и длинноволнового диапазонов ИК спектра (3,4–25 мкм) [27].

Вследствие значительно большей длины волны излучение в среднем ИК диапазоне, распространяясь в атмосфере, претерпевает существенно меньшие потери на рассеяние, чем в ближней и коротковолновой областях ИК спектра. В среднем ИК диапазоне атмосфера

имеет окна прозрачности, что позволяет излучению распространяться в них на большие расстояния без заметных потерь. Фактор длины волны делает излучение в среднем ИК диапазоне более устойчивым к возмущениям (турбулентности) в атмосфере по сравнению с излучением видимого или ближнего ИК диапазонов. С точки зрения потерь при наведении увеличение расходимости луча (λ/d , где λ — длина волны излучения, d — диаметр выходной апертуры) делает работу АОЛС в среднем ИК диапазоне более привлекательной, чем при использовании лазеров, работающих в ближнем и коротковолновом диапазонах ИК спектра [27].

Однако вплоть до последнего времени средневолновый ИК диапазон спектра оставался не востребованным для АОЛС. Во многом это объясняется отсутствием быстродействующей модуляции и широкополосных детекторов излучения. С появлением широкополосных фотоприемных устройств, таких как ИК детекторы на квантовых ямах и квантово-каскадные детекторы, ситуация изменилась. При комнатной температуре коммерческие ИК детекторы на квантовых ямах имеют электрическую полосу пропускания 70 ГГц по уровню 3 дБ, а квантово-каскадные детекторы — 25 ГГц [28, 29].

Что касается модуляции излучения ККЛ, то ранее использовалась только прямая (непосредственная) модуляция их излучения током накачки. Квантово-каскадный лазер представляет собой униполярное квантовое устройство, основанное на межподзонных переходах, в которых электроны релаксируют в свое основное состояние за несколько пикосекунд [30]. Эта особенность должна привести к электрической полосе пропускания в десятки гигагерц [31], но на практике имеющееся локальное затухание ухудшает частотную характеристику ККЛ [32]. Практически ширина полосы модуляции составляет несколько сотен мегагерц (320 МГц по уровню 3 дБ) [33]. Таким образом, прямая модуляция этих полупроводниковых лазеров отстает от быстродействия современных детекторов в среднем ИК диапазоне. Это объясняет, почему связь на основе ИК ККЛ до сих пор не получила широкого распространения для передачи сигналов на большие расстояния в свободном пространстве.

В то же время проблема, связанная с ограничением ширины полосы пропускания, карди-

нально решается путем применения устройств внешней модуляции. Внешние модуляторы являются одной из ключевых технологий, позволяющих преодолеть это ограничение. Усилия, направленные на изучение различных технологий, привели к появлению модуляторов излучения среднего ИК диапазона с полосой пропускания в диапазоне гигагерц [34–37]. Первое поколение униполярных внешних модуляторов, основанных на переходе между слабым и сильным режимами взаимодействия оптического излучения и вещества, продемонстрировали полосу пропускания 750 МГц, ограниченную скоростью дрейфового переноса, с глубиной модуляции 10% [38].

Применение широкополосного внешнего электрооптического модулятора [39] для среднего ИК диапазона на основе квантово-размерного эффекта Штарка [40] увеличило дальность передачи до 31 м при рекордной скорости передачи, составившей 30 Гбит/с при 7% исправлений прямых погрешностей (прямая коррекция погрешностей) с использованием двоичной двухпозиционной манипуляции и 40 Гбит/с при 27% исправлений прямых ошибок с использованием четырехуровневой импульсной амплитудной модуляции. Полученный в работе [41] результат дает основания надеяться на скорое широкомасштабное внедрение ИК ККЛ в телекоммуникационные приложения.

Дальнейшее увеличение пропускной способности АОЛС связано с использованием вихревых пучков, поскольку коаксиально распространяющиеся лучи ОУМ с различными азимутальными состояниями взаимно ортогональны, перекрестные помехи между лучами могут быть сведены к минимуму, и лучи могут быть эффективно мультиплексированы и демultipлексированы. В результате несколько состояний ОУМ можно было бы использовать в качестве различных несущих для мультиплексирования и передачи нескольких потоков данных, тем самым потенциально увеличивая пропускную способность системы [42]. Однако для среднего ИК диапазона до последнего времени отсутствовали материалы, которые могли бы служить пространственными фильтрами для формирования вихревых пучков.

Существенным прорывом в этом направлении явилось появление метаповерхностей на основе кремния и прозрачной в ИК области

подложки (например из сапфира), дизайн которых позволял их применение в среднем ИК диапазоне. Одной из первых работ, в которой были применены метаповерхности в среднем ИК диапазоне, вероятно, являлась работа F. Capasso [43], в которой была создана плоская оптика с дизайнерскими метаповерхностями. Формированию оптических вихрей с помощью метаповерхностей также посвящено значительное количество оригинальных публикаций [44–46].

Диэлектрическая метаповерхность состоит из множества рассеивающих элементов, расположенных на плоской подложке, каждый из которых может быть рассмотрен как низкодобротный резонатор Фабри–Перо.

Диэлектрические наноантенны (наноцилиндры) с высоким показателем преломления, поддерживающие мультипольные резонансы Ми, представляют собой новый тип структурных элементов метаматериалов для генерации, управления и модуляции излучения. Комбинируя как электрические, так и магнитные мультипольные моды, можно не только изменять диаграммы направленности излучения в дальней зоне, но также локализовать энергию в открытых резонаторах [47].

Так как в элементах возникает множество резонансов, даже малые изменения параметров элемента сильно влияют на интенсивность рассеяния. Использование рассеяния Ми в дизайне поверхности позволяет изменять фазу проходящей волны в полном диапазоне от 0 до 2π при незначительных изменениях параметров элементов. Таким образом, метаповерхности являются гибким инструментом для управления волновым фронтом излучения.

Целью настоящей работы является создание эффективного дизайна метаповерхности для формирования лазерного пучка с геликоидальным волновым фронтом в среднем ИК диапазоне, изготовление метаповерхности и регистрация вихревого пучка в средневолновом диапазоне ИК спектра с измерением профиля интенсивности преобразованного излучения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ

При разработке дизайна в качестве основных элементов метаповерхности использовались наноцилиндры. Цилиндры обладают осевой

симметрией, в результате чего итоговая фазовая пластина была поляризована инвариантно для падающего лазерного пучка.

В качестве материала подложки был выбран сапфир (Al_2O_3) из-за его прозрачности в среднем ИК диапазоне. Материалом цилиндра служил поликристаллический кремний ввиду его доступности и высокого показателя преломления в среднем диапазоне ИК спектра.

Электромагнитные отклики цилиндров в диапазоне длин волн 4,0–5,0 мкм моделировались методом конечных разностей во временной области [48]. Конечно-разностный метод во временной области — это метод численного анализа для моделирования вычислительной электродинамики, например, нахождения приближенных решений соответствующей системы дифференциальных уравнений. Основная идея метода состоит в том, чтобы сделать дифференциальное приближение оператора «ротор» (rot) в уравнениях Максвелла

$$\partial \mathbf{H} / \partial t = -1/\mu (\nabla \times \mathbf{E} + \rho \mathbf{H}),$$

$$\partial \mathbf{E} / \partial t = -1/\varepsilon (\nabla \times \mathbf{H} - \sigma \mathbf{E}),$$

где μ — магнитная проницаемость, ε — диэлектрическая проницаемость, ρ — магнитосопротивление, а σ — проводимость. \mathbf{E} — вектор напряженности электрического поля, \mathbf{H} — вектор напряженности магнитного поля. Затем можно рассчитать отклик материалов во временной области под воздействием электромагнитных импульсов, как показано в работах [47–52].

В качестве иллюстрации для возможности практической реализации моделирования структуры с наименьшим использованием вычислительных ресурсов в работе была рассмотрена квадратная ячейка, содержащая один цилиндр и подложку (рис. 1).

При моделировании распространения электромагнитного поля в случае различия параметров соседних элементов можно пренебречь эффектами связи между ними [49, 53]. Из-за высокого контраста показателя преломления между цилиндрами и их окружением цилиндры ведут себя как независимые рассеиватели с небольшой перекрестной связью [54]. Варьируемыми параметрами в задаче являлись высота и диаметр цилиндра, а также период их чередования на подложке.

В то же время введение на боковых гранях ячейки периодических граничных условий позволяет сэкономить вычислительные ресурсы.

Действительные части значений показателей преломления веществ были получены методом эллипсометрии. Длина волны излучения ИК ККЛ измерялась с помощью монохроматора и равнялась 4,72 мкм.

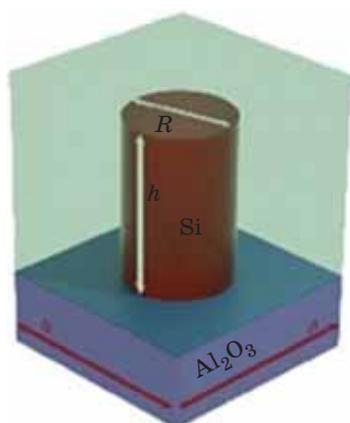


Рис. 1. Схема ячейки для симуляции рассеяния
Fig. 1. Diagram of a cell for simulation of scattering

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При использовании цилиндров для рассеяния оптического излучения реализация пластины с непрерывным геликоидальным фазовым профилем затруднена в связи с технологическими особенностями изготовления. Поэтому на практике при разработке поляризационно-инвариантных метаповерхностей применяется ступенчатый фазовый профиль.

Метаповерхность состоит из секторов, каждый из которых осуществляет соответствующий фазовый сдвиг. Каждый сектор состоит из элементов одного диаметра. Эффективность преобразования такой ступенчатой пластины рассчитывается аналитически [55]. В случае пластины с восемью секторами она составляет 88,4%. Фазовые профили излучения, создаваемого такими пластинами, представлены на рис. 2.

Для анализа пространственного спектра излучения в работе использовался анализ Фурье азимутальной компоненты поля. Расстояние между соседними компонентами спектра пропорционально общему числу секторов пластины. При распространении излучения доля

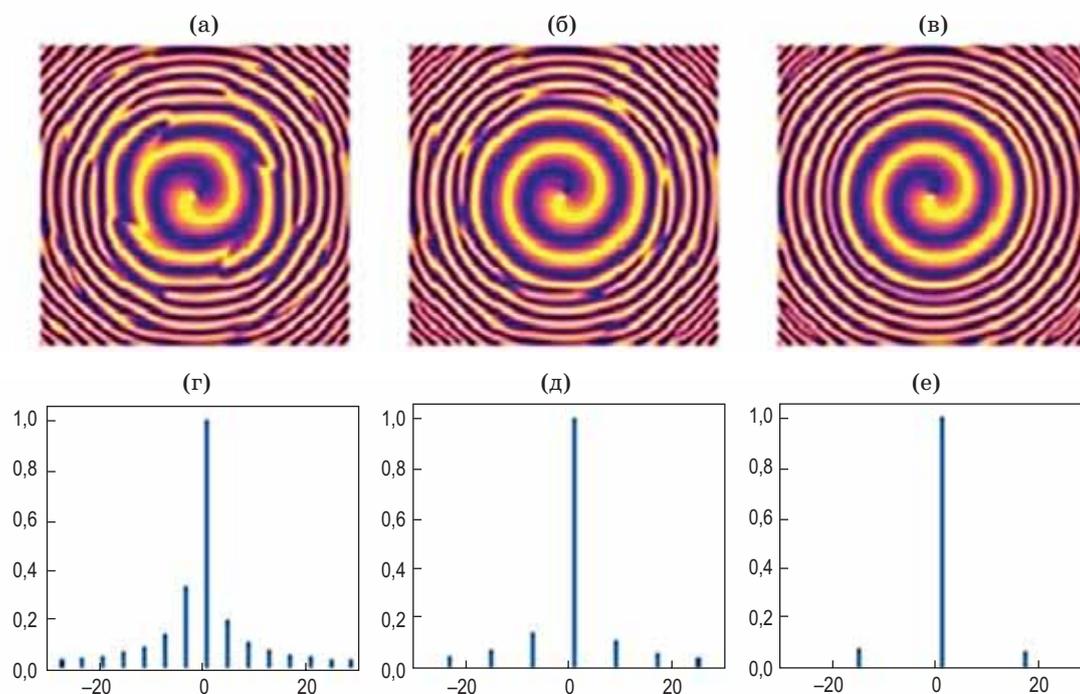


Рис. 2. Фазовые профили излучения пластин с различным числом секторов n (а–в) и их пространственные спектры в дальнем поле (г–е). $n = 4$ — (а), (г), $n = 8$ — (б), (д), $n = 16$ — (в), (е)

Fig. 2. (а–в) Phase profiles of radiation for plates with a different number of sectors n , (г–е) their spatial spectra in the far field. (а), (г) $n = 4$, (б), (д) $n = 8$, (в), (е) $n = 16$

вторичных гармоник уменьшается с расстоянием вдоль распространения пучка (рис. 3). Энергетический модовый состав излучения получен методом динамического модового разложения [56] фазового профиля в дальнем поле после прохождения фазовой пластины.

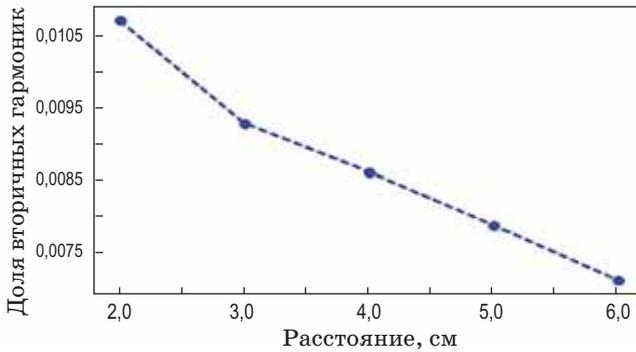


Рис. 3. Доля вторичных гармоник в зависимости от расстояния вдоль пучка

Fig. 3. The part of secondary harmonics depending on the distance along the beam

Убывание «паразитных гармоник» обусловлено тем, что сформированные вихревые моды высших порядков дифрагируют быстрее и обладают более широкой областью низкой интенсивности на оси пучка. Вихревые моды более высоких порядков могут просто не попадать в область расчетов.

Результаты вычислений амплитудных и фазовых характеристик рассеяния можно представить в виде фазовых карт, представляющих зависимости коэффициента пропускания и фазы от периода структуры и коэффициента заполнения (рис. 4а, б). Коэффициент заполнения представляет собой отношение ширины цилиндра к периоду структуры. Исходя из полученных данных, для формирования метаповерхности высота цилиндров равна 2,82 мкм, а период их чередования — 1,96 мкм. Выбор периода и высоты обусловлен полным покрытием фазы от 0 до 2π , а также пропусканием не ниже 90% (рис. 4в, г). Диаметры цилиндров для необходимых фазовых сдвигов представлены в таблице.

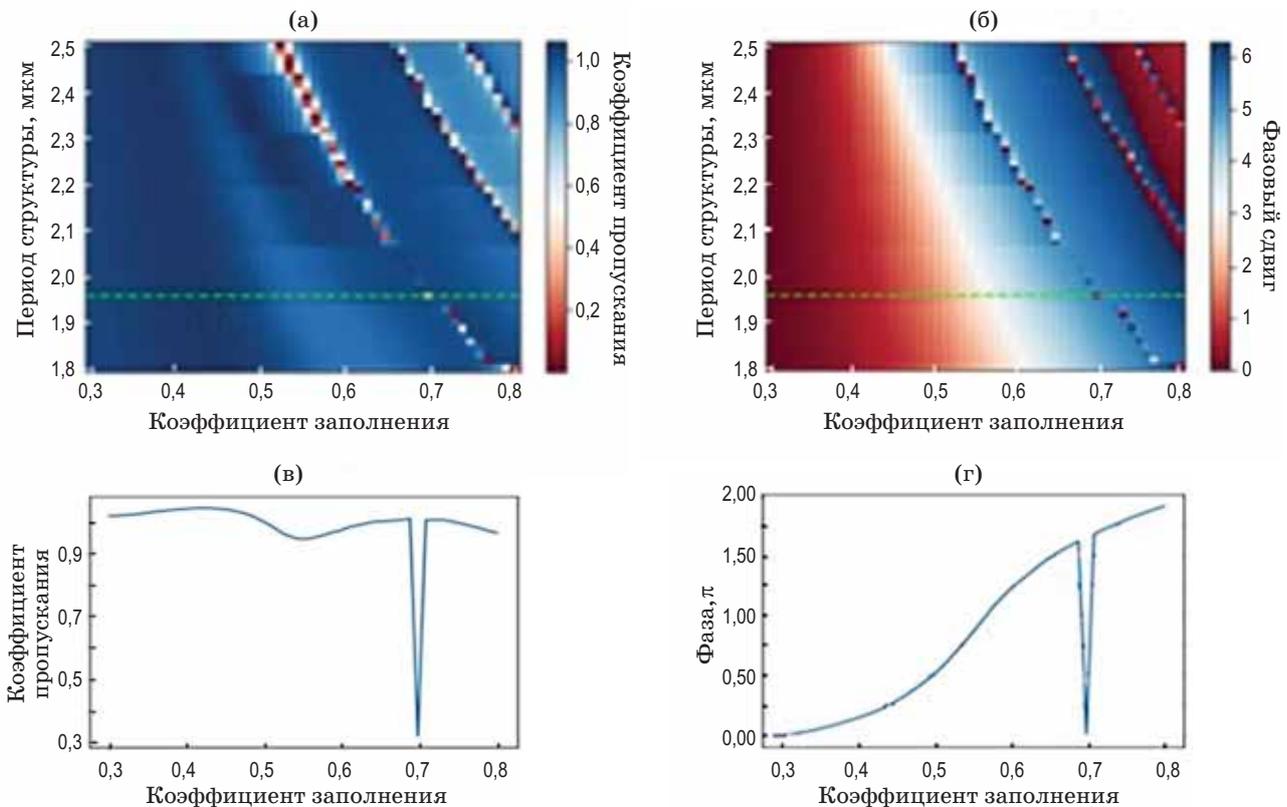


Рис. 4. Фазовые карты (а, б) пропускания и фазы соответственно (зеленым на (а, б) помечен срез, соответствующий выбранному периоду структуры). (в) – пропускание, (г) – фаза вдоль выбранной на фазовых картах (а, б) линии среза

Fig. 4. (а, б) Phase maps for transmission and phase, respectively (green in (а, б) marks the slice corresponding to the selected period of the structure). (в) Transmission, (г) phase along the cut line selected on the phase maps (а, б)

Диаметры цилиндров для соответствующих фазовых сдвигов
Cylinder diameters for corresponding phase shifts

Фазовый сдвиг	0	$\pi/8$	$\pi/4$	$3\pi/8$	$\pi/2$	$5\pi/8$	$3\pi/4$	$7\pi/8$
Диаметр цилиндра, нм	587	860	972	1047	1110	1183	1282	1435

Используя выбранные значения диаметров цилиндров, был разработан дизайн метаповерхности для дальнейшего изготовления.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Общие положения

Фазовая пластина состоит из массива кремниевых столбиков (цилиндров) разного диаметра, расположенных в виде квадратной решетки (рис. 5).

Столбики располагаются на сапфировой подложке. Каждый из кремниевых столбиков можно рассматривать как короткий волновод с круглым поперечным сечением, усеченный с обеих сторон. Такой волновод функционирует как резонатор с низким коэффициентом добротности. Круглое сечение столбиков обуславливает поляризационную инвариантность пластины. Благодаря высокой разнице показателей преломления между столбиками и окружающей средой столбики ведут себя как независимые центры рассеяния с малыми эффектами связи между соседними элементами [52, 54]. Фаза и амплитуда рассеянного

излучения, как известно [54], зависят от диаметра, высоты и периода чередования столбиков. Параметры столбиков были получены с помощью симуляций прохождения плоской волны через ячейку, содержащую подложку и единичный рассеивающий элемент. На границах ячейки были заданы периодические граничные условия [55].

Изготовление

Столбчатые структуры на поверхности сапфира получены анизотропным криотравлением кремния по жесткой маске оксида алюминия. В качестве подложки использовалась пластина оптически полированного сапфира, на которую методом плазменного осаждения из химической паровой фазы осаждалась пленка α -Si:H толщиной около 2,7 мкм. Оксид алюминия толщиной 20 нм наносился методом атомно-слоевого осаждения. Для формирования рисунка в позитивном резисте AR-P6200 использовался метод электронно-лучевой литографии (50 кВ, установка *Raith Voyager*). При этом для устранения эффектов зарядки образца резист сверху был запылен тонким слоем алюминия, который удалялся в щелочном растворе непосредственно перед проявлением. Далее рисунок переносился в оксид алюминия на установке плазмохимического травления в индуктивно-связанной плазме (*Sentech SI500*) в смеси BCl_3 с аргоном. Плазмо-химическое осаждение кремния осуществлялось на установке *Oxford PlasmaLab 100* в смеси SF_6 и кислорода при температуре -110°C , благодаря чему боковые стенки областей травления пассивируются соединениями кремния и кислорода и создают условия для анизотропии процесса. Параметры травления были предварительно подобраны на объемных монокристаллических образцах кремния и затем дополнительно исследованы на экспериментальных образцах кремния на сапфире.

Для изготовленной поверхности был измерен профиль интенсивности преобразован-

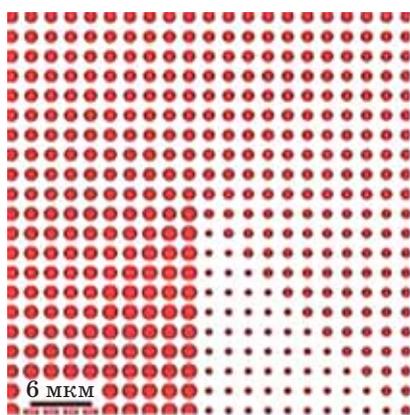


Рис. 5. Дизайн сконструированной метаповерхности для формирования геликоидального волнового фронта

Fig. 5. Design of the constructed metasurface for the formation of a helicoidal wavefront

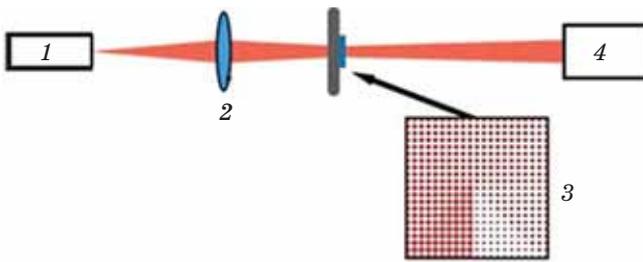


Рис. 6. Схема измерения профиля интенсивности вихревого пучка. 1 — ККЛ, 2 — линза из ZnSe, 3 — метаповерхность, 4 — ИК камера

Fig. 6. Scheme for measuring the intensity profile of a vortex beam. (1) Quantum cascade laser, (2) ZnSe lens, (3) metasurface, (4) infrared camera

ного излучения. На рис. 6 приведена схема установки для измерения сечения интенсивности пучка в плоскости, перпендикулярной направлению распространения излучения.

Для генерации излучения с длиной волны 4,72 мкм был использован одномодовый ККЛ (*Alpes Lasers*). Фокусировка лазерного излучения на площадку метаповерхности осуществлялась линзой из ZnSe с фокусным расстоянием 10 см. Принципиальным моментом являлась юстировка, которая проводилась с помощью микрометрических винтов. Для измерения профиля интенсивности использовалась ИК камера *Swiss Terahertz RIGI MIR M2*.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В результате проведенного эксперимента был получен вихревой пучок, который имеет кольцевое распределение интенсивности в поперечном сечении (рис. 7). Темная область в центре соответствует фазовой сингулярности.

На графике среза через центр пучка (рис. 8) можно видеть провал в центре. Кольцевой профиль интенсивности соответствует профилю вихревого пучка. Неоднородности в профиле, наиболее вероятно, вызваны высокой расходимостью лазерного излучения, а также многомодовой структурой его спектра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы впервые была решена комплексная задача, связанная с разработкой дизайна метаповерхности для формирования излучения с геликоидаль-

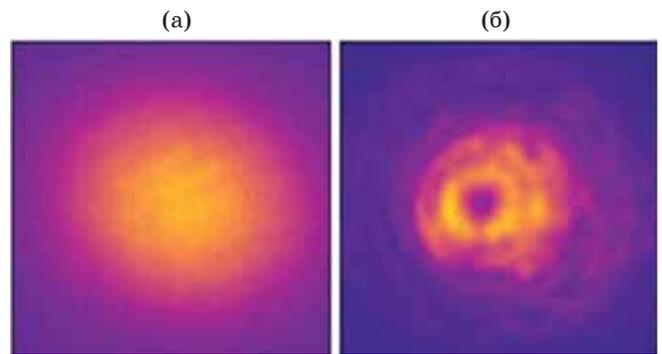


Рис. 7. Профили пучка без метаповерхности (а) и с метаповерхностью (б)

Fig. 7. Beam profiles (a) without a metasurface and (b) with a metasurface

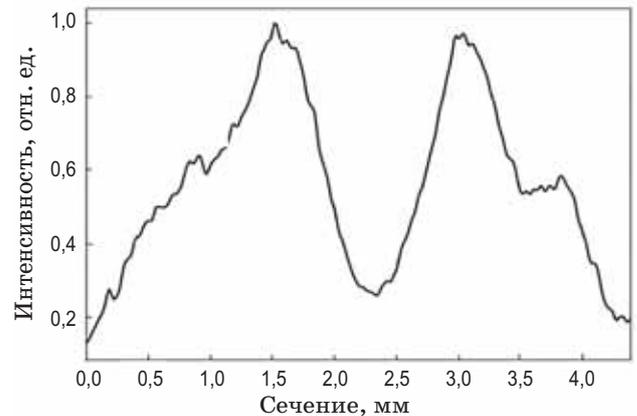


Рис. 8. Срез сечения интенсивности пучка в его центре

Fig. 8. Slice of the beam intensity cross section at its center

ным волновым фронтом в средневолновом диапазоне ИК спектра, расчетом пространственно-спектральных характеристик преобразованного излучения и изготовлением метаповерхности для практической реализации поставленной задачи. Также измерен профиль интенсивности преобразованного излучения с характерным провалом в центре пучка. Путем изменения условий задачи изготовленная метаповерхность формирует вихревой пучок с заданными параметрами. Полученные результаты позволяют надеяться на то, что существует возможность применения подобных фазовых пластин в АОЛС на базе ИК ККЛ с мультиплексированием ортогонально-пространственных мод.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bliokh K.Y., Karimi E., Padgett M.J., et al. Roadmap on structured waves // *J. Opt.* 2023. V. 25. № 10. P. 103001. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/acea92>
2. Rubinsztein-Dunlop H., Forbes A., Berry M.V., et al. Roadmap on structured light // *J. Opt.* 2016. V. 19. № 1. P. 013001. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/19/1/013001>
3. Forbes A., de Oliveira M., & Dennis M.R. Structured light // *Nature Photonics*. 2021. V. 15. № 4. P. 253–262. <https://doi.org/10.1038/s41566-021-00780-4>
4. Petrov N.V., Sokolenko B., Kulya M.S., et al. Design of broadband terahertz vector and vortex beams: I. Review of materials and components // *Light Adv. Manuf.* 2022. V. 1. № 4. P. 1. <https://doi.org/10.37188/lam.2022.043>
5. Soifer V.A., Korotkova O., Khonina S.N., et al. Vortex beams in turbulent media: Review // *Comput. Opt.* 2016. V. 40. № 5. P. 605–624. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624>
6. Shen Y., Wang X., Xie Z., et al. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities // *Light: Sci. Appl.* 2019. V. 8. № 1. P. 90. <https://doi.org/10.1038/s41377-019-0194-2>
7. Zhu F., Huang S., Shao W., et al. Free-space optical communication link using perfect vortex beams carrying orbital angular momentum (OAM) // *Opt. Commun.* 2017. V. 396. P. 50. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.03.023>
8. Shao W., Huang S., Liu X., et al. Free-space optical communication with perfect optical vortex beams multiplexing // *Opt. Commun.* 2018. V. 427. P. 545. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2018.06.079>
9. Padgett M. and Bowman R. Tweezers with a twist // *Nat. Photonics*. 2011. V. 1. № 5. P. 343. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.06.079>
10. Yang Y., Ren Y., Chen M., et al. Optical trapping with structured light: A review // *Adv. Photonics*. 2021. V. 3. № 3. P. 03400. <https://doi.org/10.1117/1.AP.3.3.034001>
11. Otte E., Denz C. Optical trapping gets structure: Structured light for advanced optical manipulation // *Appl. Phys. Rev.* 2020. V. 7. № 4. P. 041308. <https://doi.org/10.1063/5.0013276>
12. Qiu X., Li F., Zhang W., et al. Spiral phase contrast imaging in nonlinear optics: Seeing phase objects using invisible illumination // *Optica*. 2018. V. 5. № 2. P. 208. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.000208>
13. Tamburini F., Anzolin G., Umbriaco G., et al. Overcoming the Rayleigh criterion limit with optical vortices // *Phys. Rev. Lett.* 2006. V. 97. № 16. P. 163903. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.163903>
14. Nicolas A., Veissier L., Giner L., et al. A quantum memory for orbital angular momentum photonic qubits // *Nature Photonics*. 2014. V. 8. № 3. P. 234. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.355>
15. Vallone G., D'Ambrosio V., Sponselli A., et al. Free-space quantum key distribution by rotation-invariant twisted photons // *Phys. Rev. Lett.* 2014. V. 113. № 6. P. 060503. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.060503>
16. Aleksanyan A., Kravets N., Brasselet E. Multiple-star system adaptive vortex coronagraphy using a liquid crystal light valve // *Phys. Rev. Lett.* 2017. V. 118. № 20. P. 203902. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.203902>
17. Berkhout G., Beijersbergen M. Method for probing the orbital angular momentum of optical vortices in electromagnetic waves from astronomical objects // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 101. № 10. P. 100801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.100801>
18. Lavery M., Speirits F., Barnett S.M., et al. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum // *Science*. 2013. V. 34. № 6145. P. 537. <https://doi.org/10.1126/science.1239936>
19. Kim I., Martins R., Jang J., et al. Nanophotonics for light detection and ranging technology // *Nature Nanotechnol.* 2021. V. 16. № 5. P. 508. <https://doi.org/10.1038/s41565-021-00895-3>
20. Gianani I., Suprano A., Giordani T., et al. Transmission of vector vortex beams in dispersive media // *Advanced Photonics*. 2020. V. 2. № 3. P. 036003. <https://doi.org/10.1117/1.AP.2.3.036003>
21. Biton N., Kupferman J., Arnon S. OAM light propagation through tissue // *Sci. Rep.* 2021. V. 11. № 1. P. 2407. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82033-6>
22. Wang J. Advances in communications using optical vortices // *Photonics Res.* 2016. V. 4. № 5. P. B14. <https://doi.org/10.1364/PRJ.4.000B14>
23. Zhu Z., Janasik M., Fyffe A., et al. Compensation-free high-dimensional free-space optical communication using turbulence-resilient vector beams // *Nature Commun.* 2021. V. 12. № 1. P. 1666. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21793-1>
24. Wang J., Liu J., Li S., et al. Orbital angular momentum and beyond in free-space optical communications // *Nanophotonics*. 2021. V. 11. № 4. P. 645. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0527>
25. He C., Shen Y., Forbes A. Towards higher-dimensional structured light // *Light: Sci. Appl.* 2022. V. 11. № 1. P. 205. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00897-3>
26. Willner A., Ren Y., Xie G., et al. Recent advances in high-capacity free-space optical and radio-frequency communications using orbital angular momentum multiplexing // *Philosoph. Trans. of the Royal Soc. A: Mathematical, Physical and Engineering Sci.* 2017. V. 375. № 2087. P. 20150439. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0439>
27. Абрамов П.И., Бударин А.С., Кузнецов Е.В. и др. Квантово-каскадные лазеры в атмосферных оптических линиях связи: проблемы и перспективы // *ЖПС*. 2020. Т. 87. № 4. С. 515. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-04-515-539>
Abramov P., Budarin A., Kuznetsov E., et al. Quantum-cascade lasers in atmospheric optical communication lines: Challenges and prospects // *J. Appl. Spectrosc.* 2020. V. 87. № 4. P. 579. <https://doi.org/10.1007/s10812-020-01041-y>
28. Haki M., Lin Q., Lepillet S., et al. Ultrafast quantum-well photodetectors operating at 10 μm with a flat frequency response up to 70 GHz at room temperature // *ACS Photonics*. 2021. V. 8. № 2. P. 464. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.0c01299>
29. Quinard G., Mismar C., Haki M., et al. High speed, antenna-enhanced 10.3 μm quantum cascade detector // *Appl. Phys. Lett.* 2022. V. 120. № 9. P. 091108. <https://doi.org/10.1063/5.0078861>
30. Ferreira R. and Bastard G. Evaluation of some scattering times for electrons in unbiased and biased single- and multiple-quantum-well structures // *Phys. Rev. B*. 1989. V. 40. P. 1074. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.40.1074>
31. Meng B. and Wang Q.J. Theoretical investigation of injection-locked high modulation bandwidth quantum

- cascade lasers // *Opt. Exp.* 2012. V. 20. № 2. P. 1450. <https://doi.org/10.1364/OE.20.001450>
32. Calvar A., Amanti M.I., Renaudat St-Jean, et al. High frequency modulation of mid-infrared quantum cascade lasers embedded into microstrip line // *Appl. Phys. Lett.* 2013. V. 102. № 18. P. 181114. <https://doi.org/10.1063/1.4804370>
 33. Pang X., Dely H., Schatz R., et al. 11 Gb/s LWIR FSO transmission at 9.6 μm using a directly-modulated quantum cascade laser and an uncooled quantum cascade detector // *Opt. Fiber Commun. Conf. and Exhibition (OFC), IEEE.* 2022. P. 1. <https://doi.org/10.1364/OFC.2022.Th4B.5>
 34. Yao Y., Shankar R., Kats M.A., et al. Electrically tunable metasurface perfect absorbers for ultrathin mid-infrared optical modulators // *Nano Lett.* 2014. V. 14. № 11. P. 6526–6532. <https://doi.org/10.1021/nl503104n>
 35. Zeng B., Huang Z., Singh A., et al. Hybrid graphene metasurfaces for high-speed mid-infrared light modulation and single-pixel imaging // *Light: Sci. Appl.* 2018. V. 7. № 1. P. 51. <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0055-4>
 36. Liang G., Yu X., Hu X., et al. Mid-infrared photonics and optoelectronics in 2D materials // *Mater. Today.* 2021. V. 51. P. 294. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.09.021>
 37. Montesinos-Ballester M., Deniel L., Koompai N., et al. Mid-infrared integrated electrooptic modulator operating up to 225 MHz between 6.4 and 10.7 μm wavelength // *ACS Photonics.* 2022. V. 9. № 1. P. 249. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.1c01449>
 38. Pirotta S., Tran, N.L., Jollivet A., et al. Fast amplitude modulation up to 1.5 GHz of mid-IR free-space beams at room-temperature // *Nat. Commun.* 2021. V. 12. P. 799. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20710-2>
 39. Dely H., Bonazzi T., Spitz O., et al. 10 Gbit s^{-1} free space data transmission at 9 μm wavelength with unipolar quantum optoelectronics // *Laser Photonics Rev.* 2022. V. 16. № 2. P. 2100414. <https://doi.org/10.1002/lpor.202100414>
 40. Capasso F., Sirtori C., and Cho A.Y. Coupled quantum well semiconductors with giant electric field tunable nonlinear optical properties in the infrared // *IEEE J. Quantum Electron.* 1994. V. 30. № 5. P. 1313. <https://doi.org/10.1109/3.303697>
 41. Didier P., Dely H., Bonazzi T., et al. High-capacity free-space optical link in the midinfrared thermal atmospheric windows using unipolar quantum devices // *Advanced Photonics.* 2022. V. 4(5). P. 056004. <https://doi.org/10.11171.AP.4.5.056004>
 42. Wang J., Yang J.Y., Fazal I., et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing // *Nature Photonics.* 2012. V. 6. № 7. P. 488. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.138>
 43. Yu N., Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces // *Nature Materials.* 2014. V. 13. P. 139. <https://doi.org/10.1038/nmat3839>
 44. Ahmed H., Kim H., Zhang Y., et al. Optical metasurfaces for generating and manipulating optical vortex beams // *Nanophotonics.* 2022. V. 11. № 5. P. 941. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0746>
 45. Achouri K., Khan B.A., Gupta S., et al. Synthesis of electromagnetic metasurfaces: Principles and illustrations // arXiv preprint. 2015. arXiv: 1510.05997. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1510.05997>
 46. Zhu L., Wang J. A review of multiple optical vortices generation: Methods and applications // *Frontiers of Optoelectronics.* 2019. V. 12. P. 52–68. <https://doi.org/10.1007/s12200-019-0910-9>
 47. Тонкаев П., Кившарь Ю.С. Высокодобротные диэлектрические Ми-резонансные наноструктуры (мини-обзор) // *Письма в ЖЭТФ.* 2020. Т. 112. № 10. С. 658. <https://doi.org/10.31857/S123456782022005X>
 48. Tonkaev P., & Kivshar Y. High-Q dielectric mie-resonant nanostructures (brief review) // *JETP Letters.* 2020. V. 112. № 10. P. 615. <https://doi.org/10.1134/S0021364020220038>
 49. Yee K.S., Chen J.S. The finite-difference time-domain (FDTD) and the finite-volume time-domain (FVTD) methods in solving Maxwell's equations // *IEEE Trans. Antennas and Propagation.* 1997. V. 45. № 3. P. 354. <https://doi.org/10.1109/8.558651>
 50. Hu Y., Zhou Q., Fang X., et al. FDTD simulations of modulated metasurfaces with arbitrarily shaped meta-atoms by surface impedance boundary condition // *Appl. Computational Electromagnetics Soc. J. (ACES).* 2021. P. 1509. <https://doi.org/10.13052/2021.ACES.J.361201>
 51. Sun S., He Q., Hao J., et al. Electromagnetic metasurfaces: Physics and applications // *Advances in Optics and Photonics.* 2019. V. 11. № 2. P. 380. <https://doi.org/10.1364/AOP.11.000380>
 52. Yee K.S., Chen J.S. The finite-difference time-domain (FDTD) and the finite-volume time-domain (FVTD) methods in solving Maxwell's equations // *IEEE Trans. Antennas and Propagation.* 1997. V. 45. № 3. P. 354. <https://doi.org/10.1109/8.558651>
 53. Li X., Fan Z. Controlling dispersion characteristic of focused vortex beam generation // *Photonics.* 2022. V. 9. № 3. P. 179. <https://doi.org/10.3390/photonics9030179>
 54. Jahani S., Jacob Z. All-dielectric metamaterials // *Nature Nanotechnol.* 2016. V. 11. № 1. P. 23. <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.304>
 55. Arbabi A., Briggs R.M., Horie Y., et al. Efficient dielectric metasurface collimating lenses for mid-infrared quantum cascade lasers // *Opt. Exp.* 2015. V. 23. № 26. P. 33310. <https://doi.org/10.1364/OE.23.033310>
 56. Vahabzadeh Y., Chamanara N., Achouri K., et al. Computational analysis of metasurfaces // *IEEE J. Multiscale and Multiphysics Computational Techniques.* 2018. V. 3. P. 37. <https://doi.org/10.1109/JMMCT.2018.2829871>
 57. Zhang Y., Chen M.L.N., Jiang L.J. Analysis of electromagnetic vortex beams using modified dynamic mode decomposition in spatial angular domain // *Opt. Exp.* 2019. V. 27. № 20. P. 27702. <https://doi.org/10.1364/OE.27.027702>

АВТОРЫ

Антон Сергеевич Бударин — ведущий инженер, НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стальмаха, Москва, 117342, Россия; аспирант, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный Московской обл., 141701, Россия; <https://orcid.org/0009-0008-3417-809X>; anton.budarin@phystech.edu

AUTHORS

Anton S. Budarin — Lead Engineer, M.F. Stelmakh Polyus Research Institute, Moscow, 117342, Russia; PhD Student, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Moscow region, 141701, Russia; <https://orcid.org/0009-0008-3417-809X>; anton.budarin@phystech.edu

Леонид Александрович Скворцов — доктор технических наук, профессор, ведущий специалист НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха, Москва, 117342, Россия; профессор Московского физико-технического института (национальный исследовательский университет), Долгопрудный Московской обл., 141701, Россия; Scopus ID: 7003312873; <https://orcid.org/0000-0001-7504-4778>; lskvortsov@gmail.com

Евгений Викторович Кузнецов — доктор технических наук, профессор, генеральный директор НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха, Москва, 117342, Россия; <https://orcid.org/0009-0007-0629-5574>; bereg@niipolyus.ru

Илья Владимирович Силантьев — старший инженер, НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха, Москва, 117342, Россия; <https://orcid.org/0009-0009-2947-2080>; bereg@niipolyus.ru

Андрей Валерьевич Мьяконких — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. К.А. Валиева РАН, 117218, Москва, Россия; Scopus ID: 57203712756; <https://orcid.org/0000-0002-9547-1619>; lukichev@ftian.ru

Александр Юрьевич Павлов — кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, 117105, Москва, Россия; Scopus ID: 35277611500; <https://orcid.org/0009-0004-0643-2282>; alexup@bk.ru

Ринат Радифович Галиев — научный сотрудник, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, 117105, Москва, Россия; Scopus ID: 36933786600; <https://orcid.org/0000-0001-8448-3203>; rgaliev@isvch.ru

Асия Радифовна Давлятшина — научный сотрудник, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, 117105, Москва, Россия; <https://orcid.org/0009-0003-3747-4592>; isvch@isvch.ru

Александр Васильевич Аврамчук — научный сотрудник, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, 117105, Москва, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-6736-8550>; aavramchuck@gmail.com

Рустам Анварович Хабибуллин — кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, Москва, 117105, Россия; Scopus ID: 55018400000; <https://orcid.org/0000-0002-8414-7653>; khabibullin@isvch.ru

Leonid A. Skvortsov — Dr. Sci. (Engineering), Full Professor, Lead Specialist of M.F. Stelmakh Polyus Research Institute, Moscow, 117342; Professor of the Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudniy, Moscow region, 141701, Russia; Scopus ID: 7003312873; <https://orcid.org/0000-0001-7504-4778>; lskvortsov@gmail.com

Evgeniy V. Kuznetsov — Dr. Sci. (Engineering), Full Professor, General Manager of M.F. Stelmakh Polyus Research Institute, Moscow, 117342, Russia; <https://orcid.org/0009-0007-0629-5574>; bereg@niipolyus.ru

Ilya V. Silantyev — Senior Engineer, M.F. Stelmakh Polyus Research Institute, Moscow, 117342, Russia; <https://orcid.org/0009-0008-3417-809X>; bereg@niipolyus.ru

Andrey V. Myakonkikh — PhD (Physics and Mathematics), Senior Researcher, K.A. Valiev Institute of Physics and Technology of the RAS, 117218, Moscow, Russia; Scopus ID: 57203712756; <https://orcid.org/0000-0002-9547-1619>; lukichev@ftian.ru

Aleksandr Yu. Pavlov — PhD (Engineering), Head of the laboratory, V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of the RAS, 117105, Moscow, Russia; Scopus ID: 35277611500; <https://orcid.org/0009-0004-0643-2282>; alexup@bk.ru

Rinat R. Galiev — Researcher, V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of the RAS, 117105 Moscow, Russia; Scopus ID: 36933786600; <https://orcid.org/0000-0001-8448-3203>; rgaliev@isvch.ru

Asiya R. Davlyatshina — Researcher, V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of the RAS, 117105, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0009-0003-3747-4592>; isvch@isvch.ru

Alexander V. Avramchuk — Researcher, V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of the RAS, 117105, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-6736-8550>; aavramchuck@gmail.com

Rustam A. Khabibullin — PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Leading Researcher, V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of the RAS, 117105, Moscow, Russia; Scopus ID: 55018400000; <https://orcid.org/0000-0002-8414-7653>; khabibullin@isvch.ru

Статья поступила в редакцию 03.07.2023
Одобрена после рецензирования 20.11.2023
Принята к печати 28.01.2024

The article was submitted to the editorial office 03.07.2023
Approved after review 20.11.2023
Accepted for publication 28.01.2024