

УДК 537.8.029:534

DOI 10.33764/2411-1759-2029-2-149-168

Оптика мезоразмерных диэлектрических частиц. Обзор. Часть 2. Электромагнитный диапазон. Акустика

И. В. Минин¹, О. В. Минин¹✉

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: prof.minin@gmail.com

Аннотация. В статье приведен обзор нового научного направления, посвященного оптике диэлектрических мезоразмерных частиц для оптического, сверхвысокочастотного диапазонов и акустики. Материалы с относительно небольшими показателями преломления ($n < 2$), такие как стекло, кварц, полимеры, некоторые виды керамики и т. д., являются основными материалами для большинства оптических компонентов (линз, оптических волокон и т. д.). В этом обзоре мы представляем некоторые явления и возможные области применения, возникающие в результате от взаимодействия света с частицами с показателем преломления менее 2. Мы также обсудим некоторые другие геометрии частиц (сфероидальные, кубические и т. д.) и различные конфигурации частиц (изолированные или взаимодействующие), проведем обзор возможных применений таких материалов в связи с улучшением поля зрения наноскопией с высоким разрешением. Рассмотрены основные области применения таких частиц, включая применение новых фокусирующих устройств – диэлектрических и звукопроводящих частиц, формирующих «фотонные струи» и «фотонные крючки». Рассмотрен эффект суперрезонанса и формирование сильных магнитных полей в диэлектрических частицах.

Ключевые слова: диэлектрическая мезоразмерная частица, «фотонная струя», «фотонный крючок», теория Ми, дифракция, интерференция, пространственное разрешение, лазерное структурирование, оптический наноскоп, суперрезонанс, мезоразмерная диэлектрическая антенна, акустическая струя, акустический крюк, мезоразмерная кубоидная

Электромагнитный диапазон

Существование фотонных струй наблюдалось и фиксировалось для измерения в микроволновом диапазоне [1–4]. Перенесенные из оптики в терагерцовый диапазон длин волн диэлектрические элементы, формирующие «фотонные» струи, получили название терастрей [5].

В отличие от оптического диапазона длин волн в терагерцовом диапазоне устройства, предназначенные для формирования терастрей и различные системы на их основе находятся еще в начале своего развития [6–12], но приоритет исследований терастрей в терагерцовом

диапазоне принадлежит российским ученым. Диэлектрические мезомасштабные частицы, формирующие тераструи, могут быть выполнены с различной формой поверхности и с гораздо более высокой точностью, чем в оптическом диапазоне длин волн. Второй особенностью является тот факт, что в микроволновом и терагерцовом диапазоне длин волн диэлектрики имеют на несколько порядков более высокие потери, чем в оптическом диапазоне длин волн.

Было установлено, что кубоидная мезоразмерная частица, формирующая тераструи, может рассматриваться в качестве широкоугольного объектива в диапазоне углов $\mp 45^\circ$

и формирование терастрей сохраняется на гармониках освещающего излучения [13].

Устройство формирования тераструи в режиме «на отражение», т. е. формирование тераструи в направлении навстречу падающему излучению, при одновременном уменьшении продольных размеров устройства рассмотрено в [14].

Был открыт эффект увеличения интенсивности излучения тераструи, формируемой диэлектрическим кубоидом при применении аподизирующей маски [15]. Аподизация амплитудной маски – это оптический метод для дальнейшего улучшения пространственного разрешения си-

стемы визуализации SIL за счет уменьшения размера талии «фотонной струи», всегда приводящий к потере интенсивности из-за центрального маскирования входящей плоской волны.

Мезоразмерные устройства, формирующие тераструю, могут быть выполнены из метаматериала [8] (рис. 1). Данное устройство также может быть использовано в системах передачи энергии миллиметрового и терагерцового диапазонов, изображающих планарных устройствах, устройствах интегральной квазиоптики, для соединения оптических волноводов, для ввода излучения в волноводы и т. д.

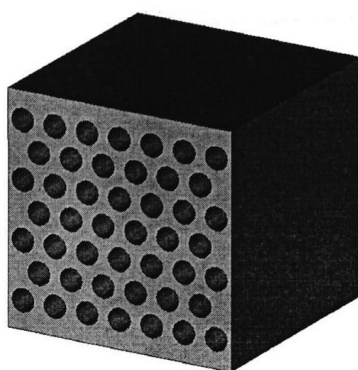


Рис. 1. Устройство метакубоидной плоской линзы для фокусировки излучения, выполненного из метаматериала

По аналогии с микросферическим оптическим наноскопом предложен и разработан простой и недорогой метод терагерцовой визуализации для улучшения пространственного разрешения за пределами дифракционного предела. ТГц-микроскоп с диэлектрической сферой из фтороропласта диаметром 2–4 мм формирует тераструю, обеспечивающую пространственное разрешение по длине волны лучше, чем $\lambda/3$ [16].

Широкополосный спектральный анализ является одним из важных преимуществ терагерцовой технологии визуализации, в то время как низкое пространственное разрешение ограничивает ее дальнейшее применение. В отличие от противоречия между высоким разрешением и низкой пропускной способностью, а также узкой полосой пропускания в существующих технологиях визуализации ближнего поля ТГц, предложен метод визуализации с высоким разрешением, высокой пропускной способностью и широкой поло-

сой пропускания, основанный на эффекте тераджета, создаваемом диэлектрической полусферой со соответствующим показателем преломления [17]. Луч тераструи может преодолеть ограничение дифракционного предела на пространственное разрешение микроскопической системы без потери энергии и спектральной ширины.

Был предложен и исследован метод улучшения разрешения терагерцовой системы визуализации с использованием терастрей [18]. Мезоразмерная кубоидная частица использовалась для локализации падающего излучения в субволновом объеме и фокусировки его непосредственно на изображаемых объектах. В качестве прямого детектора падающего терагерцового пучка с частотой 0,3 ТГц использовался полевой транзистор с модуляцией на напряженном кремнии. Было установлено четкое повышение разрешения терагерцового изображения, когда куб из тефлона был помещен в фокальную точку терагерцового луча

перед интересующим объектом. С помощью этого метода можно идентифицировать небольшие объекты, которые не могут быть обнаружены с помощью стандартной системы.

Интенсивно ведутся разработки по созданию спектрометрических датчиков и методик применения излучения ТГц частотного диапазона для задач медицины, биологии и применительно к системам безопасности. Связано это прежде всего с тем, что в этом диапазоне лежат наиболее сильные линии поглощения многих веществ (например, вода, аммиак, спирты). Также необходимо отметить, что в терагерцовом диапазоне находятся частоты колебаний больших групп атомов, образующих молекулу и колебания водородных связей многих органических веществ, представляющих интерес для биологии, медицины (белки, молекулы ДНК) и взрывчатых веществ. Предложено устройство малогабаритного спектрометрического датчика, в котором дисперсионные элементы выполнены в виде диэлектрической микрочастицы, формирующей тераструктуру, например, в форме кубоидов [9, 10].

Эффект тераструктуры используется в компактном оптико-терагерцовом преобразователе, в многоэлементных малогабаритных эмиттерах генераторов терагерцового диапазона, в мощных генераторах СВЧ-излучения на основе систем с виртуальным катодом (ВК), так называемых виркаторов, в устройствах канализации и субволновой фокусировки электромагнитных волн, в диэлектрической антенне с перестраиваемыми частотными и пространственными характеристиками на основе полупроводникового материала с оптически управляемыми электромагнитными параметрами, в приемниках электромагнитного излучения повышенной чувствительности, интегрированных линзовых антеннах, в фотопроводящей антенной решетке, в сканирующих устройствах на основе диска Нипкова с субдифракционным разрешением, неинвазивном СВЧ-устройстве выявления рака молочной железы, в устройствах построения изображений для систем радиовидения, диагностики биообъектов, дефектоскопии, интроскопии, в устройствах визуализации источников терагерцового излучения, радиовизорах [9, 10].

Электромагнитные импульсы с большой напряженностью поля можно использовать для обеззараживания бактериологически за-

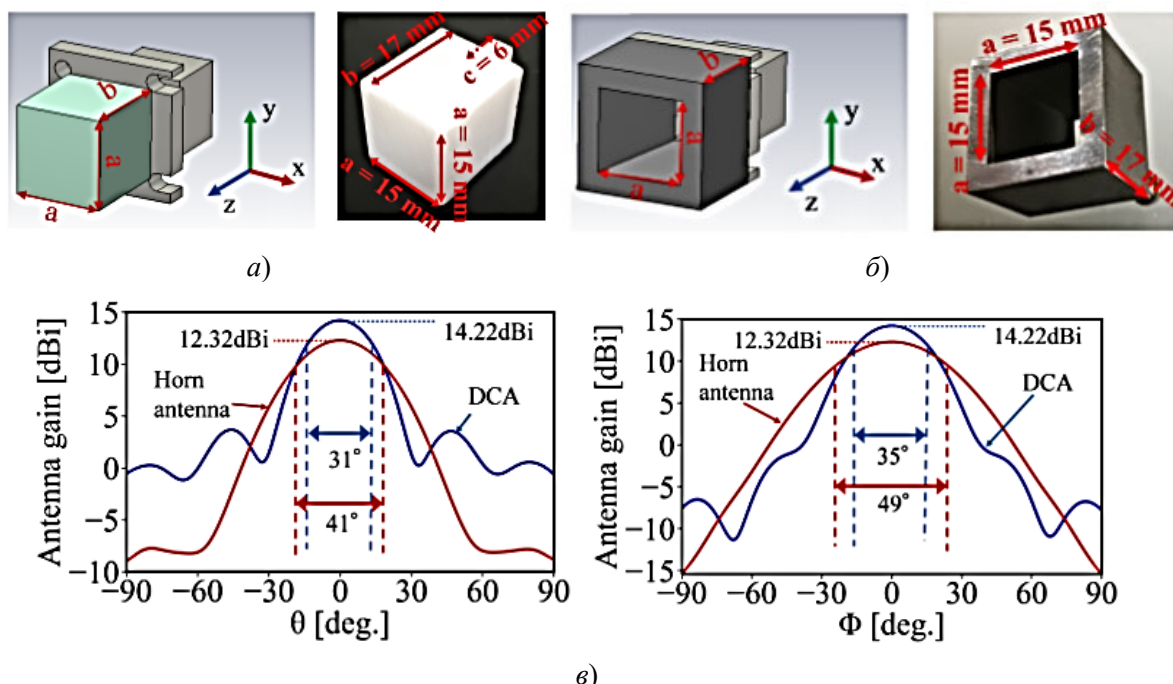
грязненных объектов. При воздействии на биологические объекты с размерами порядка 100–1 000 нм, характерными для вирусов и бактерий, возможно их разрушение. Эффективность воздействия зависит от формы биообъекта. Например, вирус COVID-19 имеет характерные нановыступы, вблизи которых напряженность поля увеличивается, что должно приводить к их повреждению при более низком значении напряженности внешнего поля.

В работе [19] мезоразмерный диэлектрический кубоид – антенна – был нагружен на выход стандартного волновода (рис. 2). Были оптимизированы размеры антенны на основе моделирования, чтобы максимизировать коэффициент усиления антенны 14,22 дБи, что на 1,9 дБ выше, чем у рупорной антенны с теми же размерами. Моделирование проводилось как на частоте 300 ГГц, так и на частоте 24 ГГц. Экспериментальная проверка проводилась с диэлектрическим кубоидом с размерами $1,2\lambda \times 1,2\lambda \times 1,36\lambda$. Полная ширина при половинном максимуме (FWHM) диаграммы направленности на частоте 24 ГГц была примерно на 21 и 34 % уже, чем у рупорной антенны в плоскостях E и H соответственно. Частотная характеристика повышения чувствительности с использованием мезоразмерной диэлектрической частицы в качестве приемной антенны показывает, что такая антенна является нерезонансной с широкой полосой пропускания.

Такая мезоразмерная диэлектрическая антенна может найти свое применение в устройствах телекоммуникации и бионики.

На рис. 3 показан смартфон с диэлектрической кубоидной антенной, предназначенной для работы в диапазоне 300 ГГц. Усиление антенны составило 15,5 дБи.

Эффект тераструктуры может быть использован при создании приемных волноводных СВЧ-модулей повышенной чувствительности, которые применяются в различных областях радиотехники для целей индикации и измерения интенсивности электромагнитного поля, в детекторных головках, в матричных квазиоптических приемниках электромагнитного излучения, в радар-детекторах, в оптико-акустических приемниках. При этом может использоваться как отдельная мезомасштабная диэлектрическая частица, формирующая тераструктуру, так и монослой мезомасштабных диэлектрических частиц [9, 10].



в)

Рис. 2. Изготовленные антенны (а) на основе диэлектрического кубоида и (б) рупорной антенны. Антенны, используемые в эксперименте, имели размеры $a = 15$ мм, $b = 17$ мм, $c = 6$ мм. Диаграмма направленности рупорной антенны и диэлектрической антенны (DCA) (в)



Рис. 3. Диэлектрическая кубоидная антенна на 300 ГГц в смартфоне

Был предложен простой метод повышения чувствительности терагерцовых приемников излучения с использованием субволновой фокусировки мезоразмерной диэлектрической кубической частицы, когда мезоскопическая диэлектрическая частица использовалась для локализации падающего излучения в субволновом объеме и фокусировки его непосредственно на детекторе [20, 21]. Отмечалось, что этот подход обеспечивает эффективный и простой в реализации метод для существенного повышения чувствительности и эквивалентной мощности по шуму субтерагерцовых детекторов.

Экспериментальная демонстрация трехмерной визуализации и исследование характеристик тераструктуры, генерируемой из диэлек-

трического кубоида с показателем преломления $n = 1,46$ на частоте 125 ГГц, выполнено в [22]. Было достигнуто разрешение $\lambda/75$. Непосредственно наблюдались субволновой сжатый пучок и явление сдвига фазы Гуи (Goüy) в тераструктуре. Установлено, что расчетная модель фазового сдвига Гуи, основанная на сфокусированном гауссовом луче с помощью линзы, не может объяснить фазовый сдвиг Гуи сжатого луча с помощью тераструктуры. В этом устройстве достигнуто увеличение усиления интенсивности излучения примерно на 7,4 дБ.

Впервые было получено экспериментальное наблюдение «фотонного крючка» – нового типа искривленного света ближнего поля, генерируемого на выходе диэлектрического кубоида, от-

личающегося нарушенной симметрией и размерами, сопоставимыми с длиной волны электромагнитного излучения. Эксперимент проводился на частоте излучения 0,25 ТГц. Установлено, что радиус кривизны, связанный с формируемым «фотонным крючком», меньше длины волны, в то время как его минимальная ширина луча составляет около 0,44 λ . Это представляет собой наименьший радиус кривизны, когда либо зарегистрированный для любого электромагнитного луча [23].

Эффект тераструи может быть использован в устройствах для обнаружения и контроля лекарственных, наркотических, токсичных и взрывчатых веществ на образце [9, 10], а также может быть применен для исследования образцов в области материаловедения, нанотехнологий, археологии, судебной медицины и т. д.

Для управления фокусирующими характеристиками применяют варифокальные жидкостные линзы в виде сидячей капли электропроводной жидкости на диэлектрической подложке, покрытой тонким слоем диэлектрика, а между подложкой и диэлектриком вмонтирована сеть управляющих электродов [24]. Управление фокусным расстоянием такой линзы осуществляется путем изменения ее кривизны в зависимости от прикладываемого к электродам электрического напряжения. Данная линза не предназначена для фокусировки электромагнитного излучения КВЧ-диапазона вследствие низкого пространственного разрешения, не достигающего дифракционного предела.

Варифокальная жидкая линза представляет собой каплю жидкости, поглощающую излучение в объеме капли и сидящую на твердой прозрачной подложке. Перестройка фокусного расстояния капли обусловлена изменением кривизны ее свободной поверхности из-за теплового воздействия лазерного пучка на каплю под действием термокапиллярных сил, возбуждаемых тепловым воздействием лазерного пучка на каплю, а величина и знак кривизны и фокусного расстояния определяются мощностью лазерного пучка. Достоинством варифокальной жидкой линзы является бесконтактное управление ее формой поверхности от режима собирающей до режима рассеивающей линзы. Изменение фокусного расстояния линзы в виде капли нелетучей жидкости, сидящей на прозрачной подложке,

происходит вследствие деформации ее свободной поверхности, вызываемой центробежными термокапиллярными силами, индуцированными тепловым воздействием управляющего лазерного пучка; при этом величина и знак фокусного расстояния определяются мощностью управляющего пучка.

КВЧ-варифокальная линза состоит из мезоразмерной плоско-выпуклой сферической диэлектрической частицы с относительным показателем преломления по отношению к окружающему пространству, изменяющимся в диапазоне от 1,2 до 2, с диаметром частицы не менее λ , где λ – длина волны излучения, освещающего частицу со стороны ее плоского основания [9, 10]. Мезоразмерная частица представляет собой каплю жидкости, поглощающую излучение в объеме капли и сидящую на твердой прозрачной подложке с показателем преломления, примерно равным показателю преломления капли. А перестройка фокусного расстояния капли обусловлена изменением кривизны ее свободной поверхности из-за теплового воздействия электромагнитного излучения на каплю под действием термокапиллярных сил. В качестве материала капли используется октан, нонан, декан или циклогексан. Эти жидкости имеют малые потери энергии в этом диапазоне, примерно равные 10^{-3} , и показатель преломления, равный от 1,396 до 1,424 на частоте 475 ГГц.

Устройства, формирующие тераструи, могут быть использованы в системах беспроводной передачи энергии на расстояние для повышения эффективности ректенн в микроволновом диапазоне, ТГц-диапазоне и видимом, например, для питания маломощных датчиков, дирижаблей, для питания мультикоптеров, микророботов, зарядки сотовых телефонов, организации беспроводной системы передачи данных на поверхности и в объеме оптического чипа. Беспроводная передача энергии считается одной из революционных, качественно новых технологий. Такая ректенна обладает низким уровнем диссипативных потерь благодаря тому, что используются диэлектрические материалы с относительно малым значением показателя преломления, фокусировкой излучения с поперечными размерами менее дифракционного предела и наличием магнитного отклика, то есть возможна работа ректенны с источниками излучения магнитного типа.

Устройства формирования терастрей могут использоваться в СВЧ-томографии для диагностики биологических объектов путем выявления аномалий внутренних тканей биологических объектов за счет измерения амплитудно-фазовых характеристик рассеянного электромагнитного излучения и возможности микроволновой визуализации аномалий биологических сред со сверхдифракционным разрешением. Известно, что диэлектрические свойства тканей зависят от их различных функциональных и патологических состояний, таких как наполняемость кровью и кислородом, наличие ишемических и инфарктных повреждений.

Методы микроволнового видения в биологических средах используют электромагнитные волны в диапазоне частот порядка 0,1–20 ГГц [25]. Глубина проникновения микроволн в биологические ткани зависит от основных свойств ткани. Микроволны взаимодействуют с биологической тканью в основном в зависимости от содержания воды в ткани. Различное содержание воды в ткани приводит к различным диэлектрическим свойствам ткани, например, к различной диэлектрической проницаемости (или относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r) и проводимости (σ) для микроволн.

Микроволновая томография – одна из новых технологий, которая может иметь потенциальное применение для биомедицинской визуализации объектов. По сравнению с распространенными методами визуализации, такими как рентгенография, ядерный магнитный резонанс (ЯМР) и ультразвуковая визуализация, микроволновая томография имеет следующие преимущества. Во-первых, устройства микроволновой томографии абсолютно неинвазивны, как и используемые в настоящее время томографические системы. Во-вторых, энергия «фотонов» в микроволновой области достаточно мала, чтобы избежать ионизационных эффектов. В-третьих, все томографические системы для визуализации внутренних органов основаны на дифференциации свойств тканей. Таким образом, микроволновая томография обладает способностью изображать объемные электрические свойства как особенности биологических тканей, которые не могут быть выявлены другими методами.

Обычно устройство СВЧ-томографа содержит источник электромагнитной СВЧ-

энергии, СВЧ-приемник, приемо-передающие рупорные антенны СВЧ-излучения, пространственно ориентированные на объект, согласующий среды с коэффициентом преломления материала, близким к преломлению поверхностного слоя объекта, расположенной между передающими и принимающими СВЧ-излучение антеннами в рабочей камере, биологический объект, размещенный внутри согласующей среды, устройства обработки результатов измерений и видеоконтрольного устройства [26]. Если на раскрытые рупорной антенны разместить мезоразмерную диэлектрическую частицу, формирующую тераструю в согласующей среде, то можно повысить пространственное разрешение томографа.

Была названа гипотеза об использовании пирамид в качестве антенн, формирующих тераструю [27].

Исследованию возможности улучшения субтерагерцовых изображений с помощью эффекта терастрей посвящены работы [28–30]. Мезоразмерная кубоидная частица использовалась для локализации падающего излучения в субволновом объеме и фокусировки его непосредственно на изображаемых объектах. В качестве прямого детектора падающего терагерцового пучка с частотой 0,3 ТГц использовался полевой транзистор с модуляцией на напряженном кремнии. Было установлено четкое повышение разрешения терагерцового изображения, когда куб из тефлона был помещен в фокальную точку терагерцового луча перед интересующим объектом. Этим методом можно идентифицировать небольшие объекты, которые не могут быть обнаружены с помощью стандартной системы.

Проведенные исследования показали, что контраст изображения в воздухе при использовании микроскопа на основе диэлектрических мезоразмерных микрочастиц можно существенно повысить с помощью микрочастиц, обеспечивающих формирование области локализации излучения под углом к направлению падения излучения (под углом к оптической оси), при сохранении сверхвысокого разрешения, присущему фотонным струям [30]. Для этого перед частицей располагается экран, который блокирует часть падающего пучка, образуя «фотонный крючок» или «фотонную струю» (тераструю) с наклонным освещением в ближнем поле.

Впервые были предложены и исследованы в оптическом и терагерцовом диапазонах длин волн мезоразмерные устройства без оси симметрии для формирования фотонных струй [12, 31], например, кубоидной формы, конусной, треугольной пирамидальной, усеченного конуса и т. д. Произведено систематическое изучение и сравнение фотонных наноструктур, создаваемых диэлектрическими микрочастицами в 2D- и 3D-пространственных конфигурациях [32]. Для управления ключевыми параметрами решетки фотонных струй может быть применена фазовая решетка. Впервые была представлена экспериментальная прямая визуализация пространственных и амплитудных особенностей формирования ансамбля фотонных струй вблизи теневой поверхности пилообразной фазовой дифракционной решетки. Установлено, что матрица фотонных струй из таких фазовых дифракционных решеток, в отличие от самосборки микрочастиц, создает матрицу струй с контролируемыми характеристиками: длиной, шириной и фокусным расстоянием [33].

Открыт эффект повышения интенсивности фотонной струи при использовании на поверхности мезоразмерной частицы аподизирующей маски [15, 34]. Аподизация амплитудной маски – это оптический метод для дальнейшего улучшения пространственного разрешения системы визуализации SIL за счет уменьшения размера талии фотонной струи, но всегда приводящий к потере интенсивности из-за центрального маскирования входящей плоской волны.

На рис. 4 приведено распределение напряженности поля E^2 в плоскости XZ для частиц-линз в форме сферы, цилиндра и кубоида с/без аподизирующей маски. Было установлено удивительный факт: уменьшая освещенность мезомасштабной частицы за счет ее частичной аподизации, мы увеличиваем интенсивность поля области «фотонной струи». Причем максимальная интенсивность электромагнитного поля для цилиндрической частицы с маской становится больше, чем для сферической частицы.

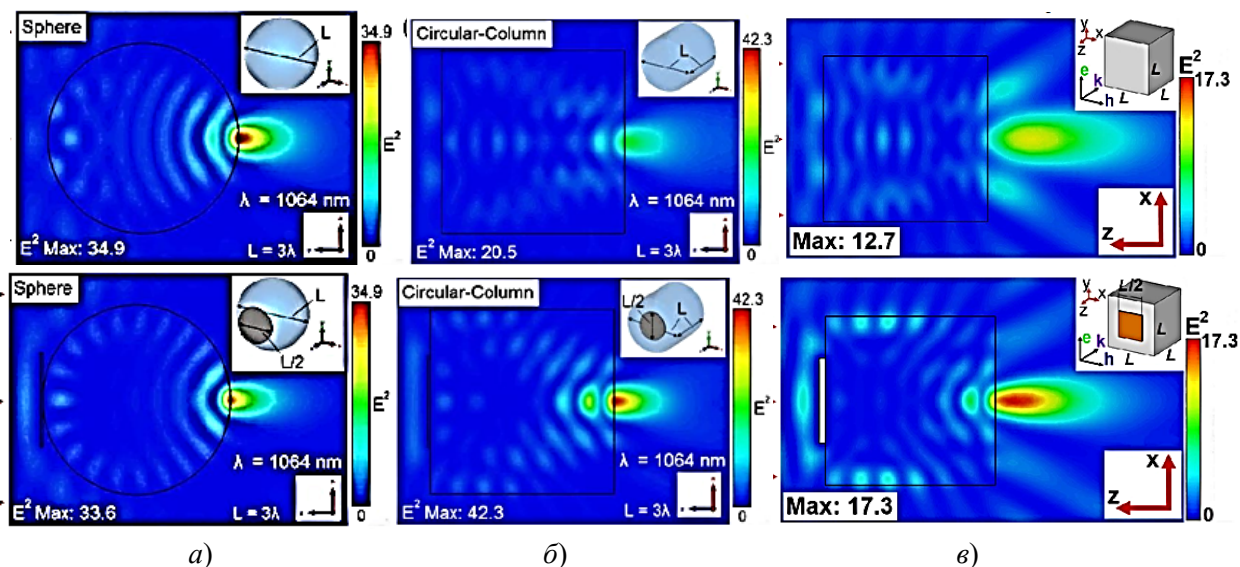


Рис. 4. Распределение напряженности поля E^2 в плоскости XZ для частиц-линз в формах сферы: а) цилиндра; б) кубоидной частицы; в) с/без аподизирующей маски

Акустический диапазон

Аналогом «фотонной струи» в акустике является акустическая струя (acoustojets); термин введен в работах [9, 10, 35–38]. Приоритет исследований акустоструй принадлежит российским ученым. Акустическая струя возникает только для определенных значений относительной продольной скорости звука в

материале звукопроводящей частицы и окружающей среды [11]. Возможность наблюдения акустоструй не может быть предсказана на основе приближения геометрической оптики или скалярной теории дифракции, и для исследования эффекта акустоструй необходимо изучать распространение звуковых волн через такие мезолинзы с использованием уравнений Навье – Стокса.

Разновидностью акустоструи является акустический крюк – искривленная акустическая струя [39].

Акустическая линза [10, 38], формирующая акустострую, выполнена с возможностью формирования области фокусировки непосредственно за теневой поверхностью с размерами в поперечном (относительно направления распространения излучения) направлении на уровне половинной мощности менее классического дифракционного предела – до четверти длины волны акустического излучения в среде λ . Протяженность области фокусировки состав-

ляет $(1-5)\lambda$. Линза содержит преломляющую среду из акустически проводящего материала, при этом скорость звука в преломляющей среде не превышает скорость звука в окружающей среде больше чем в 2,5 раза. Линза может быть выполнена в виде трехмерной мезоразмерной частицы, например, в виде сферы, цилиндра, кубоида, пирамиды, конуса с характерными размерами порядка длины волны акустического излучения в среде, с относительной скоростью звука в материале частицы не менее 1,1 и относительным волновым сопротивлением не более 25 (рис. 5).

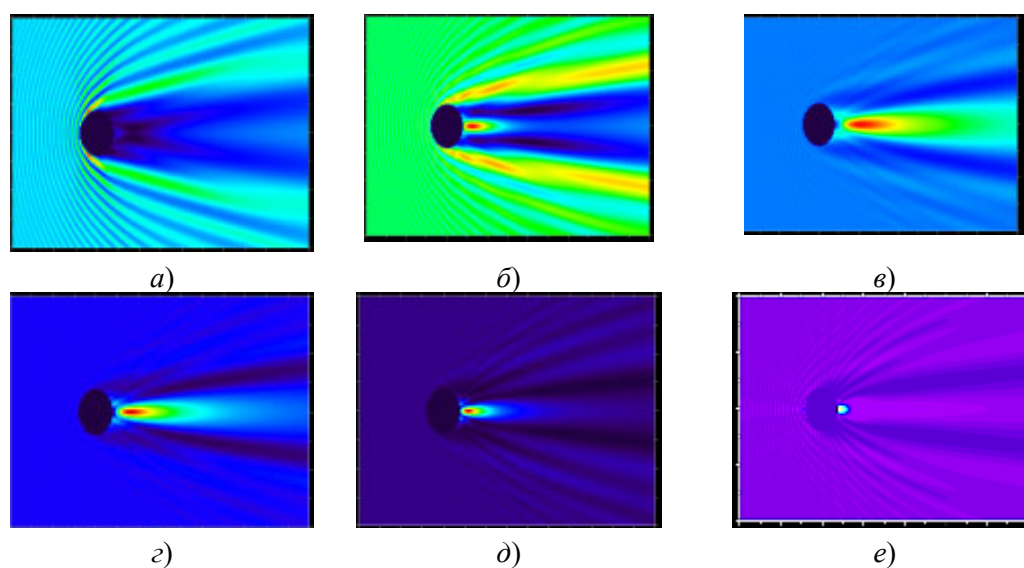


Рис. 5. Динамика появления акустического аналога «фотонной струи» от параметров среды: R – радиус частицы в длинах волн; M – отношение скоростей звука в материале сферы и среды; I – максимальная интенсивность звукового поля вдоль струи: а) $R = 2, M = 0,5, I = 3$; б) $R = 2, M = 0,9, I = 2$; в) $R = 2, M = 1,05, I = 4$; г) $R = 2, M = 1,1, I = 10$; д) $R = 2, M = 1,2, I = 30$; е) $R = 2, M = 1,4, I = 100$

Акустические мезоразмерные линзы могут быть изготовлены из различных звукопроводящих материалов: металлов и композитов [38], полимерных материалов, например, Rexolite®, для работы в воде [41], газонаполненные [40], жидкостные.

Экспериментальные исследования показали, что эта плоская линза способна фокусировать звук так же, как это делают обычные изогнутые акустические линзы. Определены условия, при которых линза из кубических частиц такого типа образует единственную локализованную область с субдифракционным поперечным размером (приблизительно 0,44 длины волны). Полученные результаты позволяют разрабатывать новые плоские недорогие акустические линзы с

размерами в масштабе длины волны для различных применений (рис. 6).

Улучшить фокусировку излучения можно за счет использования маски для зрачка, созданной в акустической мезомасштабной кубовидной частице, заполненной CO_2 [42–44]. Эти результаты важны, поскольку они подтверждают эффект аподизации аномальной амплитуды для акустической линзы с размером длины волны и демонстрируют, что можно улучшить фокусировку звука кубической газонаполненной линзы с размером порядка длины волны излучения.

Увеличить пространственное разрешение акустической мезоразмерной кубовидной линзы до величины порядка $0,02 \lambda$ [9, 10, 38]

возможно, если по оптической оси линзы выполнить звукопроницаемый канал постоянного сечения с характерным поперечным размером не более $0,25\lambda$, заполненный материа-

лом с акустическим коэффициентом преломления, равным $n_{\text{ср}}$, где $n_{\text{ср}}$ – акустический коэффициент преломления окружающей среды линзы.

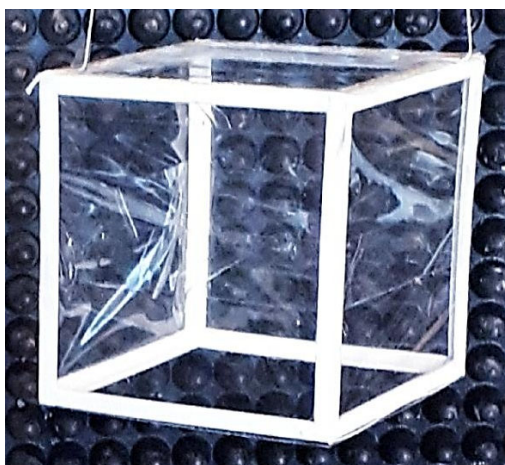


Рис. 6. Мезоразмерная кубоидная газонаполненная линза

Акустическая линза в форме кубоида с размером ребра не менее $\lambda/2$, где λ – длина волны излучения в окружающем пространстве линзы, может быть выполнена из искусственного пластинчатого звукопроводящего материала с относительной скоростью звука в материале линзы относительно скорости звука в окружающей среде, лежащего в диапазоне от 0,5 до 0,83 [38, 45]. Линза составлена из решетки параллельных V-образных пластин. На рис. 7 приведены схема и внешний вид кубоидной мезоразмерной янус-линзы с величиной ребра, равной 3λ .

Приведены примеры результатов экспериментального исследования кубоидной янус-линзы в прямом (рис. 8, а) и обратном направлениях (рис. 8, б).

Мезоразмерная плоская янус-линза для фокусировки звуковых волн рассмотрена в работе [46] (рис. 9).

Достоинством предлагаемой акустической линзы является независимость ее фокусирующих свойств от параметров окружающей среды (скорости звука), малый коэффициент отражения от поверхности линзы, простая форма линзы. Дело в том, что материал окружающей среды находится в структуре линзы, а относительный показатель преломления линзы зависит только от физической длины параллельных пластин или от угла наклона этих пластин по отношению к падающему излучению.

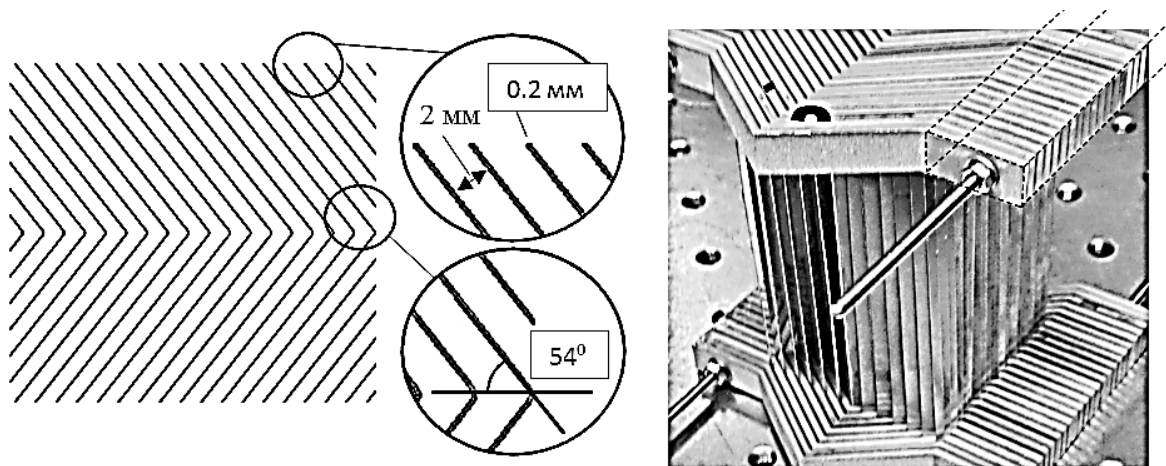


Рис. 7. Схема и внешний вид кубоидной мезоразмерной янус-линзы с величиной ребра, равной 3λ

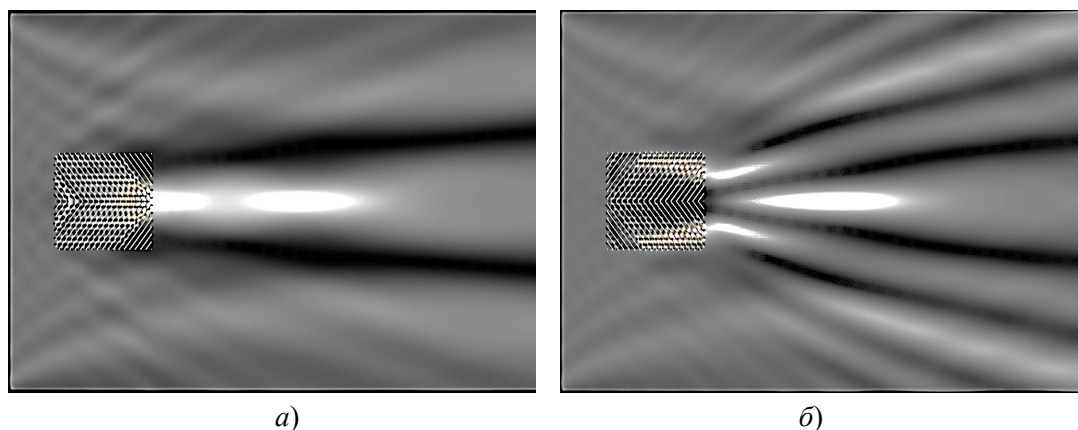


Рис. 8. Результаты экспериментального исследования кубоидной янус-линзы в прямом (а) и обратном направлениях (б), предназначенной для работы в воде

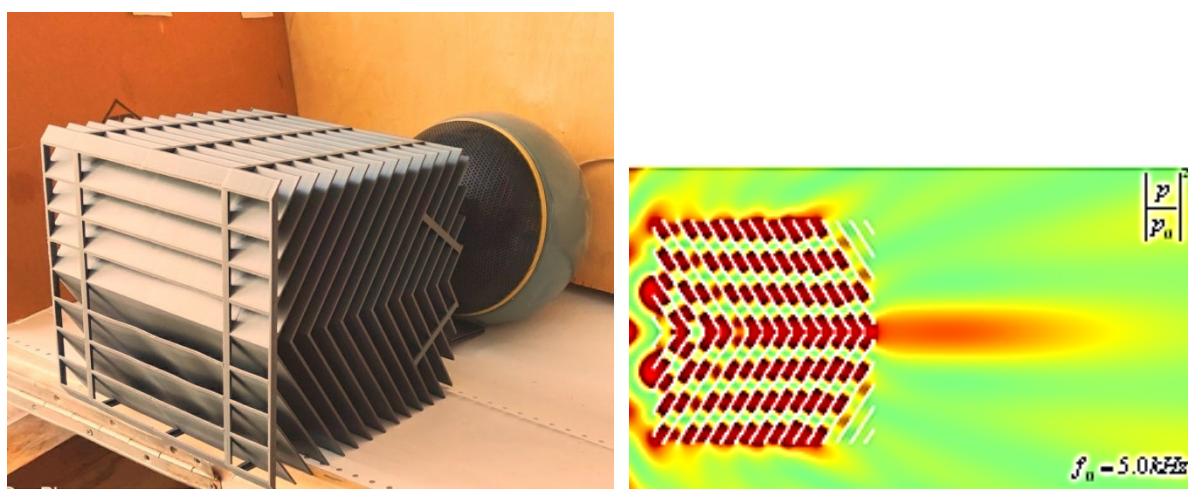


Рис. 9. Внешний вид кубоидной мезоразмерной янус-линзы с величиной ребра, равной 3λ и предназначенной для работы на частоте 5 000 Гц в воздухе

Данная акустическая линза может применяться для субволновой фокусировки акустических волн как в газах, так и в жидкостях. По сравнению с газовыми акустическими линзами предлагаемая линза обладает достаточной прочностью и надежностью.

Управляемые акустические мезоразмерные линзы могут найти применение для неразрушающего контроля материалов и изделий и в медицинской диагностике. В таком устройстве обеспечивается возможность бесконтактным методом управлять фокусирующими свойствами мезоразмерного фокусирующего устройства в акустике с фокусировкой излучения в область с субдифракционным размером [9, 10, 38]. Линза выполняется из жидкого кристалла, помещенного в магнитное поле. Известно, что нематические жидкие кристаллы обладают анизотропией скорости

звука [47, 48]. При изменении величины магнитного поля изменяется скорость звука в жидком кристалле и соответственно меняются характеристики формируемой акустоструи.

Недостатком акустических микроскопов является низкое продольное разрешение и большие габариты устройства, обусловленные большим фокусным расстоянием линзы, составляющим примерно от нескольких до сотен длин волн акустического излучения. Эффект акустоструи применяется в сканирующих акустических микроскопах для увеличения поперечного и продольного разрешений [9, 10, 38, 49–52].

Эффект акустоструи используется для построения мезоразмерных акустических ловушек для управления в пространстве наночастицами [38]. Известно, что размер

поперечного сечения области фокусировки определяет градиент сил, действующих на регистрируемую частицу: чем он меньше, тем выше градиент. Для уменьшения поперечного размера фокального пятна используется острая фокусировка с использованием высокоапертурных объективов. Однако продольный размер фокального пятна $dz = \lambda n / NA^2$ (λ – длина волны, n – показатель преломления среды, NA – числовая апертура фокусирующей системы) даже в предельном случае оказывается в два раза больше поперечного $dr = \lambda / (2NA)$. И даже в предельном случае ($NA = 1$) поперечный размер области фокусировки в случае классических линз не может быть меньше половины длины волны. В таких ловушках формирования области фокусировки выполнены в виде мезомасштабных звукопроводящих частиц, формирующих на ее внешней границе с противоположной стороны от падающего излучения области с повышенной интенсивностью излучения с поперечными размерами порядка $\lambda/3 - \lambda/4$.

Акустические датчики широко используются для различных систем акустического видения, в устройствах акустической навигации и для неразрушающего контроля, в медицине (при этом в качестве чувствительных элементов для регистрации акустического излучения

используются устройства, работающие на различных физических принципах). Однако чувствительность этих датчиков ограничивается минимальным регистрируемым давлением. Для повышения величины давления на чувствительном элементе приемника осуществляют фокусировку акустического излучения с помощью акустических линз. Повысить чувствительность акустического датчика возможно с помощью фокусирующих устройств, формирующих акустическую струю [9, 10, 38].

Приведены результаты численного моделирования сферической линзы с различными наполнителями: гексан (рис. 10, а), этанол (рис. 10, б), метанол (рис. 10, в). Как следует из результатов, приведенных на этом рисунке, фокусирующие свойства сферической частицы зависят от параметров среды, заполняющей сферическую оболочку мезоразмерной линзы. С увеличением контраста относительного показателя преломления увеличивается интенсивность акустического поля в области фокуса и увеличивается разрешающая способность звукопроводящей частицы. Кроме того, с увеличением оптического контраста область фокусировки приближается к теневой стороне звукопроводящей частицы.

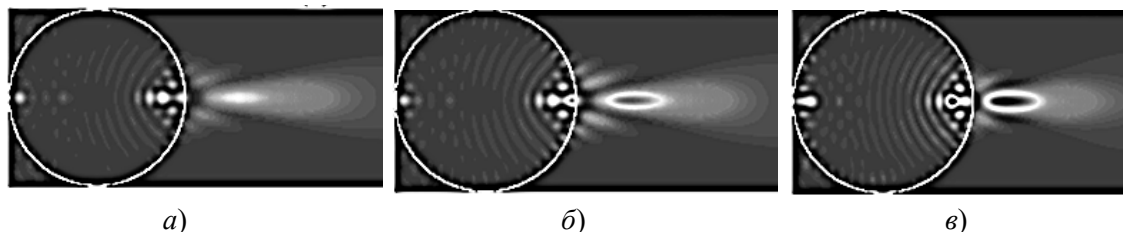


Рис. 10. Результаты численного моделирования сферической линзы с различными наполнителями: а) гексан; б) этанол; в) метанол

Акустический диод – устройство, пропускающее звуковую волну только в одну сторону. Известны устройства акустического диода, состоящие из двух половинок: нелинейной акустической среды и фононного кристалла [53, 54].

Предложено устройство акустического диода, содержащее двойную решетку периодических треугольных частичек, расположенных в изотропном, однородном, акустически прозрачном материале. Новым является то, что частичка выполнена в виде мезомасштаб-

ной звукопроводящей частицы, фокусирующей падающее на ее вершину излучение с пространственным разрешением, не менее дифракционного предела и с полным углом раствора при ее вершине и относительным коэффициентом преломления материала, выбранным из условия обеспечения полного внутреннего отражения излучения при его падении со стороны основания частицы [38] и т. д.

Ультразвуковые устройства на основе акустической струи могут найти свое применение для неинвазивного лечения гипертер-

мией опухолевых тканей, например, меланомы и могут быть использованы для разрушения раковых клеток и опухолевых тканей, в области биометрической идентификации личности, более конкретно – в ультразвуковых устройствах для регистрации папиллярного узора пальца с высоким разрешением, в акустических микронасосах для перемещения малых объемов жидкости, в микроаналитических системах, анализирующих малые объемы жидкости, в системах химического анализа и смешивания жидких веществ, дозирования лекарств и т. д., в газовой, химической, нефтеперерабатывающей, пищевой отрасли промышленности, системах защиты человека, экологии; необходимы устройства исследований и анализа жидкостей с помощью звуковых и ультразвуковых колебаний, которые могут быть использованы для анализа физических свойств жидкостей, определения состава жидких смесей, в устройствах сушки материалов в акустических полях высокой интенсивности, в ультразвуковых стиральных машинах, в ультразвуковых распылителях, применяемых в таких технологических процессах, как: нанесение фоторезистов при производстве модулей памяти, микросхем и процессоров, химико-механическое полирование полупроводниковых пластин-заготовок для производства полупроводниковых компонентов в микроэлектронной промышленности, нанесение полирующих жидкостей и покрытий в оптико-электронном приборостроении, нанесение покрытий на сердечные клапаны и стенты коронарных сосудов в медицинской промышленности, нанесение дезинфицирующих покрытий при производстве медицинской техники и имплантов, получение наночастиц и нанесение нанопокровов в производстве функциональных наноматериалов, нанесении тонких слоев лекарственных веществ (микродоз) или защитных слоев на грануляты, спансулы, таблетлируемый материал, при получении монодисперсных гранул, для создания лечебных аэрозолей, для проведения ультразвуковой очистки [9, 10, 38].

Интересное применение звукопроводящих частиц может найти в химических источниках тока адаптированных к условиям отрицательных температур окружающей среды и может быть использовано при конструировании и производстве свинцовых аккумуляторов для автомобилей северного исполне-

ния. При этом решается задача пуска двигателя в условиях отрицательных температур окружающей среды посредством снижения вязкости электролита. Технический результат достигается тем, что в свинцовом аккумуляторе, содержащем блок отрицательных электродов и блок положительных электродов, разделенных между собой сепараторами, установленного в резиновой обойме ультразвукового излучателя в нижней части моноблока, подсоединяемого с помощью проводов через ультразвуковой генератор к аккумулятору, а непосредственно – на поверхности ультразвукового излучателя, обращенной к нижним граням положительных, отрицательных электродов и сепараторов аккумулятора, размещено не менее одной линзы в виде мезоразмерных звукопроводящих частиц с возможностью фокусировки излучения непосредственно за теневой границей частицы.

Предлагаемый свинцовый аккумулятор более совершенен по сравнению с известными, так как он адаптирован к условиям отрицательных температур окружающей среды.

Выводы

Как говорил Стив Джонс, *«идея – самый дорогой товар на свете»*. Сформированы новые научные направления в областях мезоразмерной диэлектрической оптики, физике плазмонно-фотонных струй, мезоразмерных звукопроводящих частиц, формирующих акустоструи и акустические крючки в акустике.

В новой области мезоразмерной диэлектрической оптики были предложены и исследованы в оптическом и терагерцовом диапазонах длин волн мезоразмерные устройства без оси симметрии для формирования «фотонных струй», впервые исследованы мезоразмерные диэлектрические устройства, формирующие «фотонную струю» в режиме на отражение, впервые предложен и исследован «фотонный крюк» для систем манипуляции нано- и микрочастицами. Введен новый термин и теперь уже устоявшийся в мировой научной среде – тераструя, по аналогии с «фотонными струями», для областей фокусировки излучения с пространственным разрешением до одной четвертой длины волны излучения.

Впервые предложен и исследован фотонный крюк, для систем манипуляции нано-

и микрочастицами. Впервые предложен и исследован плазмонный крюк. Важно отметить, что плазмонный крючок продемонстрировал наибольшую кривизну луча, когда-либо зарегистрированную для плазмонных волн.

Исследован новый, так называемый эффект суперрезонанса, заключающийся в том, что диэлектрические мезомасштабные сферы могут поддерживать резонансные моды Ми высокого порядка с локализацией и усилением гигантского поля. Разработаны методы определения суперрезонанса на модах Ми высокого порядка для сферической диэлектрической частицы; формирования квантовых точек на основе эффекта суперрезонансных мод Ми высокого порядка; генерации резонансных мод Ми высокого порядка в мезоразмерных полостях диэлектрического материала, предложено и разработано устройство оптической маскировки при суперрезонансе мод Ми, сферическая (шарообразная) однородная мезомасштабная линза с субдифракционным разрешением.

В области акустики впервые в мире предложен, исследовано и введено понятие акусто-струи – аналога фотонной струи в оптике. Предложена и исследована кубоидная линза, формирующая акустострую. Введено понятие акустического крюка и проведены его исследования. Впервые предложены и исследованы устройства для ближнепольной фокусировки акустических волн. Предложены новые методы формирования изображения объектов с субдифракционным разрешением в акустике, в том числе в акустическом микроскопе.

Многие полученные результаты можно рассматривать как основу для создания новых методов, прежде всего в нанотехнологиях. Так прикладные задачи оказываются неразрывно связаны с фундаментальным знанием, но это в будущем, хотя, возможно, и недалеко. С. И. Вавилов говорил: *«У науки имеется собственная специфическая логика развития, которую весьма важно учитывать. Наука всегда должна работать в запас,*

впрок, и только при этом условии она будет находиться в естественных для нее условиях».

Например, эти исследования могут найти применение в задачах записи и обработки информации сверхвысокой плотности. Если мезочастицу «посадить» на магнитный носитель и облучить светом, то (в зависимости от режимов облучения) она сможет как ее намагнитить, так и, наоборот, размагнитить. В результате возникает возможность разместить бит информации в пространственной области размером в несколько нанометров. Чтобы управлять такими процессами, нужно четко представлять, из какого материала можно делать такие частицы и как их облучать. Мало того, элементы мезоразмерной оптики можно будет использовать для лечения онкологических больных и, наконец, можно будет разработать принципиально новый оптический компьютер.

Это лишь несколько примеров из длинного списка. Здесь и создание новых, не существующих в природе материалов с необычными свойствами, и спектроскопия сверхвысокого разрешения, и визуализация субволновых объектов, и многое другое.

Что касается практических результатов, то на этот вопрос лучше ответят инженеры. Физики не разрабатывают конкретные устройства, а открывают явления, которые можно использовать, а можно и не использовать. Ведь никто не скажет заранее, что удастся освоить, реализовать, а что нет.

Хотелось бы надеяться, что и описанные нами явления не лягут на полку невостребованными.

Приоритет российских ученых признается научным сообществом всего мира. Технические решения авторов защищены более 120 патентами РФ. Количество интересных применений указывает на появление нового перспективного научного направления в области оптики, терагерцового и акустического диапазонов, а также плазмоники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhao L., Ong C. K. Direct observation of photonic jets and corresponding backscattering enhancement at microwave frequencies // Journal of Applied Physics. – 2009. – Vol. 105.
2. Heifetz A., Huang K., Sahakian A. V., Li X., Taflove A., Backman V. Experimental confirmation of backscattering enhancement induced by a photonic jet // Applied Physics Letters. – 2006. – Vol. 89. – P. 221118.

3. Kong S. C., Sahakian A. V., Heifetz A., Taflove A., Backman V. Robust detection of deeply subwavelength pits in simulated optical data-storage disks using photonic jets // *Applied Physics Letters*. – 2008. – Vol. 92. – P. 200863. – DOI 10.1063/1.2936993.
4. Минин И. В., Минин О. В. Детекторы миллиметрового и терагерцового излучения // *Вестник СГУГиТ*. – 2021. – Т. 26, № 4. – С. 160–175.
5. Pacheco-Peña V., Beruete M., Minin I. V. et al. Terajets produced by dielectric cuboids // *Applied Physics Letters*. – 2014. – Vol. 105 (8). – P. 084102.
6. Pacheco-Peña V., Beruete M., Minin I. V., et al. Multifrequency focusing and wide angular scanning of terajets // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40 (2). – P. 245–248.
7. Pham H. H. N., Hisatake S., Minin O. V. et al. Asymmetric phase anomaly of terajet generated from dielectric cube under oblique illumination // *Applied Physics Letters*. – 2017. – Vol. 110 (20). – P. 201105.
8. Minin I. V., Minin O. V., Pacheco-Peña V. et al. All-dielectric periodic terajet waveguide using an array of coupled cuboids // *Applied Physics Letters*. – 2015. – Vol. 106 (25). – P. 254102.
9. Минин И. В., Минин О. В. Квазиоптика: современные тенденции развития. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 163 с.
10. Минин И. В., Минин О. В., Карпик А. П. Фотонные наноструи, тераструи и акустоструи в науке и технике. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 170 с.
11. Минин И. В., Минин О. В. Фотонные струи в науке и технике // *Вестник СГУГиТ*. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 212–234.
12. Minin I. V., Minin O. V. Diffractive optics and nanophotonics: Resolution below the diffraction limit [Electronic resource]. – Springer, 2016. – Mode of access: <http://www.springer.com/us/book/9783319242514#aboutBook>.
13. Pacheco-Peña V., Beruete M., Minin I. V., Minin O. V. Multifrequency focusing and wide angular scanning of terajets // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40, Iss. 2.
14. Minin I. V., Minin O. V., Pacheco-Peña V., Beruete M. Localized photonic jets from flat, three-dimensional dielectric cuboids in the reflection mode // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40, No. 10. – P. 2329–2332.
15. Yue L., Yan B., Monks J., Wang Z., Tung N. T., Lam V. D., Minin O. V., Minin I. V. A millimetre-wave cuboid solid immersion lens with intensity-enhanced amplitude mask apodization // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2018. – Vol. 39, Iss. 6. – P. 546–552.
16. Qu Q., Liu H., Zhu D., Yang M., Cui B., Feng Sh., Yang Yu. Terajet effect of dielectric sphere and THz imaging // *Proceedings Infrared, Millimeter-Wave, and Terahertz Technologies V*. – 2018. – Vol. 10826. – P.1082606. – DOI 10.1117/12.2500909.
17. Zh. Yang, Qingshan Qu, Menghan Yang, Bin Cui, Zhenwei Zhang, Yuping Yang. Propagation characteristics of high-throughput terajet beam and its super Resolution THz imaging // *44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. – 2019. – P. 19080016. – DOI 10.1109/IRMMW-THz.2019.8874459.
18. Calvo-Gallego J., Delgado-Notario J. A., Minin O. V., El Haj A., Ferrando-Bataller M., Fobelets K., Velázquez-Pérez J. E., Minin I. V., Meziani Y. M. Resolution Enhancement of Terahertz Imaging Systems Below the Diffraction Limit by Using the Terajet Effect // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2022.
19. Samura Y., Horio K., Antipov V., Shipilov S., Ereemeev A., Minin O. V., Minin I. V., Hisatake Sh. Characterization of Mesoscopic Dielectric Cuboid Antenna at Millimeter-wave Band // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. – DOI 10.1109/LAWP.2019.2930820.
20. Minin I. V., Minin O. V., Sanchez J. S., Delgado-Notario J. A., Diez Fernandez E., Calvo-Gallego J., Ferrando-Bataller M., Velazquez-Pierrez J. E., Meziani Y. M. Responsivity enhancement of a Strained Silicon Field Effect Transistor detector at 0.3 THz using the terajet effect // *Optics Letters*. – 2021. – Vol. 46 (13). – P. 3061–3064.
21. Minin I. V., Minin O. V., Delgado-Notario J. A., Calvo-Gallego J., Velázquez-Perez J. E., Ferrando-Bataller M., Meziani Y. M. Improvement of a terahertz detector performance using the terajet effect in a mesoscale dielectric cube: proof of concept // *Physica Status Solidi (RRL) – Rapid Research Letters*. – 2020.

22. Hai Huy Nguyen Pham, Shintaro Hisatake, Minin I. V., Minin O. V., Tadao Nagatsuma. Three-dimensional direct observation of Gouy phase shift in a terajet produced by a dielectric cuboid // *Applied Physics Letters*. – 2016. – Vol. 108. – P. 191102. – DOI 10.1063/1.4949014.
23. Minin I. V., Minin O. V., Katyba G. M., Chernomyrdin N. V., Kurlov V. N., Zaytsev K. I., Yue L., Wang Z., Christodoulides D. N. Experimental observation of a photonic hook // *APL*. – 2019. – Vol. 114 (3). – P. 031105.
24. Krupenkin T., Yang S., Mach P. Tunable liquid microlens // *Applied Physics Letters*. – 2003. – Vol. 82 (3). – P. 316–318.
25. Hassan A. M., El-Shenawee M., Review of Electromagnetic Techniques for Breast Cancer Detection // *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*. – 2011. – Vol. 4. – P. 103–118. – DOI 10.1109/RBME.2011.2169780.
26. Joisel, A., Mallorqui, J. J., Broquetas, A., Geffrin, J., Joachimowicz, N., Vall-Llossera, M., Vall-Llossera, M., Jofre, L., Bolomey, J. Microwave imaging techniques for biomedical applications // *Proceedings of the 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC-1999*. – Venecia: Vincenzo Piuri and Mario Savino, 1999. – P. 1591–1596. – DOI 10.1109/IMTC.1999.776093.
27. Минин И. В., Минин О. В., Yue L. Электромагнитные свойства пирамид с позиций фотоники // *Изв. вузов. Физика*. – 2019. – Т. 62, № 10 (742). – С. 12–18.
28. Calvo-Gallego J., Delgado-Notario J. A., Minin O. V., El Hadj A., Ferrando-Bataller M., Fobelets K., Velázquez-Pérez J. E., Minin I. V., Meziani Y. M. Enhancing resolution of terahertz imaging systems below the diffraction limit // *Optics & Laser Technology*. – 2023. – Vol. 164. – P. 109540. – DOI 10.1016/j.optlastec.2023.109540.
29. Calvo-Gallego J., Delgado-Notario J. A., Minin O. V., El Hadj A., Ferrando-Bataller M., Fobelets K., Velázquez-Pérez J. E., Minin I. V., Meziani Y. M. Resolution Enhancement of Terahertz Imaging Systems Below the Diffraction Limit by Using the Terajet Effect // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2022.
30. Минин О. В., Минин И. В. Терагерцовый микроскоп с наклонным субволновым освещением: принцип построения // *Квантовая электроника*. – 2022. – Т. 52 (1). – С. 13–16.
31. Минин И. В., Минин О. В. Фотоника изолированных диэлектрических частиц произвольной трехмерной формы – новое направление оптических информационных технологий // *Вестник НГУ. Сер. Информационные технологии*. – 2014. – Т. 12, вып. 4. – С. 59–70.
32. Minin I. V., Minin O. V., Geintz Y. E. Localized EM and photonic jets from non-spherical and non-symmetrical dielectric mesoscale objects: brief review // *Annalen der Physik (AdP)*. – 2015. – Vol. 527 (7-8). – P. 491.
33. Liu C-Y., Minin O. V., Minin I. V. First experimental observation of array of photonic jets from saw-tooth phase diffraction grating // *Europhysics Letters*. – 2018. – Vol. 123. – P. 5403. – DOI 10.1209/0295-5075/123/54003.
34. Yue L., Yan B., Monks J. N., Dhama R., Wang Z., Minin O. V., Minin I. V. Intensity-Enhanced Apodization Effect on an Axially Illuminated Circular-Column Particle-Lens // *Annalen der Physik*. – 2017. – Vol. 530 (2). – DOI 10.1002/andp.201700384.
35. Minin I. V., Minin O. V. Brief Review of Acoustical (Sonic) Artificial Lenses // *Proceedings of the 13th International Scientific Technical Conference «On actual problems of electronic instrument Engineering (APEIE)»*–39281 (Novosibirsk, October 3-6, 2016). – Novosibirsk, 2016. Vol. 1. – P. 136–137. – DOI 10.1109/APEIE.2016.7802234.
36. Minin I. V., Minin O. V. Acoustojet: acoustic analogue of photonic jet phenomenon [Electronic resource]. – Mode of access: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1604/1604.08146.pdf>.
37. Minin O. V., Minin I. V. Acoustojet: acoustic analogue of photonic jet phenomenon based on penetrable 3D particle // *Optical and Quantum Electronics*. – 2017. – Vol. 49 (2). – DOI 10.1007/s11082-017-0893-y.
38. Минин И. В., Минин О. В., Цзюньхуэй Ху. Акустические мезоразмерные и дифракционные линзы. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – 294 с.

39. Rubio C., Tarrazo-Serrano D., Minin O. V., Uris A., Minin I. V. Acoustical hook: a new subwavelength self-bending beam // *Results in Physics*. – 2020. – Vol 16. – P. 102921.
40. Rubio C., Tarrazó-Serrano D., Minin O. V., Uris A., Minin I. V. Sound Focusing of Wavelength Scale Gas-Filled Flat Lens (CO₂ concentration) // *Europhysics letters*. – 2018. – Vol. 123 – P. 64002.
41. Tarrazó-Serrano D., Rubio C., Minin O. V., Uris A., Minin I. V. Ultrasonic focusing with mesoscale polymer cuboid // *Ultrasonics*. – 2020. – Vol. 106. – P. 106143.
42. Rubio C., Tarrazó-Serrano D., Minin O. V., Uris A., Minin I. V. Enhancement of pupil-masked wavelength-scale gas-filled flat acoustic lens based on anomaly apodization effect // *Physics Letters A*. – 2019. – Vol. 383. – P. 396–399.
43. Rubio C., Tarrazó-Serrano D., Minin O. V., Uris A., Minin I. V. Wavelength-Scale Gas-Filled Cuboid Acoustic Lens With Diffraction Limited Focusing // *Results in Physics*. – 2019. – Vol. 12. – P. 1905–1908.
44. Castiñeira-Ibáñez S., Tarrazó-Ibáñez D., Candelas P., Minin O. V., Rubio C., Minin I. V. 3D sound wave focusing by 2D internal periodic structure of 3D external cuboid shape // *Results in Physics*. – 2019. – Vol. 15. – P. 102582.
45. Lampsijärvi E., Minin I. V., Minin O. V., Mäkinen J., Wikstedt R., Hægström E., Salmi A. Selieren Visualization of Anisotropic Dual Slanted Plate Mesoscale Lens Action for Ultrasound // 2022 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS) (10-13 October 2022). – Venice, Italy: IEEE. – DOI 10.1109/IUS54386.2022.9957567.
46. Минин И. В., Минин О. В., Джоу С., Баранов П. Дифракционно-ограниченная фокусировка звуковых волн мезоразмерной плоской янус-линзой // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2023. – Т. 117, вып. 10. – С. 727–733.
47. Романов В. П., Ульянов С. В. Анизотропия скорости звука в нематической фазе жидких кристаллов // *Акустический журнал*. – 1991. – Т. 37, Вып. 2. – С. 386–394.
48. Кашицын А. С. Акустическая и диэлектрическая релаксация в жидких кристаллах // *Вестник Нижегородского ун-та им. Н. И. Лобачевского*. – 2008. – № 6. – С. 53–58.
49. Pérez-López S., Candelas P., Fuster J. M., Rubio C., Minin O. V., Minin I. V. Liquid–liquid core–shell configurable mesoscale spherical acoustic lens with subwavelength focusing // *Applied Physics Express*. – 2019. – Vol. 12. – P. 087001.
50. Minin I. V., Tang Q., Bhuyan S., Hu J., Minin O. V. A Method to Improve the Resolution of the Acoustic Microscopy [Electronic resource]. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1712.01638>.
51. Pérez-López S., Fuster J. M., Minin I. V., Minin O. V., Candelas P. Tunable subwavelength ultrasound focusing in mesoscale spherical lenses using liquid mixtures // *Scientific Reports*. – (2019). – Vol. 9. – P. 13363.
52. Minin I., Minin O. Mesoscale Acoustical Cylindrical Superlens // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 155. – P. 01029. – DOI 10.1051/mateconf/201815501029.
53. Liang B., Yuan B., Cheng J.-Ch. Acoustic Diode: Rectification of Acoustic Energy Flux in One-Dimensional Systems // *Physical Review Letters* – 2009. – Vol. 103. – P. 104301. – DOI 10.1103/PhysRevLett.103.104301.
54. Liang B., Guo X. S., Tu J., Zhang D., Cheng J. C. An acoustic rectifier // *Nature Materials*. – 2010. – Vol 9. – P. 989–992. – DOI 10.1038/nmat2881.

Об авторах

Игорь Владиленивич Минин – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института стратегического развития.

Олег Владиленивич Минин – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института стратегического развития.

Получено 23.05.2023

© И. В. Минин, О. В. Минин, 2024

Optics of nanoscale dielectric particles. Review. Part 2. Electromagnetic range. Acoustics

I. V. Minin¹, O. V. Minin¹✉

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: profolegm@gmail.com

Abstract. The article provides an overview of a new scientific direction devoted to the optics of dielectric mesosized particles for optical, ultrahigh frequency ranges and acoustics. Materials with relatively small refractive indices ($n < 2$), such as glass, quartz, polymers, some types of ceramics, etc., are the main materials for most optical components (lenses, optical fibers, etc.). In this review, we present some phenomena and possible applications resulting from the interaction of light with particles with a refractive index of less than 2. We will also discuss some other particle geometries (spheroidal, cubic, etc.) and various configurations of particles (isolated or interacting) and review possible applications of such materials in connection with improving the field of view, high-resolution nanoscopy. The main applications of such particles are considered, including the use of new focusing devices – dielectric and sound-conducting particles forming "photon jets" and "photon hooks". The effect of superresonance and the formation of strong magnetic fields in dielectric particles are considered.

Keywords: dielectric mesoscale particle, "photon jet", "photon hook", Mi theory, diffraction, interference, spatial resolution, laser structuring, optical nanoscope, superresonance, mesoscale dielectric antenna, acoustic jet, acoustic hook, mesoscale cuboid

REFERENCES

1. Zhao, L., & Ong, C. K. (2009). Direct observation of photonic jets and corresponding backscattering enhancement at microwave frequencies. *Journal of Applied Physics*, Vol. 105.
2. Heifetz, A., Huang, K., Sahakian, A. V., Li, X., Taflove, A., & Backman, V. (2006). Experimental confirmation of backscattering enhancement induced by a photonic jet. *Applied Physics Letters*, 89, P. 221118.
3. Kong, S. C., Sahakian, A. V., Heifetz, A., Taflove, A., & Backman, V. (2008). Robust detection of deeply subwavelength pits in simulated optical data-storage disks using photonic jets. *Applied Physics Letters*, 92, P. 200863. DOI 10.1063/1.2936993.
4. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2021). Detectors of millimeter and terahertz radiation. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 26(4), 160–175 [in Russian].
5. Pacheco-Peña, V., Beruete, M., Minin, I. V., & et al. (2014). Terajets produced by dielectric cuboids. *Applied Physics Letters*, 105(8), P. 084102.
6. Pacheco-Peña, V., Beruete, M., Minin, I. V., & et al. (2015). Multifrequency focusing and wide angular scanning of terajets. *Optics Letters*, 40(2), 245–248.
7. Pham, H. H. N., Hisatake, S., Minin, O. V., & et al. (2017). Asymmetric phase anomaly of terajet generated from dielectric cube under oblique illumination. *Applied Physics Letters*, 110(20), P. 201105.
8. Minin, I. V., Minin, O. V., Pacheco-Peña, V., & et al. (2015). All-dielectric periodic terajet waveguide using an array of coupled cuboids. *Applied Physics Letters*, 106(25), P. 254102.
9. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2015). *Kvazioptika: sovremennyye tendentsii razvitiya [Quasi-optics: modern development trends]*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 163 p. [in Russian].
10. Minin, I. V., Minin, O. V., & Karpik, A. P. (2015). *Fotonnyye nanostrui, terastrui i akustostrui v nauke i tekhnike [Photonic nanojet, terajet and acoustic jets in science and technology]*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 170 p. [in Russian].

11. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2017). Photonic jets in science and technology. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(2), 212–234 [in Russian].
12. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2016). *Diffraction optics and nanophotonics: Resolution below the diffraction limit*. Springer. Retrieved from <http://www.springer.com/us/book/9783319242514#aboutBook>.
13. Pacheco-Peña, V., Beruete, M., Minin, I. V., & Minin, O. V. (2015). Multifrequency focusing and wide angular scanning of terajets. *Optics Letters*, 40(2).
14. Minin, I. V., Minin, O. V., Pacheco-Peña, V., & Beruete, M. (2015). Localized photonic jets from flat, three-dimensional dielectric cuboids in the reflection mode. *Optics Letters*, 40(10), 2329–2332.
15. Yue, L., Yan, B., Monks, J., Wang, Z., Tung, N. T., Lam, V. D., Minin, O. V., & Minin, I. V. (2018). A millimetre-wave cuboid solid immersion lens with intensity-enhanced amplitude mask apodization. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 39(6), 546–552.
16. Qu, Q., Liu, H., Zhu, D., Yang, M., Cui, B., Feng, Sh., & Yang, Yu. (2018). Terajet effect of dielectric sphere and THz imaging. *Proceedings Infrared, Millimeter-Wave, and Terahertz Technologies V, 10826*, P.1082606. DOI 10.1117/12.2500909.
17. Zh. Yang, Qingshan Qu, Menghan Yang, Bin Cui, Zhenwei Zhang, & Yuping Yang. (2019). Propagation characteristics of high-throughput terajet beam and its super Resolution THz imaging. *44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* (P. 19080016). DOI 10.1109/IRMMW-THz.2019.8874459.
18. Calvo-Gallego, J., Delgado-Notario, J. A., Minin, O. V., El Haj, A., Ferrando-Bataller, M., Fobelets, K., Velázquez-Pérez, J. E., Minin, I. V., & Meziani, Y. M. (2022). Resolution Enhancement of Terahertz Imaging Systems Below the Diffraction Limit by Using the Terajet Effect. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.
19. Samura, Y., Horio, K., Antipov, V., Shipilov, S., Ereemeev, A., Minin, O. V., Minin, I. V., & Hisatake, Sh. Characterization of Mesoscopic Dielectric Cuboid Antenna at Millimeter-wave Band. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. DOI 10.1109/LAWP.2019.2930820.
20. Minin, I. V., Minin, O. V., Sanchez, J. S., Delgado-Notario, J. A., Diez Fernandez, E., Calvo-Gallego, J., Ferrando-Bataller, M., Velazquez-Pierez, J. E., & Meziani, Y. M. (2021). Responsivity enhancement of a Strained Silicon Field Effect Transistor detector at 0.3 THz using the terajet effect. *Optics Letters*, 46(13), 3061–3064.
21. Minin, I. V., Minin, O. V., Delgado-Notario, J. A., Calvo-Gallego, J., Velázquez-Perez, J. E., Ferrando-Bataller, M., & Meziani, Y. M. (2020). Improvement of a terahertz detector performance using the terajet effect in a mesoscale dielectric cube: proof of concept. *Physica Status Solidi (RRL) – Rapid Research Letters*.
22. Hai Huy Nguyen Pham, Shintaro Hisatake, Minin, I. V., Minin, O. V., & Tadao Nagatsuma. (2016). Three-dimensional direct observation of Gouy phase shift in a terajet produced by a dielectric cuboid. *Applied Physics Letters*, 108, P. 191102. DOI 10.1063/1.4949014.
23. Minin, I. V., Minin, O. V., Katyba, G. M., Chernomyrdin, N. V., Kurlov, V. N., Zaytsev, K. I., Yue, L., Wang, Z., & Christodoulides, D. N. (2019). Experimental observation of a photonic hook. *APL*, 114(3), P. 031105.
24. Krupenkin, T., Yang, S., & Mach, P. (2003). Tunable liquid microlens. *Applied Physics Letters*, 82(3), 316–318.
25. Hassan, A. M., & El-Shenawee, M. (2011). Review of Electromagnetic Techniques for Breast Cancer Detection. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 4, 103–118. DOI 10.1109/RBME.2011.2169780.
26. Joisel, A., Mallorqui, J. J., Broquetas, A., Geffrin, J., Joachimowicz, N., Vall-Llossera, M., Vall-Llossera, M., Jofre, L., & Bolomey, J. (1999). Microwave imaging techniques for biomedical applications. *Proceedings of the 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC-1999* (pp. 1591–1596). Venecia: Vincenzo Piuri and Mario Savino. DOI 10.1109/IMTC.1999.776093.
27. Minin, I. V., Minin, O. V., & Yue, L. (2019). Electromagnetic properties of pyramids from the standpoint of photonics. *Izvestiya vuzov. Fizika, Vol. 62, No. 10(742)*, 12–18 [in Russian].

28. Calvo-Gallego, J., Delgado-Notario, J. A., Minin, O. V., El Hadj, A., Ferrando-Bataller, M., Fobelets, K., Velázquez-Pérez, J. E., Minin, I. V., & Meziani, Y. M. (2023). Enhancing resolution of terahertz imaging systems below the diffraction limit. *Optics & Laser Technology*, 164, P. 109540. DOI 10.1016/j.optlastec.2023.109540.
29. Calvo-Gallego, J., Delgado-Notario, J. A., Minin, O. V., El Hadj, A., Ferrando-Bataller, M., Fobelets, K., Velázquez-Pérez, J. E., Minin, I. V., & Meziani, Y. M. (2022). Resolution Enhancement of Terahertz Imaging Systems Below the Diffraction Limit by Using the Terajet Effect. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.
30. Minin, O. V., & Minin, I. V. (2022). Terahertz microscope with inclined subwavelength illumination: the principle of construction. *Kvantovaya Elektronika [Quantum Electronics]*, 52(1), 13–16 [in Russian].
31. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2014). Photonics of isolated dielectric particles of arbitrary three-dimensional shape – a new direction of optical information technologies. *Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnye tekhnologii [Vestnik NSU. Series: Information Technologies]*, 12(4), 59–70 [in Russian].
32. Minin, I. V., Minin, O. V., & Geintz, Y. E. (2015). Localized EM and photonic jets from non-spherical and non-symmetrical dielectric mesoscale objects: brief review. *Annalen der Physik (AdP)*, 527(7-8), P. 491.
33. Liu, C-Y., Minin, O. V., & Minin, I. V. (2018). First experimental observation of array of photonic jets from saw-tooth phase diffraction grating. *Europhysics Letters*, 123, P. 5403. DOI 10.1209/0295-5075/123/54003.
34. Yue, L., Yan, B., Monks, J. N., Dhama, R., Wang, Z., Minin, O. V., & Minin, I. V. (2017). Intensity-Enhanced Apodization Effect on an Axially Illuminated Circular-Column Particle-Lens. *Annalen der Physik, Vol. 530(2)*. DOI 10.1002/andp.201700384.
35. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2016). Brief Review of Acoustical (Sonic) Artificial Lenses. *Proceedings of the 13th International Scientific Technical Conference "On actual problems of electronic instrument Engineering (APEIE)"–39281: Vol. 1* (pp. 136–137). Novosibirsk. DOI 10.1109/APEIE.2016.7802234.
36. Minin, I. V., & Minin, O. V. Acoustojet: acoustic analogue of photonic jet phenomenon Retrieved from <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1604/1604.08146.pdf>.
37. Minin, O. V., & Minin, I. V. (2017). Acoustojet: acoustic analogue of photonic jet phenomenon based on penetrable 3D particle. *Optical and Quantum Electronics*, 49(2). DOI 10.1007/s11082-017-0893-y.
38. Minin, I. V., Minin, O. V., & Junhui Hu. (2020). *Akusticheskie mezorazmernye i difraktsionnye linzy [Acoustic mesoscale and diffraction lenses]*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 294 p. [in Russian].
39. Rubio, C., Tarrazo-Serrano, D., Minin, O. V., Uris, A., & Minin, I. V. (2020). Acoustical hook: a new subwavelength self-bending beam. *Results in Physics*, 16, P. 102921.
40. Rubio, C., Tarrazó-Serrano, D., Minin, O. V., Uris, A., & Minin, I. V. (2018). Sound Focusing of Wavelength Scale Gas-Filled Flat Lens (CO2 concentration). *Europhysics letters*, 123, P. 64002.
41. Tarrazó-Serrano, D., Rubio, C., Minin, O. V., Uris, A., & Minin, I. V. (2020). Ultrasonic focusing with mesoscale polymer cuboid. *Ultrasonics*, 106, P. 106143.
42. Rubio, C., Tarrazó-Serrano, D., Minin, O. V., Uris, A., & Minin, I. V. (2019). Enhancement of pupil-masked wavelength-scale gas-filled flat acoustic lens based on anomaly apodization effect. *Physics Letters A*, 383, 396–399.
43. Rubio, C., Tarrazó-Serrano, D., Minin, O. V., Uris, A., & Minin, I. V. (2019). Wavelength-Scale Gas-Filled Cuboid Acoustic Lens with Diffraction Limited Focusing. *Results in Physics*, 12, 1905–1908.
44. Castiñeira-Ibáñez, S., Tarrazó-Ibáñez, D., Candelas, P., Minin, O. V., Rubio, C., & Minin, I. V. (2019). 3D sound wave focusing by 2D internal periodic structure of 3D external cuboid shape. *Results in Physics*, 15, P. 102582.
45. Lampsijärvi, E., Minin, I. V., Minin, O. V., Mäkinen, J., Wikstedt, R., Hæggeström, E., & Salmi, A. (2022). Sclieren Visualization of Anisotropic Dual Slanted Plate Mesoscale Lens Action for

Ultrasound. 2022 *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*. Venice, Italy: IEEE. DOI 10.1109/IUS54386.2022.9957567.

46. Minin, I. V., Minin, O. V., Song Zhou, & Baranov, P. (2023). Diffraction-limited focusing of sound waves by a mesoscale plane Janus lens. *Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki [Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics]*, 117(10), 727–733 [in Russian].

47. Romanov, V. P., & Ulyanov, S. V. (1991). Anisotropy of the speed of sound in the nematic phase of liquid crystals. *Akusticheskiy zhurnal [Acoustic Journal]*, 37(2), 386–394 [in Russian].

48. Kashitsyn, A. S. (2008). Acoustic and dielectric relaxation in liquid crystals. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo [Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N.I. Lobachevsky]*, 6, 53–58 [in Russian].

49. Pérez-López, S., Candelas, P., Fuster, J. M., Rubio, C., Minin, O. V., & Minin, I. V. (2019). Liquid–liquid core–shell configurable mesoscale spherical acoustic lens with subwavelength focusing. *Applied Physics Express*, 12, P. 087001.

50. Minin, I. V., Tang, Q., Bhuyan, S., Hu, J., & Minin, O. V. A Method to Improve the Resolution of the Acoustic Microscopy. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1712.01638>.

51. Pérez-López, S., Fuster, J. M., Minin, I. V., Minin, O. V., & Candelas, P. (2019). Tunable subwavelength ultrasound focusing in mesoscale spherical lenses using liquid mixtures. *Scientific Reports*, 9, P. 13363.

52. Minin, I., & Minin, O. (2018). Mesoscale Acoustical Cylindrical Superlens. *MATEC Web of Conferences*, 155, P. 01029. DOI 10.1051/mateconf/201815501029.

53. Liang, B., Yuan, B., & Cheng, J.-Ch. (2009). Acoustic Diode: Rectification of Acoustic Energy Flux in One-Dimensional Systems. *Physical Review Letters*, 103, P. 104301.

54. DOI 10.1103/PhysRevLett.103.104301.

55. Liang, B., Guo, X. S., Tu, J., Zhang, D., & Cheng, J. C. (2010). An acoustic rectifier. *Nature Materials*, 9, 989–992. DOI 10.1038/nmat2881.

Author details

Igor V. Minin – D. Sc., Chief Researcher, Institute of Strategic Development.

Oleg V. Minin – D. Sc., Chief Researcher, Institute of Strategic Development.

Received 23.05.2023

© I. V. Minin, O. V. Minin, 2024