

# ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 535.016:535.361:535.393  
DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-1-139-163

## Оптика мезоразмерных диэлектрических частиц. Обзор. Часть 1. Оптика

*И. В. Минин<sup>1</sup>, О. В. Минин<sup>1\*</sup>*

<sup>1</sup> 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 (сферoidalные, кубические и т. д.) и различные конфигурации частиц (изолированные или взаимодействующие) и 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».

**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

### *Введение*

Взаимодействие излучения видимого и инфракрасного диапазонов с прозрачными сферами достаточно хорошо изучено и известно давно [1–5], было известно их фокусирующее действие. Внимание ученых прозрачные сферические частицы привлекли внимание больше чем двух тысячелетий назад. Например, люди знали, что нельзя поливать растения в солнечный день, так как маленькие капли воды на листьях могут вызвать ожог листьев, рис. 1.

Свойство линз концентрировать солнечные лучи издавна привлекало внимание древних. Вместо трудоемкой процедуры добывания огня трением или высеканием искры с помощью кремния был открыт гениальный по простоте способ зажигания огня с помощью линзы из горного хрусталя.



Рис. 1. Капля воды как микролинза

Этот способ упоминается в мифе о титане Прометее, похитившем для людей огонь с Олимпа вопреки воли Зевса. Жрецы использовали «зажигательные стекла» для лечебных

прижиганий, например в святилище бога врачевания Асклепия в Эпидавре [4].

Еще раньше времен Эвклида было известно замечательное действие стеклянных шаров. Так, драматург Аристофан, современник Сократа, советует должнику растопить долговое обязательство, написанное на восковой дощечке, с помощью зажигательного стекла [5].

В своей «Естественной истории» Плиний описывает трудоемкую работу с миниатюрными предметами, которой занимались Каликрат и Мирмекид, два древнеримских художника и ремесленника, примерно в таких словах: «Каликрату удавалось изготавливать модели муравьев и других крошечных созданий, чьи части тела оставались невидимыми для остальных людей. Некий Мирмекид заслужил себе славу в той же области, сделав маленькую повозку с четырьмя лошадьми из такого же материала, столь крошечную, что ее могла закрыть своим крылышком муха, и такого же размера корабль». Известно упоминание о миниатюрной копии «Илиады», выполненной на столь малом куске пергамента, что вся книга могла поместиться в ореховой скорлупе, о чем первым говорит Цицерон, автор предыдущего столетия. Парадоксальным образом мелкие кристаллические сферы, изготавливаемые римлянами и используемые ими в качестве линз, при наполнении их водой, были расписаны как сосуды для косметики и парфюмерии [6].

Среди находок древних линз упоминаются таинственные сферы друидов, относящиеся ко II тысячелетию до н. э. и вызывающие восхищение своим геометрическим совершенством. Эти магические шары из кварца, окутанные мистическими легендами, широко представлены в археологических собраниях, упоминаются во многих древних литературных источниках [7] и даже нашли свое отражение в живописи, примером чему может служить приведенный на рис. 2 фрагмент картины Э. Пойнтера «Предсказательница», 1877 г. (Королевская Академия художеств, Лондон, Великобритания).

Древние греки заполняли стеклянные колбы водой, чтобы получить линзы. Персидский математик и оптик Ибн Сахл (940–1000) в своей работе открыл закон преломления,

математически эквивалентного закону Пойнтера [3, 8].

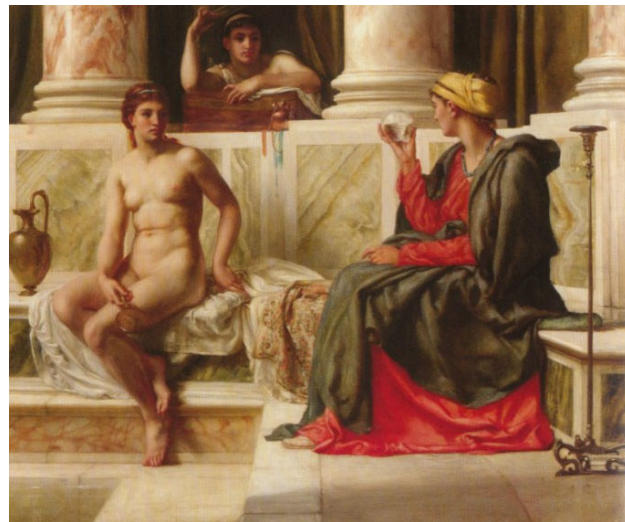


Рис. 2. Фрагмент картины Э. Пойнтера «Предсказательница», 1877 г.

Он использовал свой закон преломления для вычисления формы линз и зеркал, которые фокусируют свет в единственной точке на оптической оси. Английский ученый Томас Харриот (Англия, 1569–1621), фактически повторил это открытие.

Английский епископ Роберт Гроссетест (1175–1253) описал фокусирующие свойства сферической линзы (сферический стеклянный сосуд, заполненный водой) [1–3, 9].

Если задаться коэффициентом преломления  $N$ , то можно определить расстояние от центра шара с радиусом  $R$  до области фокусировки  $F$ :

$$F = \frac{(NR)}{2(N-1)}.$$

Изучение свойств фотонной струи – области фокусировки излучения, возникающей непосредственно на теневой границе мезоразмерной диэлектрической частицы (продольные и поперечные размеры, интенсивность, влияние размеров и коэффициента преломления частицы и т. д.) производится на основе решения уравнения Максвелла. Для сферических частиц точное решение уравнения Максвелла дается теорией Ми [10].

Из теории Ми известно, что оптическое поле как внутри, так и вне слабо поглощающей сферы, освещенной световой волной, характеризуется наличием пространственных зон фокусировок, называемых внутренними и внешним фокусами поля. Их появление обусловлено кривизной поверхности сферической частицы, приводящей к соответствующим деформациям падающего на частицу фазового волнового фронта. Сферическая микрочастица, таким образом, выполняет роль рефракционной сферической микролинзы, фокусирующей световое излучение в пределах субволнового объема [1, 3, 11]. Взаимодействие аберрированных участков волнового поля внутри диэлектрической частицы носит сложный характер и зависит, в частности, от формы частицы, характеристик ее материала, параметра Ми частицы и т. п.

Историю микроскопии, в принципе, можно описать в одном абзаце [12–14]. Если под микроскопом понимать устройство, позволяющее рассматривать мелкие объекты с увеличением, то такое устройство было известно задолго до открытия Ханса и Захария Янсенов в 1590 г. [12, 13]. Еще Сенека (4 г. до н. э. – 65 г. н. э.) писал об увеличивающем эффекте стеклянной сферы, если смотреть сквозь нее на текст с маленькими буквами. Для Галилея изобретение микроскопа в 1609 г. явилось некоторой технической модификацией телескопа. Легенда говорит о том, что желая усовершенствовать телескоп, он использовал короткофокусную линзу и в результате увидел в подзорную трубу увеличенную муху. Пятьдесят лет спустя Роберт Гук с помощью микроскопа открыл клеточное строение биологических структур и описал глаз блохи. Кстати, Гук использовал в своем микроскопе подсветку с помощью стеклянного шара, наполненного водой. В 1674 г. Левенгук создал короткофокусный микроскоп (размер линзы менее одного миллиметра) с увеличением в 300–500 раз, что позволило ему впервые наблюдать бактерии.

Наконец, в 1866 г. Эрнст Аббе сформулировал теорию предельного разрешения микроскопа (дифракционный предел), согласно которой свет не может быть сфокусирован в пятно с радиусом меньше, чем

$$r_D = \frac{\lambda}{2n \sin \theta}.$$

Здесь  $\lambda$  – длина волны света,  $n \sin \theta$  – числовая апертура,  $n$  – показатель преломления среды. Для зеленого света  $\lambda = 500$  нм в вакууме предел разрешения составляет 250 нм. Аббе писал, что «возможности нашего органа зрения ограничены самой природой света, и эта граница не может быть превзойдена с помощью всего арсенала современного естествознания...». В 1906 г. Зигмонди (R. A. Zsigmondy) разрабатывает метод темнопольной микроскопии, а Синг (E. H. Syngé) в 1928 г. предлагает идею ближнепольного оптического микроскопа.

Аналогичное выражение для дифракционного предела можно непосредственно получить из принципа неопределенности Гейзенберга для импульса и координаты [13]:  $\Delta x_i \Delta p_i \geq \hbar/2$ . Из этого же принципа Гейзенберга следует возможность локализации поля на масштабах, меньших дифракционного предела, если обеспечить быстрое затухание интенсивности в перпендикулярном направлении. Важно подчеркнуть, что в этом случае речь идет о локализации светлого поля на темном фоне. В принципе, можно поставить вопрос о пределе локализации темного поля на светлом фоне. При этом оказывается, что дифракционного предела для темного поля не существует: – Темноту можно фокусировать в сколь угодно малое темное пятно [13, 15].

Открытие особых фокусирующих свойств микросфер относится примерно к 2000 г. [16, 17]. В эксперименте по лазерной очистке ученые пытались удалить микро/наночастицы с плоской поверхности кремниевой пластины [17–21]. Многие из этих микро- и наночастиц имели сферическую форму, часть из которых была прозрачной. Неожиданно оказалось, что после очистки с помощью лазерного излучения на поверхности пластины образовалось несколько крошечных отверстий [22]. Эти отверстия были расположены непосредственно под сферическими частицами. Диаметры отверстий зависели от размера сферических частиц.

Для лазерной очистки это было разочарованием, так как эти отверстия рассматрива-

лись как повреждения поверхностей пластин. Чтобы предотвратить это явление, были предприняты усилия по изучению механизмов образования дырок. Эти исследования показали, что размер дырок иногда может быть меньше 100 нм, что может превышать дифракционный предел. Они располагались в областях, соответствующих центру под сферическими частицами. Теоретический анализ показал, что эти сферические частицы способны фокусировать свет в области с размерами, значительно меньшими дифракционного предела. Благодаря высокой интенсивности электромагнитного поля в области фокусировки излучения происходит абляция поверхности подложки из кремния и формируются отверстия в пластине.

На рис. 3 показан пример вида поверхности с массивом нанодоверстий, сформированных при воздействии лазерного импульса на подложку, покрытую слоем  $\text{SiO}_2$  сфер микрометрового размера. Таким образом, удается формировать отверстия нанометрового размера, вплоть до 30 нм в диаметре [23].

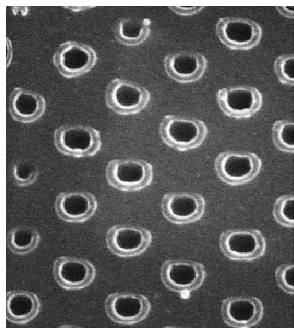


Рис. 3. Массивы дырок, сформированных с помощью воздействия фемтосекундным лазерным импульсом (FWHM = 150 фс,  $\lambda = 800$  нм) на поверхность германиевой подложки, покрытую гексагональным коллоидным монослоем сферических частиц

Лазерное воздействие на поверхность через массив сферических частиц позволяет также формировать массивы нановыступов [24, 25], нанохолмов с высотой 10–100 нм, представляющих массив наноплинз [26], рис. 4. Поверхности с нановыступами имеют многочисленные применения, в частности, в магнитной записи [27].

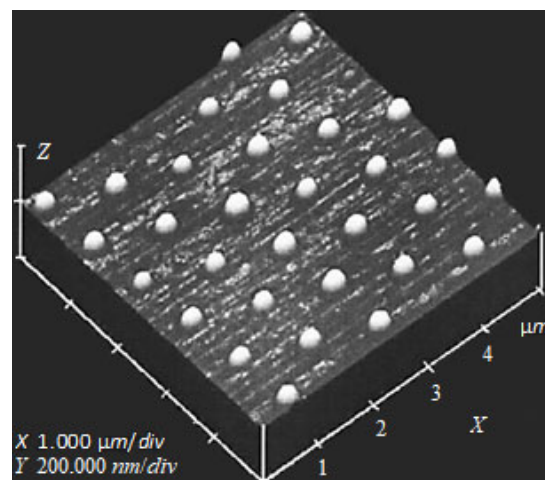


Рис. 4. Вид поверхности кремния с нановыступами, полученными при облучении кремния импульсом  $KrF$  лазера через массив диэлектрических микросфер с показателем преломления  $N = 1.6$

Микросферы вскоре были использованы в качестве мощного инструмента для нанесения рисунка на поверхность для улучшения разрешения от микро- до наноразмеров с помощью лазера [28–32].

Замечательные результаты были достигнуты с помощью внеосевого облучения захвата оптическими пинцетами и микролинзовой матрицы [28, 33–38].

Чаще всего рассматриваются частицы со сферической или цилиндрической формой поверхности, исходя из простоты их формы. Но сферическая форма поверхности не является оптимальной для формирования фотонной струи с заданными параметрами. Например, наилучшие характеристики по пространственному разрешению и протяженности области фокусировки достигнуты для полусферических и конусовидных частиц.

Фотонная струя возникает в области теневой поверхности диэлектрических микросферических частиц – в так называемой ближней зоне дифракции – и характеризуется сильной пространственной локализацией и высокой интенсивностью оптического поля в области фокусировки. Фотонные наноструи – это узкая область фокусировки, формируемая на теневой границе диэлектрической частицы с различной формой поверхности, с относительно небольшими относительными показателями

телями преломления ( $N \leq 2$ ), с протяженностью более длины волны излучения  $\lambda$  и минимальной шириной порядка  $\lambda/3 - \lambda/4$ .

Известны диэлектрические частицы, формирующие фотонную струю с конической формой поверхности [39, 40], частицы в форме кубоидов [3, 41, 42],

пирамид [41, 43], сфероидов [44–46], трапеции [47], полусферические частицы [48] и диски [49–51], они также могут действовать

как мезомасштабная линза и формировать фотонные струи.

Также было продемонстрировано формирование фотонных струй в аксиально и пространственно асимметричных диэлектрических частицах [52, 53], дифракционной решетке [54] и плазмонных структурах [55].

На рис. 5 приведены примеры мезомасштабных диэлектрических частиц, формирующих фотонную струю.

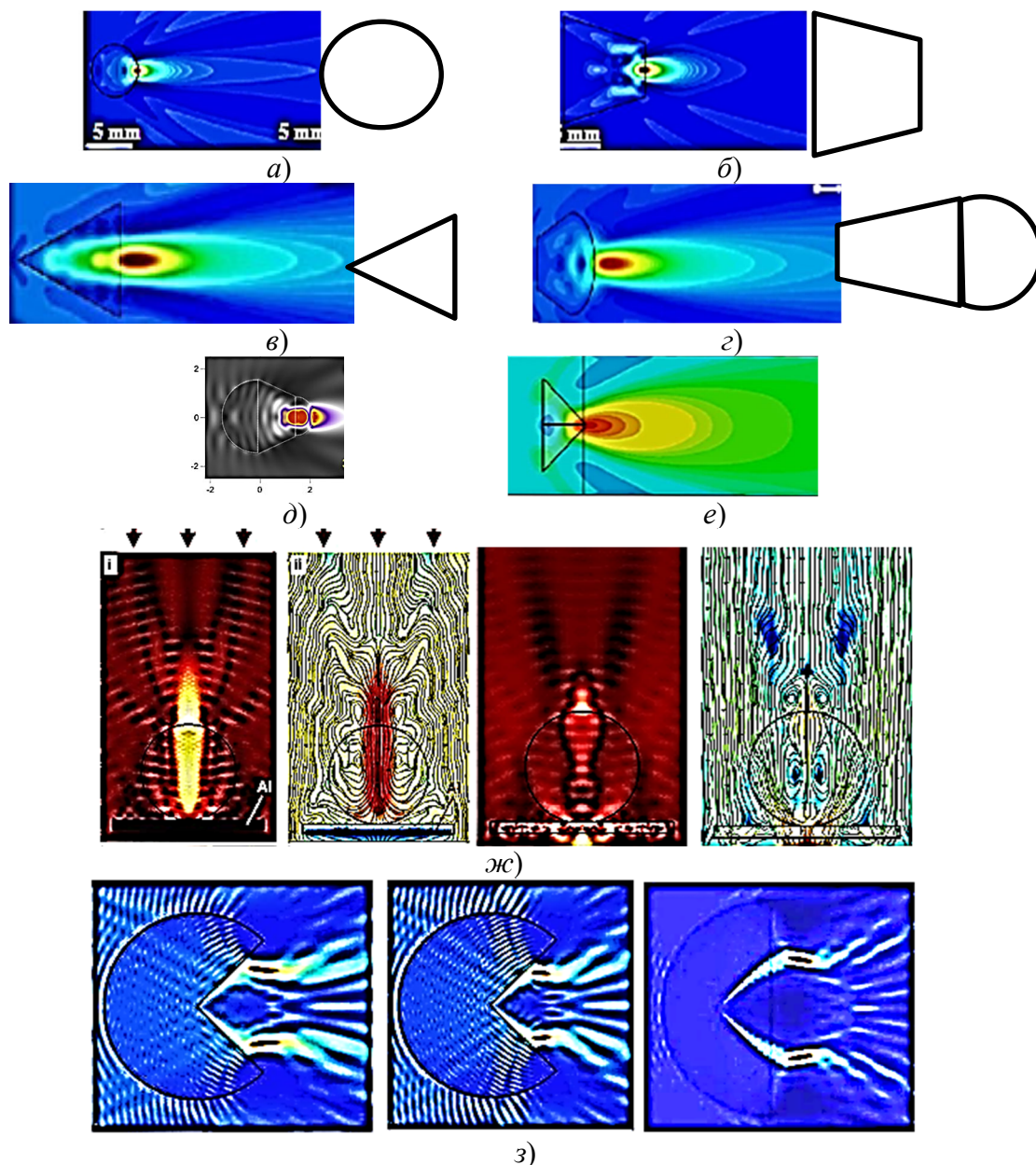


Рис. 5. Пример мезомасштабных диэлектрических частиц, формирующих фотонную струю: а) сфера; б) усеченный конус; в) конус; г) усеченный конус –полусфера; д) система полусферы и усеченного конуса; е) треугольная пирамида; ж) формирование фотонной струи в режиме на отражение диэлектрической сферой из материала с показателем преломления  $N = 1,16$  на алюминиевой подложке и диэлектрической подложке с показателем преломления  $N = 2,58$ ; з) сфера и усеченный цилиндр с коническими выемками

Устройства на основе мезомасштабных диэлектрических частичек, формирующих фотонные струи, возможно применить в устройствах для фокусировки поверхностных плазмон-поляритонов [56, 57]. Приоритет этих работ принадлежит российским ученым. В этих работах было показано, что высота кубоида является важным параметром, поскольку она влияет на величину эффективного показателя преломления. Кроме того, было показано, что контраст показателя преломления между областью с кубоидом и без него должен быть менее 2 для формирования фотонной струи на теневой поверхности кубоида. В известных устройствах расстояние, на которое возможна транспортировка поверхностных плазмон-поляритонов, принципиально ограничена длиной фотонной наноструи и не превышает нескольких длин волн. Было установлено, что на телекоммуникационной длине волны 1 550 нм расстояние распространения поверхностных плазмон-поляритонов может быть увеличено более чем в два раза (до  $\sim 19\lambda$ ) для оптимального случая, когда зазор между ними составляет  $2,5\lambda$ . Кроме того, было продемонстрировано, что на выходе каждого кубоида может быть достигнуто субволновое поперечное разрешение в области фокусировки.

### *Оптический диапазон длин волн*

Одним из важных применений оптики диэлектрических мезомасштабных частиц является лазерная очистка поверхности [58–60]. В этих работах было показано, что с помощью импульсного лазерного воздействия можно с поверхностей полупроводниковых приборов удалять металлические и диэлектрические микрочастицы субмикронных размеров. Результаты этих исследований пригодились в дальнейшем при исследовании нанобляжки [61, 62] и для формирования нанотверстий на подложке, покрытой сферическими микрочастицами [11, 63].

Первые работы по лазерному структурированию с использованием микросфер и эффекта фотонной струи были приведены в [11, 23, 64–66], хотя сам термин появился позднее [67]. В этих работах было замечено, что микросфера

увеличивает интенсивность падающего излучения вблизи зоны контакта, и она не вносит свой вклад в качестве микрообъектива в дальнем поле, а относится к оптическому резонансу в ближнем поле, поскольку расстояние между сферами и поверхностью подложки меньше длины волны падающего пучка. Это также подтвердилось в экспериментах по сухой лазерной очистке при образовании отверстий микронного размера и в экспериментах по поверхностному наноструктурированию.

Оптические диэлектрические мезомасштабные частицы широко используются в различных областях, например, таких как микроэлектроника [27, 36, 68, 69], в нанодетектировании [70], в медицине [71, 72] и в наноскопии [73, 74].

Обзоры современного состояния по формированию фотонной струи диэлектрическими частицами произвольной формы в электромагнитном спектре частот приведены в многочисленных работах, например в [1–4, 6, 7, 12, 13, 41, 52, 67, 75–85].

Основная идея состоит в том, что при прохождении излучения лазера через диэлектрическую мезоразмерную частицу за ней возникнет область ближнего поля, в которой интенсивность может превзойти интенсивность при фокусировке лазера объективом в несколько раз. При этом размер этой области заметно меньше размеров перетяжки при фокусировке лазерного излучения объективом. Диэлектрическая микрочастица в оптическом диапазоне длин волн является высокодобротным оптическим резонатором [1, 3]. Наиболее широко рассмотрено применение мезомасштабных диэлектрических частиц в системах фокусировки излучения с субволновым разрешением, микроскопах, в различных системах и устройствах оптического обнаружения и изображения нанообъектов [1, 3, 12, 13].

Наиболее ярким примером использование эффекта фотонной струи является применение его в оптическом микроскопе [86]. Появление сканирующей микроскопии на основе фотонных струй [87] улучшило характеристики конфокальной микроскопии.

Оптический микроскоп является одним из наиболее широко используемых инструментов визуализации благодаря своей большой гибкости, надежной конструкции и низкой

стоимости. Однако вскоре выяснилось, что оптический микроскоп ограничен фундаментально, а именно дифракционным пределом [88–90]. Дифракционный предел возник из волновой природы света. Для объектов с размерами, меньшими дифракционного предела, оптические микроскопы не могут его разрешить. Предел дифракции задает границу для разрешения. Для коммерческих систем разрешение порядка 0,2 мкм становится сложной задачей для обычных оптических микроскопов видимого спектра, работающих в окружающем воздухе. В настоящее время узким местом для оптических микроскопов является их способность к разрешению изображений. Это фундаментальное ограничение существовало долго, и многие люди даже верили, что невозможно преодолеть такой физической закон. Исследователи искали альтернативные решения, чтобы обойти его.

Оптический микросферический наноскоп на основе мезомасштабных диэлектрических сферических частиц был изобретен как устройство, которое может значительно повысить наблюдательную способность традиционных оптических микроскопов.

Замечательные и необычные свойства микросфер по фокусировке излучения вдохновили ученых на изучение возможности применения микросфер в качестве аналога

микролинз для получения наноизображений. В этой новаторской работе микросферы были непосредственно нанесены на образец изображения с помощью наноструктур [91]. Оказалось, что микросфера создает виртуальный образ. Наименьший разрешенный размер объекта снизился примерно до величины 50 нм. Этот результат был достигнут без какой-либо предварительной обработки образца или обработки изображений. Это послужило первым экспериментальным открытием, что дифракционный предел может быть непосредственно преодолен в оптическом микроскопе. Многие ученые повторили этот эксперимент и далее исследовали функции микросфер в различных условиях визуализации. Хотя микросферы открывали новые возможности, было обнаружено, что использование микросфер для непосредственного контакта с поверхностью образца было ограничено во многих аспектах в качестве инструмента визуализации. Дальнейшая разработка была предложена для подъема микросферы над поверхностью образца, что позволило включить режим сканирования. Эта оптимизация способствовала тому, что этот метод визуализации имел сходный процесс работы с обычными оптическими микроскопами. Разрешение в таком бесконтактном режиме было дополнительно улучшено до величины порядка 23 нм, рис. 6.

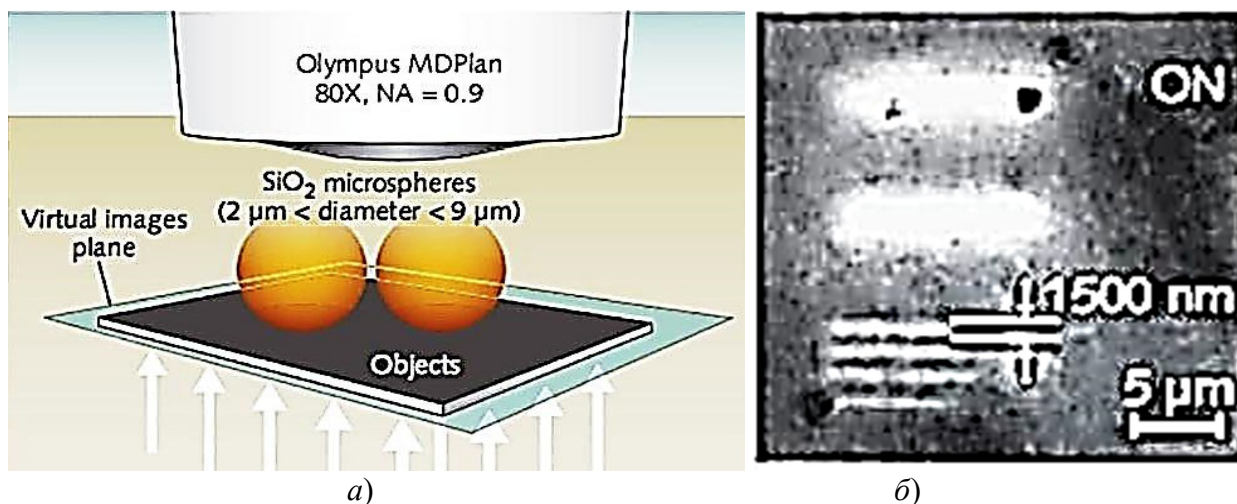


Рис. 6. Наноскоп и полученное изображение с его помощью:

а) схематическое изображение наноскопа. На различные поверхности с наноструктурами, помещены микросферы  $\text{SiO}_2$  с размером 2–9 мкм. Эти сферы собирают информацию о ближнем поле объекта и формируют виртуальные изображения, которые затем рассматриваются обычным объективом; б) изображение в оптическом наноскопе дифракционной решетки с шириной 360 нм, линии на расстоянии 130 нм друг от друга. Рисунок из работы [91]

Диэлектрические сферические и цилиндрические линзы с диаметром в микрометры могут преодолевать дифракционный барьер благодаря явлению, известному как фотонная наноструя [67, 92]. Фотонная наноструя позволяет достигать разрешения от  $\approx \lambda/6$  до  $\approx \lambda/8$  в белом свете [93, 94].

Микросфера фокусирует падающий свет в субволновое световое пятно и передает изображение ближнего поля, контактирующего с линзой объекта в мнимое изображение, которое визуализируется в объективе оптического микроскопа [95]. Сообщается о достижении разрешения в 25 нм с помощью объединения микросфер с конфокальным микроскопом [95]. Кроме того, были продемонстрированы измерения с биологическими микролинзами, как например, клетками и волокнами паутины паука [95, 96].

Чтобы улучшить качество изображения микросфер, исследователи изучили влияние различных параметров на качество изображения: диаметра линзы [97], использования иммерсионной жидкости [98, 99], погружения в эластомеры [100] и полидиметилсилоксановые пленки [101]. Свойства фотонной наноструи можно оптимизировать, подбирая показатель преломления окружающей среды [102].

Погружение микросфер с высоким показателем преломления в жидкость может существенно улучшить качество изображения.

В отличие от других методов сверхвысокого разрешения, микролинзы обеспечивают визуализацию в реальном времени при освещении белым светом, не используя меток. Эти уникальные особенности привлекли ряд групп по всему миру для исследований в этом направлении. Потенциал оптического микросферического наноскопа еще предстоит полностью раскрыть [103–108].

В работе [109] предложено совместить объектив сотового телефона с сферическими линзами. При использовании контактных сферических линз с показателем преломления, близким к 2, которые способны отображать биомедицинские и наноплазменные объекты с чрезвычайно высоким увеличением и разрешением. Используя сферические линзы, изготовленные из стекла с индексом  $n = 2,02$  при  $\lambda = 600$  нм, возможно создать микроскопическую систему на базе камеры мобильного телефона с увеличением до примерно 50 и разрешением, принципиально ограниченным на уровне  $\sim 600$  нм из-за дифракции света. Такая система может быть использована для образцов меланомы, которая демонстрирует потенциал разработки гистологии кожи без биопсии *in vivo* с использованием микроскопии смартфона со сферической линзой. На рис. 7 приведен пример визуализации ткани меланомы с помощью стандартного микроскопа с объективом  $10^x$  и с помощью смартфона со сферической линзой.

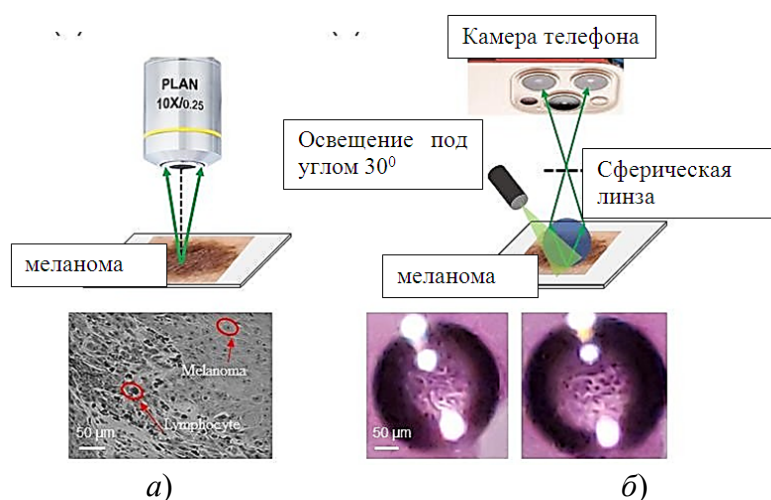


Рис. 7. Визуализация ткани меланомы с помощью:

а) стандартного микроскопа с объективом  $10^x$ ; б) схема микроскопии смартфона со сферической линзой. Из работы [109]



Сферические мезоразмерные частицы, расположенные по кольцу, могут найти применение в конфокальных микроскопах [110]. Используя восемь микросфер из  $\text{SiO}_2$  с коэффициентом преломления материала равного 1.45 на длине волны 632 нм было достигнуто пространственное разрешение порядка  $0.63\lambda$  на расстоянии порядка  $20.4\lambda$ . Схема эксперимента приведена на рис. 8.

Наиболее впечатляющим прорывом в этой области явилась возможность формировать линзы с суперразрешением в форме метаматериалов, собранных методом кластерной сборки [110]. Такие линзы позволяют видеть в обычный школьный микроскоп структуры с размером 45 нм, рис. 9.

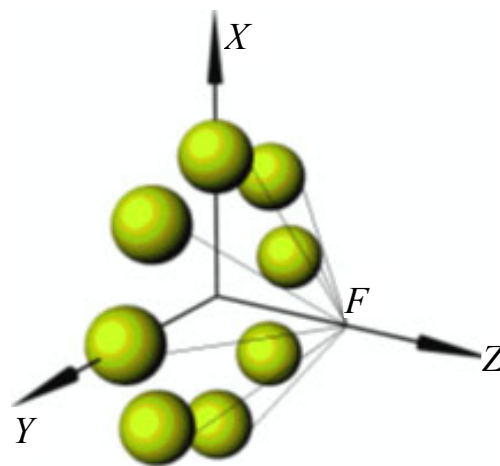


Рис. 8. Схема конфокального микроскопа на основе сферических частиц [110]

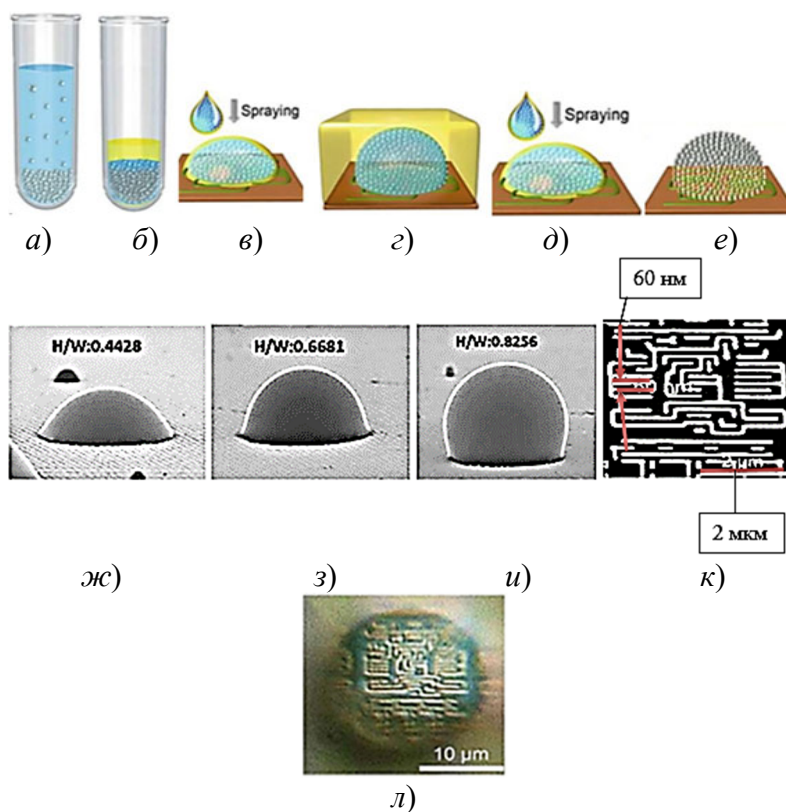


Рис. 9. Схематическое изображение процесса формирования линзы из метаматериала, собранного методом кластерной сборки:

*а)* наночастицы анатаза 15 нм  $\text{TiO}_2$  центрифугируют для получения плотного осадка; *б)* жидкость над осадком заменяют смесью из органических растворителей гексана и тетрахлорэтилена, образующих «нанотекучую фракцию» (НТФ)  $\text{TiO}_2$ ; *в)* для получения полусферического метаматериала эту НТФ осаждали в виде «капли» непосредственно на поверхность образца; *г)* для получения полусферического метаматериала эту «каплю» покрывали тонким слоем смеси органических растворителей; *д), е)* после испарения растворителя «капля» претерпевает фазовый переход с образованием метаматериала с более плотной упаковкой; *ж), з), и)* полученные линзы с различным отношением высоты к диаметру; *к)* вид части интегральной схемы с 60 нм элементами, полученный в сканирующем электронном микроскопе; *л)* вид той же самой интегральной схемы, полученный в оптическом микроскопе с помощью 15 мкм линзы из метаматериала [14]

Диэлектрические мезомасштабные частицы нашли широкое применение в различных спектральных диапазонах, но они рассматривались только в режиме формирования «фотонных струй». Однако оказалось, что в режиме резонанса у них появляются новые и неожиданные свойства [85], которые могут быть использованы, например, для поверхностного усиления комбинационного рассеяния, поверхностного усиления поглощения, генерации фотонно-магнитных наноструй, разработки магнитных нанодвигателей с гигантскими магнитными полями, в различных датчиках для измерения показателя преломления, температуры, плотности и т. д.

Оптические свойства жировой ткани (ЖТ) при физиологических температурах и условиях *in vivo* все еще недостаточно изучены. АТ состоит в основном из упакованных ячеек, близких к сферической форме. Предложена математическая модель распространения света через слои жировых клеток [111, 112]. Было показано, что резкая локальная фокусировка оптического излучения (света, локализованного вблизи теневой поверхности ячеек) и его расщепление за счет сопряжения мод шепчущей галереи зависят от оптической толщины слоя ячейки. На рис. 10 приведены результаты моделирования распространения гауссова светового пучка (ширина пучка составляет 10 мкм) через 2D-модель жировой ткани (3-слойная модель клеток при погружении в (model of interstitial fluid) ISF с  $n = 1,36$ ): двухслойная модель ткани и шестиклеточная модель ткани для симметричного и несимметричного падения светового луча. Результаты численного моделирования оптической когерентной томографии и экспериментальных исследований демонстрируют важность резкой локальной фокусировки в ЖТ для понимания его оптических свойств для физиологических условий и при нагревании ЖТ.

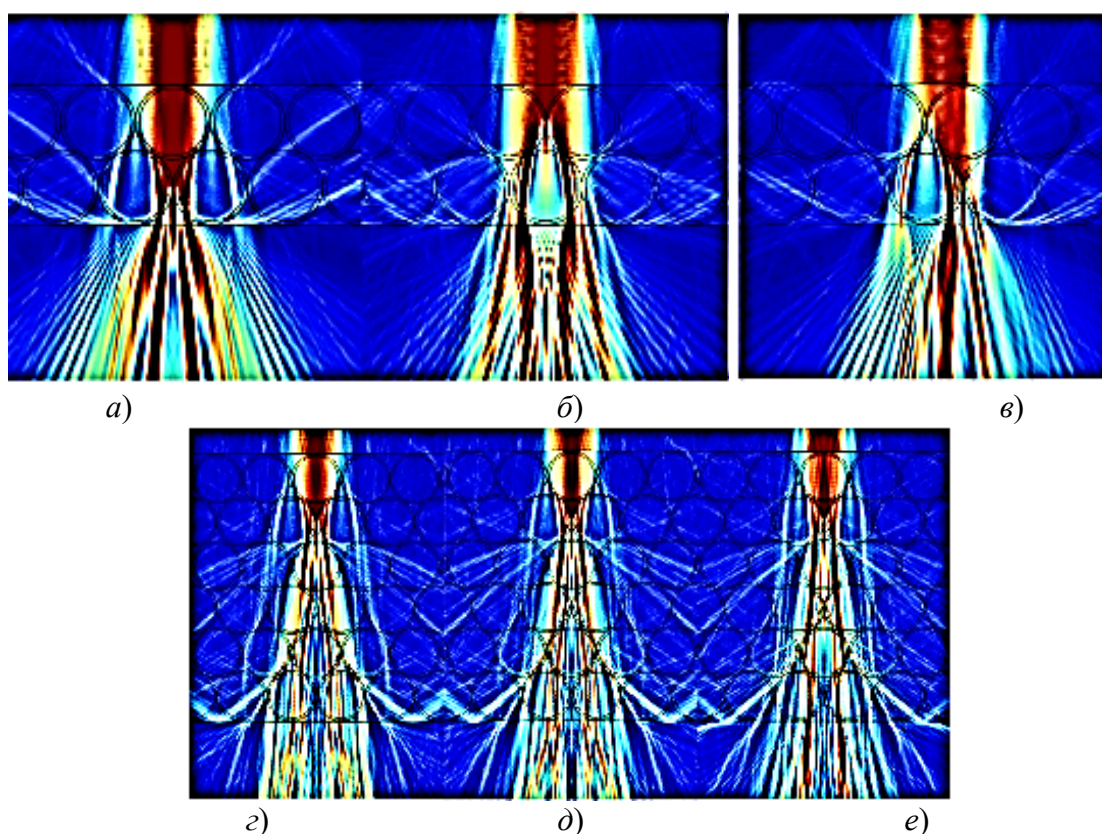


Рис. 10. Результаты моделирования распространения гауссова светового пучка (ширина пучка составляет 10 мкм) через 2D-модель жировой ткани при погружении в ISF с  $n = 1,36$ . Двухслойная модель ткани (а-в) и шестиклеточная модель ткани (г); симметричное ((а), (б) и (г)) и несимметричное падение светового луча (в); падение в центр клетки в верхнем слое (а) и (г); падение между двумя скорректированными клетками (б); модель ткани с шестиклеточным слоем (д) и (е) с падением к центру ячейки в верхнем слое при погружении в ISF с  $n = 1,38$  и  $1,40$  соответственно

Был сделан вывод, что ЖТ демонстрирует сложную оптику, которая значительно отличается от широко используемой диффузионной оптики тканей. Адекватная модель распространения света в квазиупорядоченных конгломератах жировых клеток может быть построена на основе многослойной линзовой решетки со свойствами волновода. Изменение температуры ЖТ, сжатие и использование оптических очищающих агентов позволяют эффективно управлять поведением распространения света в ЖТ. Такой контроль имеет решающее значение как для обеспечения воздействия лазерного излучения на патологические ткани, так и для органов, лежащих за слоем жировых клеток, и для получения объективной информации о результатах лазерного воздействия для создания интеллектуальных лазерных хирургических систем с обратной связью, включая роботизированные лазерные системы.

Важно отметить, что разработанная модель клеточной ткани может быть использована не только для описания ЖТ, но и для описания слоев эпителиальных клеток внутренних органов, таких как шейка матки. Кроме того, разработанная модель может быть использована для описания распространения света в пористых тканях, таких как легкие и мозговой центр. Внутренняя структура легкого разделена на большое количество мелких субъединиц (альвеолы), средний размер которых у человека соизмерим с размером жировой клетки и составляет приблизительно 200 микрон в диаметре. В отличие от жировых клеток, альвеолы заполнены воздухом, что создает серьезные проблемы для оптической визуализации, включая ОКГ, из-за высокого контраста показателя преломления между стенками альвеол и закрытой областью, заполненной воздухом. Для мозга размер пор внеклеточной среды немного меньше, чем размер адипоцитов и составляет примерно 1–4 мкм, а показатель преломления контраста не так высок. В обоих случаях показатель преломления внутри структуры ниже, чем снаружи, что влечет за собой новые сложные оптические эффекты, экспериментально наблюдаемые для мыльных пузырей при лазерном возбуждении.

Представленные результаты могут быть применены в новом и привлекательном подходе к безметочному зондированию в биологии и медицине, медицинской диагностике с использованием эффектов биолазерования жировых клеток и описанию транспортировки световых лучей в клеточных тканях.

Перестраиваемые оптические устройства представляют большой интерес, поскольку они обеспечивают возможность настройки своих функций. Темпоральная оптика – быстро развивающаяся область, которая может быть полезна как для революционирования фундаментальных исследований явлений, зависящих от времени, так и для разработки полноценных оптических устройств. В условиях растущего внимания к экологической совместимости ключевым вопросом становятся биологически чистые альтернативы. Вода в ее различных формах может открыть новые физические явления и уникальные области применения в фотонике и современной электронике. Капли воды, замерзающие на холодных поверхностях, распространены в природе повсеместно. Мы предлагаем и демонстрируем эффективную генерацию самоизгибающихся фотонных пучков-крючков во временной области (time-PH) с использованием мезомасштабной капли замерзающей воды [113]. PH-излучение изгибается вблизи теневой поверхности капли с большой кривизной и углами, превосходящими обычные лучи Эйри. Ключевые свойства time-PH (длина, кривизна, ширина луча) могут быть гибко изменены путем изменения положения и кривизны границы раздела «вода–лед» внутри капли.

Управляя такими параметрами, как размер капли, тип поверхности, на которой она расположена, включая наклонную поверхность, фракцию льда, различные сценарии замерзания сферической капли воды и т. д., можно управлять параметрами замерзания капель. В этом случае время замораживания можно рассматривать, например, как один из параметров динамического управления характеристиками фотонного крючка.

Благодаря изменению внутренней структуры замерзающих капель воды в режиме реального времени, мы демонстрируем динами-

ческую кривизну и управление траекторией лучей, зависящих от времени фотонного крючка. Было показано, что замерзающая мезомасштабная капля воды позволяет сфокусировать оптический луч в теневой части капли в фотонный крючок с различной кривизной, несмотря на низкий оптический контраст между водой и льдом. Установлено, что соотношение контраста показателей преломления жидкой и твердой воды, а также положения и кривизны границы раздела «вода-лед» формирует значение фотонного крючка с разрешением выше дифракционного предела и углом изгиба на теневой стороне замерзающей капли.

Понимание механизмов, лежащих в основе динамики капель воды в процессе их замораживания, проложит путь для множества новых применений в широком спектре областей, включая временную фотонику, датчики, контроль температуры и термического накопления льда, а также биомедицинскую инженерию. Более того, понимание эффектов замораживания капель воды является проблемой общей полезности и фундаментальной важности, которая облегчает новые применения нерезонансных эффектов локализации света (таких как фотонные струи и крючки) в области оптических устройств и систем.

В ходе систематических исследований дифракции на основе теории Ми на мезоразмерных диэлектрических частицах были обнаружены новые физические эффекты, которые было невозможно выявить, используя ранее применявшиеся математические модели. Ключевым результатом оказался обнаруженный эффект суперрезонанса, заключающийся в том, что диэлектрические мезомасштабные сферы могут поддерживать резонансные моды Ми высокого порядка с локализацией и усилением гигантского поля. Были предложены новые методы определения суперрезонанса на модах Ми высокого порядка для сферической диэлектрической частицы, метод формирования квантовых точек на основе эффекта суперрезонансных мод Ми высокого порядка, метод генерации резонансных мод Ми высокого порядка в мезоразмерных полостях диэлектрического материала, а также устройство оптической маскировки при су-

перрезонансе мод Ми, сферическая (шарообразная) однородная мезомасштабная линза с субдифракционным разрешением [114].

Впервые показано, что можно индуцировать интенсивные магнитные концентрические субволновые «горячие круги» в диэлектрической мезомасштабной частице Януса. В основе частицы Януса лежит комбинация эффектов фотонной струи, волн шепчущей галереи и концепции погружения в твердое тело. Моделирование показывает контраст  $(H/H_0)^2/(E/E_0)^2$  более 10, а максимальное усиление напряженности магнитного поля составляет более 1 000 для частицы в масштабе длины волны с показателем преломления  $n < 2$  и параметром размера порядка 30. Этот эффект может обеспечить новый способ реализации точных магнитных устройств, для интегральных фотонных схем и взаимодействия света с веществом [15]. Разработка полностью диэлектрических структур с высоким магнитным откликом на оптических частотах в последние годы является предметом интенсивных исследований. Они перспективны для фотоники, но имеют недостаток: у них слабые магнитные эффекты на оптических частотах, связанные с малым значением магнитной проницаемости этих природных материалов. В связи с этим природные диэлектрические материалы редко применяются для практических «магнитных» приложений в оптике.

Впервые было показано, что диэлектрические мезомасштабные сферы поддерживают эффект суперрезонанса, то есть резонансные моды Ми высокого порядка с гигантским усилением поля. Присутствие окружающей среды приводит к значительному влиянию на напряженность электрического и магнитного полей в частице. Этот эффект может быть использован для высокоточного контроля эффективного показателя преломления среды, такой как вода или воздух [115, 116]. На примере воздуха как окружающей среды установлено, что чувствительность предлагаемой концепции датчика контроля эффективного показателя преломления среды может достигать от  $10^{-6}$  до  $10^{-8}$ , в зависимости от точности параметра размера сферы, что не хуже точности современных методов интерференции. Предложена инновационная технология

3D-картирования, используемая для отслеживания линий поля, проходящих через критические точки распределения вектора Пойнтинга, для исследования значительного усиления напряженности поля, существующего вокруг полюсов диэлектрических мезоразмерных сфер [117]. Обнаружена поразительно большая «похожую на сердце» многовременная циркуляция векторных 3D-линий поля Пойнтинга, которые не могут быть охарактеризованы обычным 2D-картографическим анализом. Гигантские угловые колебания и диапазон циркуляции считаются основными причинами этого явления. Мы ожидаем, что этот эффект и предложенный метод внесут вклад в исследования явлений усиления поля, подавления рассеяния, резонанса Фано [118] и хирального материала.

Рассмотрению особенностей свойств рассеяния плоской электромагнитной волны на сферической диэлектрической частице с параметром размера  $q$  порядка 10 посвящена работа [119]. Несмотря на долгую историю вопроса, новые решения приводит к неожиданным и иногда необычным результатам, демонстрирующим ряд практически важных свойств, в том числе резонанс Фано высокого порядка с генерацией сверхвысокой электромагнитной волны. Например, в результате численного моделирования на основе теории Ми эффекта суперрезонанса для диэлектрической сферы с низким показателем преломления [120], было показано, что не только ранее изученные слабодиссипативные мезоразмерные сферы из материала со «средним» (около 1,5) и высоким (более 2) показателем преломления, но и с низким (около 1,3) поддерживают резонанс Фано высокого порядка, связанного с внутренними модами Ми. Возбуждение резонансов Фано высокого порядка является нетривиальной задачей, поскольку требуется прецизионная подгонка параметра размера сферы. Установлено, что рассеяние света мезоразмерной диэлектрической сферой с малыми потерями и низким показателем преломления позволяет повторить оптические эффекты резонанса Фано высокого порядка, обнаруженные ранее для сфер с высоким и средним показателем преломления. Так, для частицы с показателем преломления

1,33 и параметром размера  $q = 70,6$  (что на длине волны около  $\lambda = 534$  нм соответствует диаметру сферы около 12 микрон) обеспечивается добротность порядка  $\sim 6 \cdot 10^8$ , а резонансная мода имеет экстремально высокий номер  $l = 86$ . При этом возможна генерация электрического и магнитного полей с интенсивностями в полюсах сферы около  $10^6$ – $10^7$  соответственно.

Рассмотренные эффекты хорошо подходят для диэлектрической фотоники следующего поколения, мезотроники и расширяют палитру средних и высоких показателей преломления. Кроме того, возбуждение Фано резонансов высокого порядка позволяет повысить чувствительность резонансных мезоразмерных диэлектрических сферических структур, в материалах которых эффект диссипации может быть небольшим.

Были изучены и обнаружены некоторые новые необычные физические явления и эффекты, связанные с диэлектрическими мезомасштабными частицами с параметром размера Ми, близким к 10. Оказалось, что квазипериодические режимы фокусировки существуют в диапазоне показателей преломления, близких к единице, для цепочек диэлектрических частиц как сферической, так и кубической формы. Таковую среду можно рассматривать как волновод с градиентным индексом с параболическим законом изменения показателя преломления [121].

Было установлено, что электрическое поле на плоской поверхности усеченной сферы или цилиндров (так называемых частиц Януса) имеет резкие резонансы в зависимости от глубины удаленного сегмента сферы или цилиндра. Эти резонансы связаны с возбужденными шепчущими волнами галереи, вызванными усечением. Это новый механизм локализации поля. Оптимизация этого эффекта для цилиндров позволяет достичь сверхразрешения по толщине линии, что может быть использовано для контактной оптической литографии.

Поток оптической энергии внутри диэлектрической микросферы, подвергающейся воздействию оптической волны, обычно сонаправлен с ее волновым вектором. В то же время, если оптическое поле в микрочастице нахо-

дится в резонансе с высококачественной пространственной собственной модой, называемой режимом шепчущей галереи (WGM), по меньшей мере, две области обратного потока энергии возникают в освещенной и теневой полусферах частицы. Эти области представляют значительный практический интерес из-за их повышенного потенциала оптического улавливания при условии, что они должны быть предварительно очищены от частиц материала. В перфорированной микросфере с заполненным воздухом точечным отверстием, возможно возбуждение WGMs. Точечное отверстие изо-

лирует области обратного потока энергии WGM и многократно увеличивает оптическую силу притяжения, которая превращает перфорированную микросферу в эффективный оптический пинцет для захвата различных нанобъектов [122, 123]. Точечное отверстие изолирует область обратного потока энергии резонансной моды и превращает перфорированную микросферу в эффективный оптический пинцет. Впервые, насколько нам известно, было раскрыто многократное усиление интенсивности обратного потока в точечном отверстии при резонансе WGM.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Luk'yanchuk B. S., Paniagua-Domínguez R., Minin I., Minin O., Wang Z. Refractive index less than two: photonic nanojets yesterday, today and tomorrow // *Optical Materials Express*. – 2017. – Vol. 7, Issue 6. – P. 1820–1847. – DOI 10.1364/OME.7.001820.
2. Минин И. В., Минин О. В. Фотонные струи в науке и технике // *Вестник СГУГиТ*. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 212–234.
3. Minin I. V., Minin O. V. *Diffraction optics and nanophotonics: Resolution below the diffraction limit* [Electronic resource]. – Springer, 2016. – Mode of access: <http://www.springer.com/us/book/9783319242514#aboutBook>.
4. Томилин М. Г. Глаз и линза через призму тысячелетий // *Изв. вузов. Приборостроение*. – 2012. – Т. 55, № 3. – С. 70–79.
5. Кудрявцев П. С. *История физики*. – М.: Учпедгиз, 1948. – 535 с.
6. Robert K. G. Temple *The Crystal Sun: Rediscovering a Lost Technology of the Ancient World*. – Arrow Books Ltd, 2001. – 653 p.
7. Кerpелева С. Ю., Томилин М. Г. Оптические сферы: загадки древних технологий // *Оптический журнал*. – 1999. – Т. 6, № 1. – С. 88–90.
8. Rashed R. A Pioneer in Anacalistics: Ibn Sahl on Burning Mirrors and Lenses [Electronic resource] // *Isis*. – 1990. – Vol. 81, No. 3. – P. 464–491. Retrieved from [http://www.jstor.org/stable/233423?seq=1&cid=pdf-reference#references\\_tab\\_contents](http://www.jstor.org/stable/233423?seq=1&cid=pdf-reference#references_tab_contents).
9. Crombie C. *Robert Grosseteste and the Origins of Experimental Science*. – Oxford: Clarendon Press, 1971. – 369 p.
10. Li X., Chen Z., Taflove A., Backman V. Optical analysis of nanoparticles via enhanced backscattering facilitated by 3-D photonic nanojets // *Optical Express*. – 2005. – Vol. 13. – P. 526.
11. Lu Y. F., Zhang L., Song W. D., Zheng Y. W., Luk'yanchuk B. S. Laser writing of a subwavelength structure on silicon (100) surfaces with particle enhanced optical irradiation // *JETP Letter*. – 2000. – Vol. 72 (9). – P. 457–459.
12. Luk'yanchuk B. S., Bekirov A. R., Wang Z. B., Minin I. V., Minin O. V., Fedyanin A. A. Optical Phenomena in Mesoscale Dielectric Spheres and Immersion Lenses Based on Janus Particles: A Review // *Physics of Wave Phenomena*. – 2022. – Vol. 30, No. 5. – P. 283.
13. Luk'yanchuk B. S., Bekirov A. R., Wang Z. B., Minin I. V., Minin O. V., Fedyanin A. A. Optical Phenomena in Dielectric Spheres Several Light Wavelengths in Size: A Review // *Physics of Wave Phenomena*. – 2022. – Vol. 30, No. 4. – P. 217.
14. Wang Z. B., Luk'yanchuk B. Super-resolution imaging and microscopy by dielectric particle-lenses, Chapter 15 // *Label-Free Super-resolution Microscopy*. – Springer, 2019. – P. 371–400.
15. Wang Z. B., Luk'yanchuk B., Yue L., Yan B., Monks J., Dhama R., Minin O. V., Minin I. V., Huang S. M., Fedyanin A. A. High order Fano resonances and giant magnetic fields in dielectric microspheres // *Scientific Reports*. – 2019. – Vol. 9. – P. 20293.
16. Lu Y. F., Zheng Y. W., Song W. D. (2000). Laser induced removal of spherical particles from silicon wafers // *Journal of Applied Physics*. – 2000. – Vol. 87. – P. 1534–1539.

17. Leiderer P., Boneberg J., Dobler V., Mosbacher M., Munzer H. J., Chaoui N., Siegel J., Solis J., Afonso C. N., Fourrier T., et al. Laser-induced particle removal from silicon wafers // *Proceedings SPIE High-Power Laser Ablation III*. – 2000. – P. 249–259. – DOI 10.1117/12.407353.
18. Luk'yanchuk B. S., Zheng Y. W., Lu Y. F. Laser cleaning of solid surface: optical resonance and near-field effects // *Proceedings SPIE High-Power Laser Ablation III*. – 2000. – P. 4012–4065.
19. Munzer H. J., Mosbacher M., Bertsch M., Zimmermann J., Leiderer P., Boneberg J. Local field enhancement effects for nanostructuring of surfaces // *Journal of Microscopy*. – 2001. – Vol. 202. – P. 129–135.
20. Zheng Y. W., Luk'yanchuk B. S., Lu Y. F., Song W. D., Mai Z. H. Dry laser cleaning of particles from solid substrates: experiments and theory // *Journal of Applied Physics*. – 2001. – Vol. 90. – P. 2135–2142.
21. Luk'yanchuk B. S., Mosbacher M., Zheng Y. W., Munzer H. J., Huang S. M., Bertsch M., Song W. D., Wang Z. B., Lu Y. F., Dubbers O., et al. (2002). Optical resonance and near-field effects in dry laser cleaning // *Laser Cleaning* / ed. Boris Luk'yanchuk. – New Jersey : World Scientific, 2002. – P. 103–178.
22. Hong M. H., Wang Z. B., Luk'yanchuk B. S., Tan L. S., Chong, T. C. (2006). From transparent particle light enhancement to laser nanoimprinting // *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*. – 2006. – Vol. 1. – P. 61–66.
23. Huang S. M., Hong M. H., Luk'yanchuk B. S., Zheng Y. W., Song W. D., Lu Y. F. et al. Pulsed laser-assisted surface structuring with optical near-field enhanced effects // *Journal of Applied Physics*. – 2002. – Vol. 92. – P. 2495–2500.
24. Huang S. M., Sun Z., Luk'yanchuk B. S., Hong M. H., Shi L. P. Nanobump arrays fabricated by laser irradiation of polystyrene particle layers on silicon // *Applied Physics Letters*. – 2005. – Vol. 86. – P. 161911.
25. Huang S. M., Wang Z. A., Sun Z., Wang Z. B., Luk'yanchuk B. The Near Field Properties of Colloidal Polystyrene Microspheres on Silicon // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2011. – Vol. 11. – P. 10981–10985.
26. Wang W. J., Lim G. H., Song W. D., Ye K. D., Zhou J., Hong M. H., Liu B. Laser induced nanobump array on magnetic glass disk for low flying height application // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2007. – Vol. 59. – P. 177–180.
27. Wang Z. B., Guo Wei, Pena A., Whitehead D. J., Luk'yanchuk B. S., Li Lin., Liu Z., Zhou Y., Hong M. H. Laser micro/nano fabrication in glass with tunable-focus particle lens array // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16(24). – P. 19706.
28. Khan A., Wang Z., Sheikh M. A., Li L. Laser sub-micron patterning of rough surfaces by micro-particle lens arrays // *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering*. – 2011. – Vol. 1. – P. 1–9.
29. Khan A., Wang Z., Sheikh M. A., Whitehead D. J., Li L. Parallel near-field optical micro/nanopatterning on curved surfaces by transported micro-particle lens arrays // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2010. – Vol. 43. – P. 30–35.
30. Liu D. F., Xiang Y. J., Wu X. C., Zhang Z. X., Liu L. F., Song L., Zhao X. W., Luo S. D., Ma W. J., Shen J. et al. Periodic ZnO nanorod arrays defined by polystyrene microsphere self-assembled monolayers // *Nano Letters*. – 2006. – Vol. 6. – P. 2375–2378.
31. Okano Y., Umemura S., Enomoto Y., Hayakawa Y., Kumagawa M., Hirata A., Dost, S. Numerical study of Marangoni convection effect on the melting of GaSb/InSb/GaSb // *Journal of Crystal Growth*. – 2002. – Vol. 235. – P. 135–139.
32. Khan A., Wang Z., Sheikh M. A., Whitehead D. J., Li L. Laser micro/nano patterning of hydrophobic surface by contact particle lens array // *Applied Surface Science*. – 2011. – Vol. 258. – P. 774–779.
33. Li L., Guo W., Wang Z. B., Liu Z., Whitehead D., Luk'yanchuk B. (2009). Large-area laser nano-texturing with user-defined patterns // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2009. – Vol. 19. – P. 054002.
34. Lin Y., Hong M. H., Chong T. C., Lim C. S., Chen G. X., Tan L. S., Wang Z. B., Shi L. P. Ultrafast-laser-induced parallel phase-change nanolithography // *Applied Physics Letters*. – 2006. – Vol. 89. – P. 2006–2008.
35. McLeod E., Arnold C. B. Array-based optical nanolithography using optically trapped microlenses // *Optical Express*. – 2009. – Vol. 17. – P. 3640–3650.
36. McLeod E., Arnold C. B. Subwavelength direct-write nanopatterning using optically trapped microspheres // *Nature Nanotechnology*. – 2008. – Vol. 3. – P. 413–417.
37. Piglmayer K., Denk R., Bauerle D. Laser-induced surface patterning by means of microspheres // *Applied Physics Letters*. – 2002. – Vol. 80. – P. 4693–4695.

38. Yang S., Chen G., Megens M., Ullal C. K., Han, Y. J., Rapaport R., Thomas E. L., Aizenberg J. Functional biomimetic microlens arrays with integrated pores // *Advanced Materials*. – 2005. – Vol. 17. – P. 435–438.
39. Kotlyar V. V., Stafeev S. S. Modeling the sharp focus of a radially polarized laser mode using a conical and a binary microaxicon // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2010. – Vol. 27, Issue 10. – P. 1991–1997. – DOI 10.1364/JOSAB.27.001991.
40. Degtyarev S. A., Porfirev A. P., Khonina S. N. Photonic nanohelix generated by a binary spiral axicon // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55. – P. B44–B48.
41. Минин И. В., Минин О. В. Фотоника изолированных диэлектрических частиц произвольной трехмерной формы – новое направление оптических информационных технологий // *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии*. – 2014. – Т. 12, вып. 4. – С. 59–70.
42. Liu C-Y. Photonic jets produced by dielectric micro cuboids // *Applied Optics*. – 2015. – 2015. – Vol. 54(29). – P. 8694–8699. – DOI 10.1364/AO.54.008694.
43. Martin J., Proust J., G'erald D., Bijeon J-L., Plain J. Intense Bessel-like beams arising from pyramid-shaped microtips // *Optical Letter*. – 2012. – Vol. 37. – P. 1274-1276.
44. Mendes M. J., Tobías I., Martí A. and Luque A. Near-field scattering by dielectric spheroidal particles with sizes on the order of the illuminating wavelength // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2010. – Vol. 27, Issue 6. – P. 1221–1231. – DOI 10.1364/JOSAB.27.001221.
45. Han L., Han Y., Gouesbet G., Wang J., Gr'ehan G. Photonic jet generated by spheroidal particle with Gaussian-beam illumination // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2014. – Vol. 31(7). – P. 1476–1483. – DOI 10.1364/JOSAB.31.001476.
46. Han L., Han Y., Wang J., Cui Z. Internal and near-surface electromagnetic fields for a dielectric spheroid illuminated by a zero-order Bessel beam // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2014. – Vol. 31, Issue 9. – P. 1946–1955. – DOI 10.1364/JOSAA.31.001946.
47. Yue L., Minin O. V., Wang Z., Monks J. N., Shalin A. S. and Minin I. V. Photonic hook: a new curved light beam // *Optical Letter*. – 2018. – Vol. 43(4). – P. 771–774.
48. Hengyu Z., Zaichun C., Chong C. T. and Minghui H. Photonic jet with ultralong working distance by hemispheric shell // *Optical Express*. – 2015. – Vol. 23(5). – P. 6626–33. – DOI 10.1364/OE.23.006626.
49. Liu C-Y., Chen C-J. Characterization of photonic nanojets in dielectric microdisks // *Physica E Low-dimensional Systems and Nanostructures*. – 2015. – Vol. 73. – P. 226-234. – DOI 10.1016/j.physe.2015.06.005.
50. McCloskey D., Wang J. J. and Donegan J. F. Low divergence photonic nanojets from Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> microdisks // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20(1). – P. 128-40. – DOI 10.1364/OE.20.000128.
51. McCloskey D., Ballantine K. E., Eastham P. R., Donegan J. F. Photonic nanojets in Fresnel zone scattering from non-spherical dielectric particles // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23(20). – P. 26326. – DOI 10.1364/OE.23.026326.
52. Minin I. V., Minin O. V., Geints Y. E. Localized EM and photonic jets from non-spherical and non-symmetrical dielectric mesoscale objects: Brief review // *Annalen der Physik*. – 2015. – Vol. 527(7). – DOI 10.1002/andp.201500132
53. Minin I. V., Minin O. V. Photonic jets formation by non spherical axially and spatially asymmetric 3D dielectric particles // *Diffraction Optics and Nanophotonics*. – Berlin: Springer, 2016. – P. 31–54.
54. 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. 54003.
55. Minin I. V., Minin O. V., Glinskiy I. A., Khabibullin R. A., Malureanu R., Lavrinenko A. V., Yakubovskiy D. I., Arsenin A. V., Volkov V. S., Ponomarev D. S. Plasmonic nanojet: an experimental demonstration // *Optics Letters*. – 2020. – Vol. 45. – P. 3244–3247. – DOI 10.1364/OL.391861.
56. Pacheco-Peña V., Minin I. V., Minin O. V., & Beruete M. Comprehensive analysis of photonic nanojets in 3D dielectric cuboids excited by surface plasmons // *Annalen der Physik*. – 2016. – Vol. 528(9-10). – P. 684–692. – DOI 10.1002/andp.201600098/.
57. Pacheco-Peña V., Minin I. V., Minin O. V., Beruete M. Increasing Surface Plasmons Propagation via Photonic Nanojets with Periodically Spaced 3D Dielectric Cuboids // *Photonics* 2016. – Vol. 3(10). – DOI 10.3390/www.mdpi.com/journal/photonics.
58. Luk'yanchuk B. S. *Laser Cleaning*. – World Scientific, 2002. – 466 p.
59. Beklemyshev V. I., Makarov V. V., Makhonin I. I., Petrov Yu. N., Prokhorov A. M., and Pustovoy V. I., Photo desorption of metal ions in a semiconductor-water system // *JETP Letters*. – 1987. – Vol. 46(7). – P. 347–350.



60. Zapka W., Asch K., Meissner K. Removal of particles from solid-state surfaces by laser bombardment // European Patent EP 0297506 B1 Publication Date: 05/20/1998.
61. Wang Z. B., Guo W., Luk'yanchuk B. S., Pena A., Li L., Liu Z. Laser ablation on nanoscales // Proceedings SPIE. High-Power Laser Ablation VII – 2008. – Vol. 7005. – DOI 10.1117/12.780065.
62. Fardel R., McLeod E., Tsai Y.-C., Arnold C. B. Nanoscale ablation through optically trapped microspheres // Applied Physics A. – 2010. – Vol. 101. – P. 41–46.
63. Münzer H.-J., Mosbacher M., Bertsch M., Dubbers O., Burmeister F., Pack A., Wannemacher R., Runge B.-U., Bäuerle D., Boneberg J., Leiderer P. Optical near-fieldeffects in surface nanostructuring and laser cleaning // Proceedings SPIE. – 2002. – Vol. 4426. – DOI 10.1117/12.456827.
64. Mosbacher M., Munzer H. J., Zimmermann J., Solis J., Boneberg J., Leiderer P. Optical field enhancement effects in laser-assisted particle removal // Applied Physics a-Materials Science & Processing. – 2001. – Vol. 72. – P. 41–44.
65. Lu Y., Theppakuttai S., Chen S. C. Marangoni effect in nanosphere-enhanced laser nanopatterning of silicon // Applied Physics Letters. – 2003. – Vol. 82. – P. 4143–4145.
66. Theppakuttai S., Chen S. Nanoscale surface modification of glass using a 1064 nm pulsed laser // Applied Physics Letters. – 2003. – Vol. 83. – P. 758–760.
67. Chen Z. G., Taflove A., Backman V. Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique // Optics Express. – 2004. – Vol. 12. – P. 1214–1220.
68. Kim J., Cho K., Kim I., Kim W. M., Lee T. S., Lee K.-S. Fabrication of plasmonic nanodiscs by photonic nanojet lithography // Applied Physics Express. – 2012. – Vol. 5. – P. 025201.
69. Zhang X. A., Chen I.-T., Chang C. H. Recent progress in near-field nanolithography using light interactions with colloidal particles: from nanospheres to three-dimensional nanostructures // Nanotechnology. – 2019. – Vol. 30. – P. 352002.
70. Chen X., Wu T., Gong Z., Li Y., Zhang Y., Li B. Subwavelength imaging and detection using adjustable and movable droplet microlenses // Photonics Research. – 2020. – Vol. 8. – P. 225–234.
71. Astratov V. N., Darafsheh A., Kerr M. D., Allen K. W., Fried N. M., Antoszyk A. N., Ying H. S. Photonic nanojets for laser surgery // SPIE Newsroom. – 2010. – Vol. 12. – P. 32–34.
72. Yan B., Yue L., Monks J. N., Yang X., Xiong D., Jiang C., Wang Z. B. Superlensing Plano-Convex-Microsphere (PCM) lens for direct laser nano marking and beyond // Optics Letters. – 2020. – Vol. 45. – P. 1168–1171.
73. Wang F., Liu L., Yu P., Liu Z., Yu H., Wang Y., Li W. J. Three-Dimensional Super-Resolution Morphology by Near-Field Assisted White-Light Interferometry // Scientific Reports. – 2016. – Vol. 6. – P. 24703.
74. Qian L., Jianqi S. Effect of Resonant Scattering on Photonic Jet of a Microsphere // Acta Photonica Sinica. – 2021. – Vol. 50. – P. 729002.
75. Минин И. В., Минин О. В. Квазиоптика: современные тенденции развития – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 163 с.
76. Минин И. В., Минин О. В. Сверхразрешение в акустических фокусирующих устройствах // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 231–244.
77. Heifetz A., Kong S.-Ch., Sahakian A. V., Taflove A., Backman V. Photonic Nanojets // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. – 2009. – Vol. 6. – P. 1979–1992.
78. Lecler S., Takakura Y., Meyrueis P. Properties of a three-dimensional photonic jet // Optics Letters. – 2005. – Vol. 30. – P. 2641–2643.
79. Wu W., Katsnelson A., Memis O. G., Mohseni H. A deep sub-wavelength process for the formation of highly uniform arrays of nanoholes and nanopillars // Nanotechnology. – 2007. – Vol. 18. – P. 485302.
80. Fukuda N., Kunishio K., Nakayama S. Dry-Etching System with Q-switched DPSS Laser for Flat Panel Displays // Journal of Laser Micro Nanoengineering. – 2007. – Vol. 2. – P. 241–246.
81. Geints Y. E., Minin I. V., Panina E. K., Zemlyanov A. A., Minin O. V. Comparison of photonic nanojets key parameters produced by nonspherical microparticles // Optical and Quantum Electronics. – 2017. – Vol. 49. – P. 118. – DOI 10.1007/s11082-017-0958-y.
82. Минин И. В., Минин О. В., Карпик А. П. Фотонные наноструи, тераструи и акустоструи в науке и технике. – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – 168 с.
83. Li H., Song W., Zhao Y., Cao Q., Wen A., Optical Trapping, Sensing and Imaging by Photonic Nanojets // Photonics. – 2021. – Vol. 8. – P. 434. – DOI 10.3390/photonics8100434.

84. Darafsheh A. Photonic nanojets and their applications // *Journal of Physics: Photonics*. – 2021. – Vol. 3. – P. 022001.
85. Minin O. V., Minin I. V. Optical Phenomena in Mesoscale Dielectric Particles // *Photonics*. – 2021. – Vol. 8. – P. 591.
86. Chen L., Zhou Y., Wu M.-X., Hong M.-H. Remote-mode microsphere nano-imaging: new boundaries for optical microscopes // *Opto-Electronic Advances*. – 2018. – Vol. 1. – P. 170001.
87. Chen Z., Taflove A., Backman V. Equivalent volume-averaged light scattering behavior of randomly inhomogeneous dielectric spheres in the resonant range // *Optical Express*. – 2004. – Vol. 12. – P. 1214.
88. Abbe E. Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung // *Arch. Mikrosk. Anat.* – 1873. – Vol. 9. – P. 413–418.
89. Rayleigh L. Investigations in optics, with special reference to the spectroscope. London, Edinburgh, Dublin // *Philosophical Magazine*. – 1879. – Vol. 8. – P. 477–486.
90. Chen L., Zhou Y., Zhou R., Hong M. Microsphere – Toward Future of Optical Microscopes // *iScience*. – 2020. – Vol. 23. – P. 101211.
91. Wang, Z., Guo, W., Li, L., Luk'yanchuk, B., Khan, A., Liu, Z., Chen, Z., Hong, M. Optical virtual imaging at 50 nm lateral resolution with a white-light nanoscope // *Nature Communications*. – 2011. – Vol. 2. – P. 216–218.
92. Lu Y. F., Zhang L., Song W. D., Zheng Y. W., Luk'yanchuk B. S. Laser writing of a subwavelength structure on silicon (100) surfaces with particle-enhanced optical irradiation // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 2000. – Vol. 72. – P. 457–459.
93. Wang Z. B. et al. Optical virtual imaging at 50 nm lateral resolution with a whitelight nanoscope // *Nature Communications*. – 2011. – Vol. 2(1). – P. 218. – DOI 10.1038/ncomms1211.
94. Krivitsky L. A., Wang J. J., Wang Z., Luk'yanchuk B. Locomotion of microspheres for super-resolution imaging // *Scientific Report*. – 2013. – Vol. 3(1). – P. 3501. – DOI 10.1038/srep03501.
95. Yan Y., Li L., Feng C., Guo W., Lee S., Hong M. H. Microsphere coupled scanning laser confocal nanoscope for sub-diffraction limited imaging at 25 nm lateral resolution in the visible spectrum // *ACS Nano*. – 2014. – Vol. 8. – P. 1809–1816.
96. Monks J. N., Yan B., Hawkins N., Vollrath F., Wang Z. B. Spider silk: mother nature's bio-superlens // *Nano Letters*. – 2016. – Vol. 16. – P. 5842–5845.
97. Wang F., Liu L., Yu H., Wen Y., Yu P., Liu Zh., Wang Y., Li W. J. Scanning superlens microscopy for non-invasive large field-of-view visible light nanoscale imaging // *Nature Communications*. – 2016. – Vol. 7. – P. 13748.
98. Guo M., Ye Y.-H., Hou J., Du B. Size-dependent optical imaging properties of high-index immersed microsphere lens // *Applied Physics B*. – 2016. – Vol. 122(3). – DOI 10.1007/s00340-016-6335-x.
99. Lee S., Li L., Wang Z., Guo W., Yan Y., Wang T. Immersed transparent microsphere magnifying subdiffraction-limited objects // *Applied Optics*. – 2013. – Vol. 52. – P. 7265–7270.
100. Hao X., Kuang C., Liu X., Zhang H., Li Y. Microsphere based microscope with optical super-resolution capability // *Applied Physics Letters*. – 2011. – Vol. 99. – P. 203102.
101. Wang F., Yang S., Ma H., Shen P., Wei N., Wang M., Xia Y., Deng Y., Ye Y.-H. Microsphere-assisted super-resolution imaging with enlarged numerical aperture by semi-immersion // *Applied Physics Letters*. – 2018. – Vol. 112. – P. 023101.
102. Hoff J. C., Akin E. W. Microbial resistance to disinfectants: Mechanisms and significance // *Environmental Health Perspectives*. – 1986. – Vol. 69. – P. 7–13.
103. Lee S., Li L., Ben-Aryeh Y., Wang Z., Guo W. Overcoming the diffraction limit induced by microsphere optical nanoscopy // *Journal of Optics*. – 2013. – Vol. 15. – P. 125710.
104. Chen, L., Zheng, X., Du, Z., Jia, B., Gu, M., Hong, M. A frozen matrix hybrid optical nonlinear system enhanced by a particle lens // *Nanoscale*. – 2015. – Vol. 7. – P. 14982–14988.
105. Chen L., Yin Y., Li Y., Hong M. Multifunctional inverse sensing by spatial distribution characterization of scattering photons // *Opto-Electronic Advances*. – 2019. – Vol. 2. – P. 190019.
106. Gao M., Ng S. W. L., Chen L., Hong M., Ho G. W. Self-regulating reversible photocatalytic-driven chromism of a cavity enhanced optical field TiO<sub>2</sub>/CuO nanocomposite // *Journal of Materials Chemistry A*. – 2017. – Vol. 5. – P. 10909– 10916.
107. Jin Y. J., Chen L. W., Wu M. X., Lu X. Z., Zhou R., Hong M. H. Enhanced saturable absorption of the graphene oxide film via photonic nanojets // *Optical Materials Express*. – 2016. – Vol. 6. – P. 1114– 1121.
108. Soh J. H., Wu M., Gu G., Chen L., Hong M. Temperature-controlled photonic nanojet via VO<sub>2</sub> coating // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55. – P. 3751–3756.

109. Jin B., Bidney G. W., Anisimov I., Limberopoulos N. I., Allen K. W., Maslov A. V., Astratov V. N. Label-free cellphone microscopy with submicron resolution through high-index contact ball lens for in vivo melanoma diagnostics and other applications // Proceedings SPIE Label-free Biomedical Imaging and Sensing (LBIS). – 2022. – Vol. 11972. – DOI 10.1117/12.2609911.
110. Wang T., Kuang C., Hao X., Liu X. Subwavelength focusing by a microsphere array // Journal of Optics. – 2011. – Vol. 13. – P. 1–5. – DOI 10.1088/2040-8978/13/3/035702.
111. Минин И. В., Минин О. В. Проблемы метрологии терагерцового излучения в медицине // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 3. – С. 162–180.
112. Yanina I. Yu., Dyachenko P. A., Abdurashitov A. S., Shalin A. S., Minin I. V., Minin O. V., Bulygin A. D., Vrazhnov D. A., Kistenev Y. V., Tuchin V. V. Light distribution in fat cell layers at physiological temperatures // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – P. 1073. – DOI 10.1038/s41598-022-25012-9.
113. Minin O. V., Minin I. V., Cao Y. Time domain self-bending photonic hook beam based on freezing water droplet // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – Article number 7732.
114. Minin O. V., Zhou S., Liu C.-Y., Antonicole J., Kong N., Minin I. V. Magnetic Concentric Hot-Circle Generation at Optical Frequencies in All-Dielectric Mesoscale Janus Particles // Nanomaterial. – 2022. – Vol. 12. – P. 3428. – DOI 10.3390/nano12193428.
115. Минин И. В., Жоу С., Минин О. В. Эффект суперрезонанса в мезоразмерной сфере с малым коэффициентом преломления // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Vol. 35(9). – P. 697–703. – DOI 10.15372/AOO20220901.
116. Yue L., Yan B., Monks J. N., Dhama R., Jiang C., Minin O. V., Minin I. V., Wang Z. Full three-dimensional Poynting vector analysis of great field-intensity enhancement in a specifically sized spherical-particle // Scientific Report. – 2019. – Vol. 9. – P. 20224.
117. Минин И. В., Минин О. В. Оптический суперрезонанс в мезоразмерных диэлектрических сферах // Фотоника. – 2022. – Т. 16, № 4. – С. 306–317.
118. Fano U. Effects of configuration interaction on intensities and phase shift // Physical Review. – 1961. – Vol. 124(6). – P. 1866.
119. Минин И. В., Минин О. В., Джоу С. Фано резонанс высокого порядка в диэлектрической мезоразмерной сфере из материала с низким показателем преломления // Письма в ЖЭТФ. – 2022. – Т. 116, № 3. – С. 146–150.
120. Минин И. В., Минин О. В. Особенности генерации экстремальных электромагнитных полей в диэлектрической мезоразмерной сфере с учетом окружающей среды // Письма в ЖЭТФ. – 2022. – Т. 48, № 18. – С. 41–44.
121. Liu Ch.-Y., Minin O. V., Minin I. V. Periodical focusing mode achieved through a chain of mesoscale dielectric particles with a refractive index near unity // Optics Communications. – 2019. – Vol. 434. – P. 110–117.
122. Geints Y., Minin I. V., Minin O. V. Whispering-gallery modes promote enhanced optical backflow in a perforated dielectric microsphere // Optics Letters. – 2022. – Vol. 47, Issue 7. – P. 1786–1789. – DOI 10.1364/OL.452683.
123. Geints Y. E., Minin I. V., Minin O. V. Simulation of enhanced optical trapping in a perforated dielectric microsphere amplified by resonant energy backflow // Optics Communications. – 2022. – Vol. 524. – P. 128779.

### 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

© О. В. Минин, И. В. Минин, 2024

## Optics of mesomedium dielectric particles. Review. Part 1. Optics

I. V. Minin<sup>1</sup>, O. V. Minin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 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".

**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. Luk'yanchuk, B. S., Paniagua-Domínguez, R., Minin, I., Minin, O., & Wang, Z. (2017). Refractive index less than two: photonic nanojets yesterday, today and tomorrow. *Optical Materials Express*, 7(60), 1820–1847. DOI 10.1364/OME.7.001820.
2. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2017). Photon jets in science and technology. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGIT]*, 22(2), 212–234 [in Russian].
3. 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>.
4. Tomilin, M. G. (2012). Eye and lens through the prism of millennia. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie [Journal of Instrument Engineering]*, 55(3), 70–79 [in Russian].
5. Kudryavtsev, P. S. (1948). *Istoriia fiziki [History of Physics]*. Moscow: Uchpedgiz Publ., 535 p. [in Russian].
6. Robert, K. G. (2001). *Temple the Crystal Sun: Rediscovering a Lost Technology of the Ancient World*. Arrow Books Ltd, 653 p.
7. Kerpeleva, S. Yu., & Tomilin, M. G. (1999). Optical spheres: riddles of ancient technologies. *Opticheskii zhurnal [Journal of Optical Technology]*, 6(1), 88–90 [in Russian].
8. Rashed, R. A. (1990). Pioneer in Anaclastics: Ibn Sahl on Burning Mirrors and Lenses. *Isis*, 81(3), 464–491. Retrieved from [http://www.jstor.org/stable/233423?seq=1&cid=pdf-reference#references\\_tab\\_contents](http://www.jstor.org/stable/233423?seq=1&cid=pdf-reference#references_tab_contents)
9. Crombie, C. (1971). *Robert Grosseteste and the Origins of Experimental Science*. Oxford: Clarendon Press, 369 p.
10. Li, X., Chen, Z., Taflove, A., & Backman, V. (2005). Optical analysis of nanoparticles via enhanced backscattering facilitated by 3-D photonic nanojets. *Optical Express*, 13, P. 526
11. Lu, Y. F., Zhang, L., Song, W. D., Zheng, Y. W., & Luk'yanchuk, B. S. (2000). Laser writing of a subwavelength structure on silicon (100) surfaces with particle enhanced optical irradiation. *JETP Letter*, 72(9), 457–459.
12. Luk'yanchuk, B. S., Bekirov, A. R., Wang, Z. B., Minin, I. V., Minin, O. V., & Fedyanin, A. A. (2022). Optical Phenomena in Mesoscale Dielectric Spheres and Immersion Lenses Based on Janus Particles: A Review. *Physics of Wave Phenomena*, 30(5), P. 283.
13. Luk'yanchuk, B. S., Bekirov, A. R., Wang, Z. B., Minin, I. V., Minin, O. V., & Fedyanin, A. A. (2022). Optical Phenomena in Dielectric Spheres Several Light Wavelengths in Size: A Review. *Physics of Wave Phenomena*, 30(4), P. 217.
14. Wang, Z. B., & Luk'yanchuk, B. (2019). Super-resolution imaging and microscopy by dielectric particle-lenses, Chapter 15. In *Label-Free Super-resolution Microscopy* (pp. 371–400). Springer.

15. Wang, Z. B., Luk'yanchuk, B., Yue, L., Yan, B., Monks, J., Dhama, R., Minin, O. V., Minin, I. V., Huang, S. M., & Fedyanin, A. A. (2019). High order Fano resonances and giant magnetic fields in dielectric microspheres. *Scientific Reports*, 9, P. 20293.
16. Lu, Y. F., Zheng, Y. W., & Song, W. D. (2000). Laser induced removal of spherical particles from silicon wafers. *Journal of Applied Physics*, 87, 1534–1539.
17. Leiderer, P., Boneberg, J., Dobler, V., Mosbacher, M., Munzer, H. J., Chaoui, N., Siegel, J., Solis, J., Afonso, C. N., Fourrier, T., & et al. (2000). Laser-induced particle removal from silicon wafers. *Proceedings SPIE High-Power Laser Ablation III* (pp. 249–259). DOI 10.1117/12.407353.
18. Luk'yanchuk, B. S., Zheng, Y. W., & Lu, Y. F. (2000). Laser cleaning of solid surface: optical resonance and near-field effects. *Proceedings SPIE High-Power Laser Ablation III* (pp. 4012–4065).
19. Munzer, H. J., Mosbacher, M., Bertsch, M., Zimmermann, J., Leiderer, P., & Boneberg, J. (2001). Local field enhancement effects for nanostructuring of surfaces. *Journal of Microscopy*, 202, 129–135.
20. Zheng, Y. W., Luk'yanchuk, B. S., Lu, Y. F., Song, W. D., & Mai, Z. H. (2001). Dry laser cleaning of particles from solid substrates: experiments and theory. *Journal of Applied Physics*, 90, 2135–2142.
21. Luk'yanchuk, B. S., Mosbacher, M., Zheng, Y. W., Munzer, H. J., Huang, S. M., Bertsch, M., Song, W. D., Wang, Z. B., Lu, Y. F., Dubbers, O., & et al. (2002). Optical resonance and near-field effects in dry laser cleaning. In *Laser Cleaning* (pp. 103–178). B. Luk'yanchuk (Ed.). New Jersey: World Scientific.
22. Hong, M. H., Wang, Z. B., Luk'yanchuk, B. S., Tan, L. S., & Chong, T. C. (2006). From transparent particle light enhancement to laser nanoimprinting. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 1, 61–66.
23. Huang, S. M., Hong, M. H., Luk'yanchuk, B. S., Zheng, Y. W., Song, W. D., Lu, Y. F., & et al. (2002). Pulsed laser-assisted surface structuring with optical near-field enhanced effects. *Journal of Applied Physics*, 92, 2495–2500.
24. Huang, S. M., Sun, Z., Luk'yanchuk, B. S., Hong, M. H., & Shi, L. P. (2005). Nanobump arrays fabricated by laser irradiation of polystyrene particle layers on silicon. *Applied Physics Letters*, 86, P. 161911.
25. Huang, S. M., Wang, Z. A., Sun, Z., Wang, Z. B., & Luk'yanchuk, B. (2011). The Near Field Properties of Colloidal Polystyrene Microspheres on Silicon. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 11, 10981–10985.
26. Wang, W. J., Lim, G. H., Song, W. D., Ye, K. D., Zhou, J., Hong, M. H., & Liu, B. (2007). Laser induced nanobump array on magnetic glass disk for low flying height application. *Journal of Physics: Conference Series*, 59, 177–180.
27. Wang, Z. B., Guo, Wei, Pena, A., Whitehead, D. J., Luk'yanchuk, B. S., Li, Lin., Liu, Z., Zhou, Y., & Hong, M. H. (2008). Laser micro/nano fabrication in glass with tunable-focus particle lens array. *Optics Express*, 16(24), P. 19706.
28. Khan, A., Wang, Z., Sheikh, M. A., & Li, L. (2011). Laser sub-micron patterning of rough surfaces by micro-particle lens arrays. *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering*, 1, 1–9.
29. Khan, A., Wang, Z., Sheikh, M. A., Whitehead, D. J., & Li, L. (2010). Parallel near-field optical micro/nanopatterning on curved surfaces by transported micro-particle lens arrays. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43, 30–35.
30. Liu, D. F., Xiang, Y. J., Wu, X. C., Zhang, Z. X., Liu, L. F., Song, L., Zhao, X. W., Luo, S. D., Ma, W. J., Shen, J., & et al. (2006). Periodic ZnO nanorod arrays defined by polystyrene microsphere self-assembled monolayers. *Nano Letters*, 6, 2375–2378.
31. Okano, Y., Umemura, S., Enomoto, Y., Hayakawa, Y., Kumagawa, M., Hirata, A., & Dost, S. (2002). Numerical study of Marangoni convection effect on the melting of GaSb/InSb/GaSb. *Journal of Crystal Growth*, 235, 135–139.
32. Khan, A., Wang, Z., Sheikh, M. A., Whitehead, D. J., & Li, L. (2011). Laser micro/nano patterning of hydrophobic surface by contact particle lens array. *Applied Surface Science*, 258, 774–779.
33. Li, L., Guo, W., Wang, Z. B., Liu, Z., Whitehead, D., & Luk'yanchuk, B. (2009). Large-area laser nano-texturing with user-defined patterns. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19, P. 054002.
34. Lin, Y., Hong, M. H., Chong, T. C., Lim, C. S., Chen, G. X., Tan, L. S., Wang, Z. B., & Shi, L. P. (2006). Ultrafast-laser-induced parallel phase-change nanolithography. *Applied Physics Letters*, 89, 2006–2008.
35. McLeod, E., & Arnold, C. B. (2009). Array-based optical nanolithography using optically trapped microlenses. *Optical Express*, 17, 3640–3650.

36. McLeod, E., & Arnold, C. B. (2008). Subwavelength direct-write nanopatterning using optically trapped microspheres. *Nature Nanotechnology*, 3, 413–417.
37. Piglmayer, K., Denk, R., & Bauerle, D. (2002). Laser-induced surface patterning by means of microspheres. *Applied Physics Letters*, 80, 4693–4695.
38. Yang, S., Chen, G., Megens, M., Ullal, C. K., Han, Y. J., Rapaport, R., Thomas, E. L., & Aizenberg, J. (2005). Functional biomimetic microlens arrays with integrated pores. *Advanced Materials*, 17, 435–438.
39. Kotlyar, V. V., & Stafeev, S. S. (2010). Modeling the sharp focus of a radially polarized laser mode using a conical and a binary microaxicon. *Journal of the Optical Society of America B*, 27(10), 1991–1997. DOI 10.1364/JOSAB.27.001991.
40. Degtyarev, S. A., Porfirev, A. P., & Khonina, S. N. (2016). Photonic nanohelix generated by a binary spiral axicon. *Applied Optics*, 55, B44–B48.
41. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2014). Photonics of Isolated Dielectric Particles of Arbitrary Three-Dimensional Shape - a New Direction in Optical Information Technologies. *Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnye tekhnologii [Vestnik NSU. Series: Information Technologies]*, 12(4), 59–70 [in Russian].
42. Liu, C-Y. (2015). Photonic jets produced by dielectric micro cuboids. *Applied Optics*, 54(29), 8694–8699. DOI 10.1364/AO.54.008694
43. Martin, J., Proust, J., G'erard, D., Bijeon, J.-L., & Plain, J. (2012). Intense Bessel-like beams arising from pyramid-shaped microtips. *Optical Letter*, 37, 1274–1276.
44. Mendes, M. J., Tobias, I., Marti, A., & Luque, A. (2010). Near-field scattering by dielectric spheroidal particles with sizes on the order of the illuminating wavelength. *Journal of the Optical Society of America B*, 27(6), 1221–1231. DOI 10.1364/JOSAB.27.001221.
45. Han, L., Han, Y., Gouesbet, G., Wang, J., & Gr'ehan, G. (2014). Photonic jet generated by spheroidal particle with Gaussian-beam illumination. *Journal of the Optical Society of America B*, 31(7), 1476–1483. DOI 10.1364/JOSAB.31.001476.
46. Han, L., Han, Y., Wang, J., & Cui, Z. (2014). Internal and near-surface electromagnetic fields for a dielectric spheroid illuminated by a zero-order Bessel beam. *Journal of the Optical Society of America A*, 31(9), 1946–1955. DOI 10.1364/JOSAA.31.001946.
47. Yue, L., Minin, O. V., Wang, Z., Monks, J. N., Shalin, A. S., & Minin, I. V. (2018). Photonic hook: a new curved light beam. *Optical Letter*, 43(4), 771–774.
48. Hengyu, Z., Zaichun, C., Chong, C. T., & Minghui, H. (2015). Photonic jet with ultralong working distance by hemispheric shell. *Optical Express*, 23(5), 6626–6633. DOI: 10.1364/OE.23.006626.
49. Liu, C.-Y., & Chen, C.-J. (2015). Characterization of photonic nanojets in dielectric microdisks. *Physica E Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 73, 226–234. DOI 10.1016/j.physe.2015.06.005.
50. McCloskey, D., Wang, J. J., & Donegan, J. F. (2012). Low divergence photonic nanojets from Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> microdisks. *Optics Express*, 20(1), 128–140. DOI 10.1364/OE.20.000128.
51. McCloskey, D., Ballantine, K. E., Eastham, P. R., & Donegan, J. F. (2015). Photonic nanojets in Fresnel zone scattering from non-spherical dielectric particles. *Optics Express*, 23(20), 26326. DOI 10.1364/OE.23.026326.
52. Minin, I. V., Minin, O. V., & Geints, Y. E. (2015). Localized EM and photonic jets from non-spherical and non-symmetrical dielectric mesoscale objects: Brief review. *Annalen der Physik*, 527(7). DOI 10.1002/andp.201500132.
53. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2016). Photonic jets formation by non spherical axially and spatially asymmetric 3D dielectric particles. *Diffractive Optics and Nanophotonics* (pp. 31–54). Berlin: Springer.
54. 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. 54003.
55. Minin, I. V., Minin, O. V., Glinskiy, I. A., Khabibullin, R. A., Malureanu, R., Lavrinenko, A. V., Yakubovsky, D. I., Arsenin, A. V., Volkov, V. S., & Ponomarev, D. S. (2020). Plasmonic nanojet: an experimental demonstration. *Optics Letters*, 45, 3244–3247. DOI 10.1364/OL.391861.
56. Pacheco-Peña, V., Minin, I. V., Minin, O. V., & Beruete, M. (2016). Comprehensive analysis of photonic nanojets in 3D dielectric cuboids excited by surface plasmons. *Annalen der Physik*, 528(9-10), 684–692. DOI 10.1002/andp.201600098/.
57. Pacheco-Peña, V., Minin, I. V., Minin, O. V., & Beruete, M. (2016). Increasing Surface Plasmons Propagation via Photonic Nanojets with Periodically Spaced 3D Dielectric Cuboids. *Photonics*, 3(10). DOI 10.3390/www.mdpi.com/journal/photonics.
58. Luk'yanchuk, B. S. (2002). *Laser Cleaning*. World Scientific, 466 p.

59. Beklemyshev, V. I., Makarov, V. V., Makhonin, I. I., Petrov, Yu. N., Prokhorov, A. M., & Pustovoy, V. I. (1987). Photo desorption of metal ions in a semiconductor-water system. *JETP Letters*, 46(7), 347–350.
60. Zapka, W., Asch, K., & Meissner, K. (1998). Removal of particles from solid-state surfaces by laser. European Patent EP 0297506 B1.
61. Wang, Z. B., Guo, W., Luk'yanchuk, B. S., Pena, A., Li, L., & Liu, Z. (2008). Laser ablation on nanoscales. *Proceedings SPIE. High-Power Laser Ablation VII*, 7005. DOI 10.1117/12.780065.
62. Fardel, R., McLeod, E., Tsai, Y.-C., & Arnold, C. B. (2010). Nanoscale ablation through optically trapped microspheres. *Applied Physics A*, 101, 41–46.
63. Münzer, H.-J., Mosbacher, M., Bertsch, M., Dubbers, O., Burmeister, F., Pack, A., Wannemacher, R., Runge, B.-U., Bäuerle, D., Boneberg, J., & Leiderer, P. (2002). Optical near-field effects in surface nanostructuring and laser cleaning. *Proceedings SPIE*, 4426. DOI 10.1117/12.456827.
64. Mosbacher, M., Munzer, H. J., Zimmermann, J., Solis, J., Boneberg, J., & Leiderer, P. (2001). Optical field enhancement effects in laser-assisted particle removal. *Applied Physics a-Materials Science & Processing*, 72, 41–44.
65. Lu, Y., Theppakuttai, S., & Chen, S. C. (2003). Marangoni effect in nanosphere-enhanced laser nanopatterning of silicon. *Applied Physics Letters*, 82, 4143–4145.
66. Theppakuttai, S., & Chen, S. (2003). Nanoscale surface modification of glass using a 1064 nm pulsed laser. *Applied Physics Letters*, 83, 758–760.
67. Chen, Z. G., Taflove, A., & Backman, V. (2004). Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique. *Optics Express*, 12, 1214–1220.
68. Kim, J., Cho, K., Kim, I., Kim, W. M., Lee, T. S., & Lee, K.-S. (2012). Fabrication of plasmonic nanodiscs by photonic nanojet lithography. *Applied Physics Express*, 5, P. 025201.
69. Zhang, X. A., Chen, I.-T., & Chang, C. H. (2019). Recent progress in near-field nanolithography using light interactions with colloidal particles: from nanospheres to three-dimensional nanostructures. *Nanotechnology*, 30, P. 352002.
70. Chen, X., Wu, T., Gong, Z., Li, Y., Zhang, Y., & Li, B. (2020). Subwavelength imaging and detection using adjustable and movable droplet microlenses. *Photonics Research*, 8, 225–234.
71. Astratov, V. N., Darafsheh, A., Kerr, M. D., Allen, K. W., Fried, N. M., Antoszyk, A. N., & Ying, H. S. (2010). Photonic nanojets for laser surgery. *SPIE Newsroom*, 12, 32–34.
72. Yan, B., Yue, L., Monks, J. N., Yang, X., Xiong, D., Jiang, C., & Wang, Z. B. (2020). Superlensing Plano-Convex-Microsphere (PCM) lens for direct laser nano marking and beyond. *Optics Letters*, 45, 1168–1171.
73. Wang, F., Liu, L., Yu, P., Liu, Z., Yu, H., Wang, Y., & Li, W. J. (2016). Three-Dimensional Super-Resolution Morphology by Near-Field Assisted White-Light Interferometry. *Scientific Reports*, 6, P. 24703.
74. Qian, L., & Jianqi, S. (2021). Effect of Resonant Scattering on Photonic Jet of a Microsphere. *Acta Photonica Sinica*, 50, P. 729002.
75. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2015). *Kvazioptika: sovremennye tendentsii razvitiya [Quasi-optics: current development trends]*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 163 p. [in Russian].
76. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2018). Superresolution in acoustic focusing devices. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(2), 231–244 [in Russian].
77. Heifetz, A., Kong, S.-Ch., Sahakian, A. V., Taflove, A., & Backman, V. (2009). Photonic Nanojets. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 6, 1979–1992.
78. Lecler, S., Takakura, Y., & Meyrueis, P. (2005). Properties of a three-dimensional photonic jet. *Optics Letters*, 30, 2641–2643.
79. Wu, W., Katsnelson, A., Memis, O. G., & Mohsen, H. (2007). A deep sub-wavelength process for the formation of highly uniform arrays of nanoholes and nanopillars. *Nanotechnology*, 18, P. 485302.
80. Fukuda, N., Kunishio, K., & Nakayama, S. (2007). Dry-Etching System with Q-switched DPSS Laser for Flat Panel Displays. *Journal of Laser Micro Nanoengineering*, 2, 241–246.
81. Geints, Y. E., Minin, I. V., Panina, E. K., Zemlyanov, A. A., & Minin, O. V. (2017). Comparison of photonic nanojets key parameters produced by nonspherical microparticles. *Optical and Quantum Electronics*, 49, P. 118. DOI 10.1007/s11082-017-0958-y.
82. Minin, I. V., Minin, O. V., & Karpik, A. P. (2021). *Fotonnye nanostrui, terastrui i akustostrui v nauke i tekhnike [Photonic nanojets, terajets and acoustic jets in science and technology]*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 168 p. [in Russian].

83. Li, H., Song, W., Zhao, Y., Cao, Q., & Wen, A. (2021). Optical Trapping, Sensing and Imaging by Photonic Nanojets. *Photonics*, 8, P. 434. DOI 10.3390/photonics8100434.
84. Darafsheh, A. (2021). Photonic nanojets and their applications. *Journal of Physics: Photonics*, 3, P. 022001.
85. Minin, O. V., & Minin, I. V. (2021). Optical Phenomena in Mesoscale Dielectric Particles. *Photonics*, 8, P. 591.
86. Chen, L., Zhou, Y., Wu, M.-X., & Hong, M.-H. (2018). Remote-mode microsphere nano-imaging: new boundaries for optical microscopes. *Opto-Electronic Advances*, 1, P. 170001.
87. Chen, Z., Taflove, A., & Backman, V. (2004). Equivalent volume-averaged light scattering behavior of randomly inhomogeneous dielectric spheres in the resonant range. *Optical Express*, 12, P. 1214.
88. Abbe, E. (1873). Beiträ"ge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung. *Arch. Mikrosk. Anat.*, 9, 413–418.
89. Rayleigh, L. (1879). Investigations in optics, with special reference to the spectroscope. London, Edinburgh, Dublin. *Philosophical Magazine*, 8, 477–486.
90. Chen, L., Zhou, Y., Zhou, R., & Hong, M. (2020). Microsphere – Toward Future of Optical Microscopes. *iScience*, 23, P. 101211.
91. Wang, Z., Guo, W., Li, L., Luk'yanchuk, B., Khan, A., Liu, Z., Chen, Z., & Hong, M. (2011). Optical virtual imaging at 50 nm lateral resolution with a white-light nanoscope. *Nature Communications*, 2, 216–218.
92. Lu, Y. F., Zhang, L., Song, W. D., Zheng, Y. W., & Luk'yanchuk, B. S. (2000). Laser writing of a subwavelength structure on silicon (100) surfaces with particle-enhanced optical irradiation. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 72, 457–459.
93. Wang, Z. B., & et al. (2011). Optical virtual imaging at 50 nm lateral resolution with a whitelight nanoscope. *Nature Communications*, 2(1), P. 218. DOI 10.1038/ncomms1211.
94. Krivitsky, L. A., Wang, J. J., Wang, Z., & Luk'yanchuk, B. (2013). Locomotion of microspheres for super-resolution imaging. *Scientific Report*, 3(1), P. 3501. DOI 10.1038/srep03501.
95. Yan, Y., Li, L., Feng, C., Guo, W., Lee, S., & Hong, M. H. (2014). Microsphere coupled scanning laser confocal nanoscope for sub-diffraction limited imaging at 25 nm lateral resolution in the visible spectrum. *ACS Nano*, 8, 1809–1816.
96. Monks, J. N., Yan, B., Hawkins, N., Vollrath, F., & Wang, Z. B. (2016). Spider silk: mother nature's bio-superlens. *Nano Letters*, 16, 5842–5845.
97. Wang, F., Liu, L., Yu, H., Wen, Y., Yu, P., Liu, Zh., Wang, Y., & Li, W. J. (2016). Scanning superlens microscopy for non-invasive large field-of-view visible light nanoscale imaging. *Nature Communications*, 7, P. 13748.
98. Guo, M., Ye, Y.-H., Hou, J., & Du, B. (2016). Size-dependent optical imaging properties of high-index immersed microsphere lens. *Applied Physics B*, 122(3). DOI 10.1007/s00340-016-6335-x.
99. Lee, S., Li, L., Wang, Z., Guo, W., Yan, Y., & Wang, T. (2013). Immersed transparent microsphere magnifying subdiffraction-limited objects. *Applied Optics*, 52, P. 7265–7270.
100. Hao, X., Kuang, C., Liu, X., Zhang, H., & Li, Y. (2011). Microsphere based microscope with optical super-resolution capability. *Applied Physics Letters*, 99, P. 203102.
101. Wang, F., Yang, S., Ma, H., Shen, P., Wei, N., Wang, M., Xia, Y., Deng, Y., & Ye, Y.-H. (2018). Microsphere-assisted super-resolution imaging with enlarged numerical aperture by semi-immersion. *Applied Physics Letters*, 112, P. 023101.
102. Hoff, J. C., & Akin, E. W. (1986). Microbial resistance to disinfectants: Mechanisms and significance. *Environmental Health Perspectives*, 69, 7–13.
103. Lee, S., Li, L., Ben-Aryeh, Y., Wang, Z., & Guo, W. (2013). Overcoming the diffraction limit induced by microsphere optical nanoscopy. *Journal of Optics*, 15, P. 125710.
104. Chen, L., Zheng, X., Du, Z., Jia, B., Gu, M., & Hong, M. (2015). A frozen matrix hybrid optical nonlinear system enhanced by a particle lens. *Nanoscale*, 7, 14982–14988.
105. Chen, L., Yin, Y., Li, Y., & Hong, M. (2019). Multifunctional inverse sensing by spatial distribution characterization of scattering photons. *Opto-Electronic Advances*, 2, P. 190019.
106. Gao, M., Ng, S. W. L., Chen, L., Hong, M., & Ho, G. W. (2017). Self-regulating reversible photocatalytic-driven chromism of a cavity enhanced optical field TiO<sub>2</sub>/CuO nanocomposite. *Journal of Materials Chemistry A*, 5, 10909–10916.
107. Jin, Y. J., Chen, L. W., Wu, M. X., Lu, X. Z., Zhou, R., & Hong, M. H. (2016). Enhanced saturable absorption of the graphene oxide film via photonic nanojets. *Optical Materials Express*, 6, 1114–1121.



108. Soh, J. H., Wu, M., Gu, G., Chen, L., & Hong, M. (2016). Temperature-controlled photonic nanojet via VO<sub>2</sub> coating. *Applied Optics*, 55, 3751–3756.
109. Jin, B., Bidney, G. W., Anisimov, I., Limberopoulos, N. I., Allen, K. W., Maslov, A. V., & Astratov, V. N. (2022). Label-free cellphone microscopy with submicron resolution through high-index contact ball lens for in vivo melanoma diagnostics and other applications. *Proceedings SPIE Label-free Biomedical Imaging and Sensing (LBIS)*, 11972. DOI 10.1117/12.2609911.
110. Wang, T., Kuang, C., Hao, X., & Liu, X. (2011). Subwavelength focusing by a microsphere array. *Journal of Optics*, 13, 1–5. DOI 10.1088/2040-8978/13/3/035702.
111. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2021). Problems of metrology of terahertz radiation in medicine. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 26(3), 162–180 [in Russian].
112. Yanina, I. Yu., Dyachenko, P. A., Abdurashitov, A. S., Shalin, A. S., Minin, I. V., Minin, O. V., Bulygin, A. D., Vrazhnov, D. A., Kistenev, Y. V., & Tuchin, V. V. (2023). Light distribution in fat cell layers at physiological temperatures. *Scientific Reports*, 13, P. 1073. DOI 10.1038/s41598-022-25012-9.
113. Minin, O. V., Minin, I. V., & Cao, Y. (2023). Time domain self-bending photonic hook beam based on freezing water droplet. *Scientific Reports*, 13, Article number 7732.
114. Minin, O. V., Zhou, S., Liu, C.-Y., Antonicole, J., Kong, N., & Minin, I. V. (2022). Magnetic Concentric Hot-Circle Generation at Optical Frequencies in All-Dielectric Mesoscale Janus Particles. *Nanomaterial*, 12, P. 3428. DOI 10.3390/nano12193428.
115. Minin, I. V., Zhou, S., & Minin, O. V. (2022). Superresonance effect in a mesoscale sphere with a low refractive index. *Optika atmosfery i okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 35(9), 697–703. DOI 10.15372/AOO20220901 [in Russian].
116. Yue, L., Yan, B., Monks, J. N., Dhama, R., Jiang, C., Minin, O. V., Minin, I. V., & Wang, Z. (2019). Full three-dimensional Poynting vector analysis of great field-intensity enhancement in a specifically sized spherical-particle. *Scientific Report*, 9, P. 20224.
117. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2022). Optical superresonance in mesoscale dielectric spheres. *Fotonika [Photonics]*, 16(4), 306–317 [in Russian].
118. Fano, U. (1961). Effects of configuration interaction on intensities and phase shift. *Physical Review*, 124(6), P. 1866.
119. Minin, I. V., Minin, O. V., & Joe, S. (2022). High-order Fano resonance in a dielectric mesoscale sphere made of a material with a low refractive index. *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki [JETP Letters]*, 116(3), 146–150 [in Russian].
120. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2022). Peculiarities of the generation of extreme electromagnetic fields in a dielectric mesodimensional sphere, taking into account the environment. *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki [JETP Letters]*, 48(18), 41–44 [in Russian].
121. Liu, Ch.-Y., Minin, O. V., & Minin, I. V. (2019). Periodical focusing mode achieved through a chain of mesoscale dielectric particles with a refractive index near unity. *Optics Communications*, 434, 110–117.
122. Geints, Y., Minin, I. V., & Minin, O. V. (2022). Whispering-gallery modes promote enhanced optical backflow in a perforated dielectric microsphere. *Optics Letters*, 47(7), 1786–1789. DOI 10.1364/OL.452683.
123. Geints, Y. E., Minin, I. V., & Minin, O. V. (2022). Simulation of enhanced optical trapping in a perforated dielectric microsphere amplified by resonant energy backflow. *Optics Communications*, 524, P. 128779.

#### 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

© O. V. Minin, I. V. Minin, 2024