

УДК 535.016

Оптическое манипулирование микро- и нанообъектами на основе структурированных мезоразмерных частиц: краткий обзор

И.В. Минин^{1,2,3}, О.В. Минин^{1,2,3}, Ю.Э. Гейнц⁴,
Е.К. Панина⁴, А. Карабчевская^{5*}

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий
630005, г. Новосибирск, пр. Плеханова, 10

² Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

⁴ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634022, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

⁵ Школа электротехники и вычислительной техники
8410501, Израиль, Беер-Шева, Университет им. Бен Гуриона в Негеве

Поступила в редакцию 21.02.2020 г.

Пространственное разрешение обычной оптики, необходимое для неразрушающего захвата микрообъектов, ограничено дифракцией до величины, равной половине длины волны излучения. Несмотря на это ограничение, использование оптических методов является одним из основных направлений в биологических и биомедицинских исследованиях, так как только эти методы оказывают минимальное воздействие на живые организмы. Быстрый прогресс в этой области во многом связан с развитием новых оптических технологий, а значительный прогресс в мезоразмерной фотонике позволил исследователям получить методы управления структурированными пучками для оптических ловушек. В настоящей работе мы рассмотрели некоторые последние тенденции в области оптического манипулирования на основе мезомасштабных диэлектрических частиц.

Ключевые слова: мезомасштабный элемент, диэлектрическая частица, оптическая сила, фотонная наноустройство, фотонный крюк, оптическое манипулирование; mesoscale element, dielectric particle, optical power, photonic nanojet, photon hook, optical manipulation.

Введение

Впервые о существовании светового давления сделал предположение И. Кеплер в XVII в., а экспериментально его обнаружил П.Н. Лебедев в 1899 г. [1]. Возможность захвата и неразрушающего переноса отдельных объектов микронных и субмикронных размеров под действием силы света имеет большие перспективы в различных областях науки и техники [2–4]. Изобретение оптического пинцета и его применение в биофизике было отмечено Нобелевской премией по физике в 2018 г. Особенно актуальны в последнее время вопросы разработки новых методов оптического управления нано- и микрочастицами, пространственной локализации и усиления электромагнитного поля на субволновых масштабах. Но хорошо известно, что пространственное раз-

решение обычной оптики определяется только длиной волны излучения (в среде) и числовой апертурой оптического объектива; оно не превышает величины порядка половины длины волны из-за фундаментальных дифракционных ограничений [5].

В последние годы были получены и использованы разнообразные типы структурированных оптических пучков [6–8] для механического воздействия на наночастицы в субволновом масштабе [9–11]. Ниже кратко рассмотрим методы локализации электромагнитного поля, основанные на применении принципов мезомасштабной диэлектрической фотоники.

Мезомасштабная диэлектрическая фотоника предполагает взаимодействие излучения с диэлектрическими объектами промежуточного масштаба («размерный» параметр $Mi \ q = 2\pi r/\lambda \sim (2-20)\pi$ [12–15], где λ – длина волны излучения; а r – характерный радиус частицы, которые слишком велики, чтобы быть охарактеризованными как простые диполи, и слишком малы, чтобы быть описанными в рамках геометрической оптики.

* Игорь Владиленович Минин (prof.minin@gmail.com); Олег Владиленович Минин (oleg.minin@ngs.ru); Юрий Эльмарович Гейнц (ygeints@iao.ru); Екатерина Константиновна Панина (pek@iao.ru); Алина Карабчевская (alinak@bgu.ac.il).

Субволновое управление электромагнитной энергией обычно связано с резонансными явлениями [16, 17]. Далее кратко рассмотрим класс нерезонансных дифракционных элементов (мезомасштабные диэлектрические частицы) для манипуляций нано- и микрочастицами.

1. Наноструктурированные диэлектрические частицы

Возможности манипулирования светом на основе мезомасштабных диэлектрических структур привлекают внимание все большего числа исследователей. Предложен широкий спектр способов субволновой локализации света. Исследованы фотонно-кристаллические (ФК) линзы [17–19], элементы трехмерной дифракционной оптики [20, 21] и плоские плазмонные линзы на основе нанослоев [22–24] для фокусировки света за пределами дифракционного предела. В 2017 г. была предложена коническая двумерная пластинчатая линза на основе нанослоя с плазмонной зоной для фокусировки дальнего поля со сверхразрешением [25] путем возбуждения поверхностных плазмонных волн и их сопряжения с распространяющимися излучающими модами. Градиентные ФК-линзы с воздушными отверстиями различного размера были исследованы в [26, 27]. Сообщалось, что с помощью такой линзы можно получить локализованный пучок света с полной шириной на уровне половинной интенсивности поля (FWHM) $\sim \lambda/75$ [27].

Более привлекательными кажутся фотонные наноструи (ФНС) [12–15, 28] из-за простоты реализации и компактных размеров фокусирующей частицы. Но минимальная ширина пучка ФНС обычно составляет $\sim \lambda/3$ [12–15], поэтому необходимо искать новые способы дальнейшего уменьшения размера области локализации электромагнитного поля ФНС.

Для глубокой субволновой фокусировки света далеко за дифракционным пределом $\lambda/2n$ в [27] была предложена наноструктурированная диэлектрическая микросфера. Усиление поля в такой наноструктурированной сфере обусловлено контрастом между диэлектрической проницаемостью материала наностержней и материала диэлектрических микрочастиц. Предложенная наноструктурированная мезомасштабная сфера обладает рядом уникальных свойств. Например, она может производить высокую напряженность электрического поля в области отверстия (с низким показателем преломления, например, в воздухе) на уровнях, которые не могут быть достигнуты с помощью обычных ФНС [12–15], производимых сферическими частицами с тем же диаметром, но без наноструктурирования. Численное моделирование показывает [27], что световое поле локализовано внутри наноотверстия, даже когда диаметр этого отверстия является субволновым (по крайней мере, $\lambda/40$). При этом поперечный размер фокального пятна

вблизи теневой поверхности частицы сопоставим с размером наноотверстия.

Пример локализации поля в наноструктурированной мезомасштабной сфере приведен на рис. 1. Здесь показано распределение относительной интенсивности оптического поля в различных продольных сечениях (по ходу распространения оптического излучения) диэлектрической микросферы с нанометровым сквозным отверстием, освещаемой плоской электромагнитной волной. На рис. 1, *г* построен поперечный профиль интенсивности в плоскости *xу*, отстоящей от среза отверстия на расстояние $\lambda/1000$. Видно, что наноотверстие в диэлектрической мезомасштабной частице позволяет «сжать» оптическое поле вблизи ее задней поверхности и получить характерную для ФНС сверхлокализацию интенсивности оптического поля до размеров этого наноотверстия.

На основе этих исследований мы предложили концепцию простого в реализации «оптического пылесоса» [29]. Основная идея заключается в использовании наноструктурированной диэлектрической мезомасштабной частицы (сферической, цилиндрической или кубической формы) для перенаправления оптического импульса и достижения желаемых оптомеханических эффектов для манипуляции металлическим наноразмерным объектом. На основе численного моделирования было показано, что оптические силы F_{opt} , действующие на золотую нано-сферу, многократно усиливаются вблизи наноотверстия в мезомасштабной диэлектрической частице, что приводит к эффективному движению металлических наночастиц в сторону наноотверстия. Например, анализ фазового портрета движения, т.е. зависимости скорости перемещения частицы V от ее координаты z , наночастицы (сфокусированная линза с $NA = 0,5$ при $\lambda = 600$ нм и мощности 10 Вт) показал [29], что через несколько миллисекунд от начала светового воздействия наночастица Au перемещается до конечной точки своей траектории, расположенной на расстоянии ~ 20 нм внутри отверстия кубической диэлектрической частицы (рис. 2).

Из рисунка, в частности, следует, что отверстие в диэлектрической микрочастице может быть не сквозным, а небольшой глубины со стороны теневой поверхности этой частицы, поскольку градиент силы всегда максимальный около отверстия. Более того, видно, что увеличение показателя преломления частицы выше характерного уровня для образования фотонной струи (например, равного 2,2 на рис. 2) приводит к существенному сокращению расстояния «захвата» металлической наночастицы (в ~ 3 раза). Это связано с тем, что при показателе преломления материала частицы выше 2 электромагнитное поле локализуется внутри этой частицы и не выходит за пределы ее теневой поверхности [16].

Численное моделирование показывает, что предложенная наноструктурированная диэлектрическая мезомасштабная частица может быть использована для оптомеханического улавливания металлических

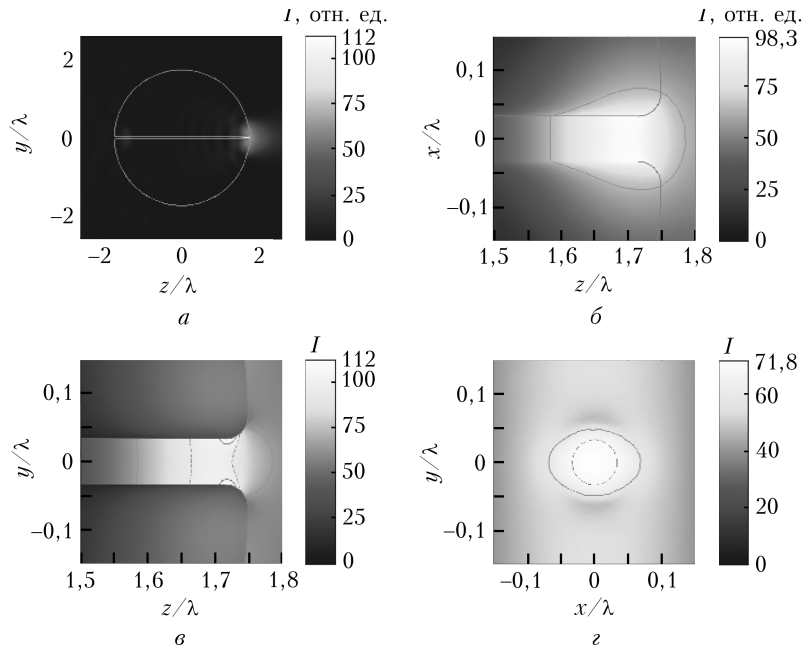


Рис. 1. Распределение интенсивности в окрестности диэлектрической микросферы (диаметр $D_s = 3,5\lambda$, показатель преломления $n = 1,5$) со сквозным отверстием (диаметр $\lambda/15$): a – общий вид; $b, в$ – увеличенное изображение выходного среза отверстия; $г$ – интенсивность в поперечной плоскости xy , расположенной на расстоянии $\lambda/1000$ от среза отверстия. Оптическое излучение падает слева направо. Рисунок взят из [22]

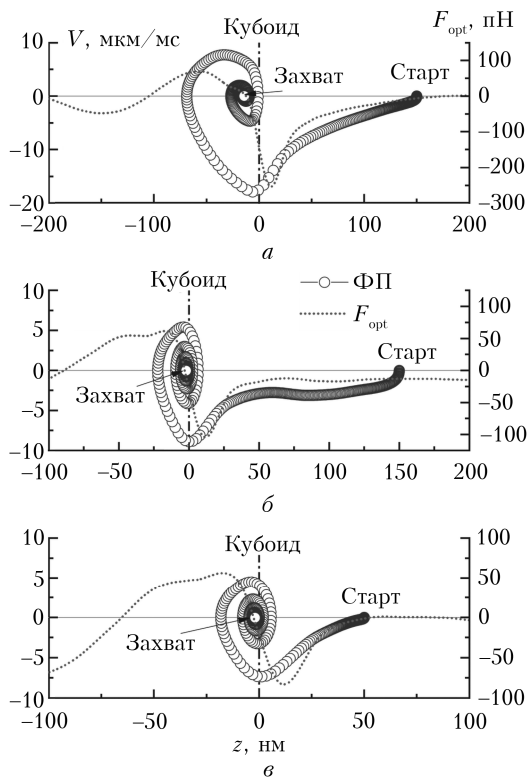


Рис. 2. Фазовые портреты (ФП) траектории 15-нм золотой сферы, изначально расположенной около теневой поверхности кубической частицы («старт») на одной оси с отверстием (граница помечена как «кубоид») [29]. Длина стороны грани частицы равна длине волны (600 нм), показатель преломления материала: $a - n = 2,0$; $б - n = 1,8$; $в - n = 2,2$ нм. Излучение падает в направлении оси z . Для справки приведено распределение z -компоненты оптической силы ловушки

наночастиц. По сравнению с традиционными оптическими методами, она имеет большой потенциал в биомедицинских, химических, технологических приложениях, системах очистки воздуха и воздушных фильтрах [30–34].

2. «Фотонный крюк»: новый субволновой самоизгибающийся структурированный световой пучок

В настоящее время оптическая транспортировка и улавливание активно развиваются. Было исследовано много новых эффектов, которые можно использовать для захвата. Например, в 2015 г. был открыт новый тип субволнового структурированного светового пучка, получивший название фотонного крючка (photonic hook, PH) [35]. Свет от фотонного крючка локализуется не вдоль прямой, а по криволинейной траектории [35–39] за счет дифракции электромагнитной волны на мезомасштабной диэлектрической пространственно-структурированной частице (Януса), выполненной в виде кубоида с нарушенной симметрией [35, 36, 38]. Отличительные особенности PH заключаются в том, что поперечный размер и радиус кривизны пучка составляют долю длины волны падающего излучения, а боковые лепестки не повторяют форму основного пучка и не изогнуты [36–39]. Отметим также, что для генерации хорошо изученных криволинейных пучков Эйри обычно требуются дорогостоящие и сложные оптические элементы с кубической фазой, что нередко делает оптические элементы непригодными для встраивания в оптическую систему.

Недавние исследования семейств PH-пучков позволили реализовать их для различных типов

волновых взаимодействий, включая оптику [37–39], ТГц [38], поверхностные плазмонные волны [40], акустику [41], и в целом дали новый импульс развитию мезомасштабной фотоники, обеспечив новые возможности в манипулировании частицами на субволновых масштабах [37, 39] благодаря эффекту масштабирования. Из оптики известно, что если есть два объекта одинаковой формы с одинаковыми свойствами материала, но разного размера, то они одинаково рассеивают падающую на них электромагнитную волну при условии сохранения подобия, когда отношение линейных размеров этих объектов к длине волны излучения одно и то же.

Фотонный крючок [42–48], образованный структурированным диэлектрическим цилиндром со встроенным стеклянным кубиком, на основе численного моделирования обсуждался в [42]. Специально разработанные пятислойные диэлектрические цилиндры позволяют получать двойные РН [44]. Недавно для генерации фотонных крючков были предложены диэлектрические частицы с нарушенной симметрией, состоящие из материалов с различными показателями преломления [45, 46] и численно исследованные в [45–47], и би-эллиптические цилиндрические частицы [48].

Генерация криволинейной области локализации излучения на основе металлинзы в видимом диапазоне описана также в недавней работе [49]. Эти исследования не имеют отношения к фотонным крючкам, поскольку размеры металлинзы не удовлетворяют сформулированному выше условию мезомасштабности, а структура локализованного поля не отвечает характерным признакам фотонного крючка [35–39]: кривизна пучка существенно больше длины волны, а пространственная структура поля, включая структуру боковых максимумов, аналогична распределению пучков Эйри.

В целом исследования показали возможность генерирования пространственно-структурированных электромагнитных и акустических полей, позволяющих помимо захвата осуществлять более разнообразные виды оптических манипуляций нанообъектами. В частности, они привели к концепции оптического крючка на основе оптико-механического манипулятора, который позволяет контролировать движение захваченных частиц по искривленной траектории даже вокруг диэлектрических препятствий [37, 50].

Моделирование [51] показывает, что в приближении, когда частица является электрическим диполем, т.е. частицей Рэлея, наночастица-мишень движется вокруг диэлектрической пластины-препятствия. Это позволяет лучше маневрировать наночастицами-мишенями вокруг, например, стеклянных препятствий. С другой стороны, металлическая (Au) пластина полностью нарушает как сформированное локализованное поле, так и траекторию движения такой наночастицы-мишени [37]. Одно из возможных биомедицинских применений этой концепции *in vitro* заключается в том, чтобы направлять клетки по изогнутой траектории для последующего анализа [50]. Концепция фотонного крючка предполагает

прецизионный контроль за движением частицы для манипулирования и сортировки клеток на платформах «лаборатория на кристалле» (Lab-on-chip) и микрофлюидных устройствах без необходимости многократного захвата луча.

Еще одна интересная область применения мезомасштабных диэлектрических частиц — оптические ловушки на основе стоячих волн. Улавливание и манипулирование наночастицами в стоячей волне (которая может генерироваться с помощью двух встречно распространяющихся когерентных ФНС) в режиме пропускания рассматривались в [52], а в режиме отражения впервые исследовались в [53].

Заключение

Основные функциональные возможности оптических пинцетов определяются главным образом пространственной структурой оптических ловушек и степенью локализации излучения. Но электромагнитное излучение обладает своим характерным масштабом — длиной волны. Для современных задач физики и биологии это достаточно большой масштаб. Для эффективной работы и управления наночастицами соответствующие оптические «управляющие» элементы должны обеспечивать работоспособность на субволновых масштабах — меньше длины волны [54–60]. Эти проблемы относятся к новому современному направлению научных исследований — структурированные субволновые пучки. Основная задача, решаемая с помощью таких пучков, — манипулировать нанообъектами на масштабах меньше длины волны, т.е. делать то, что в традиционной оптике ранее считалось принципиально невозможным.

В последнее время интенсивно развивается мезомасштабная диэлектрическая фотоника, которая имеет дело с оптическими элементами небольших размеров (порядка нескольких длин волн), отличающимися относительно простотой технической реализации. В области оптико-механических манипуляций наночастицами системы на основе принципов мезомасштабной фотоники могут быть легко интегрированы в малагабаритную платформу «лаборатория на кристалле». С использованием нового субволнового структурированного пучка становится возможным выполнять операции манипулирования объектами на субволновом уровне.

Кроме того, с помощью эффекта оптического фотонного крючка микрочастицы могут быть направлены (транспортированы) на расстояния в масштабах длины волны оптического излучения, например, для целей сортировки субклеточного биологического материала. Так, частицы могут быть отсортированы по показателю преломления, форме и размеру. На основе концепции фотонного крючка также может быть разработана различная форма сверхточного лазерного скальпеля [61].

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 20-57-S52001, Минин И.В., Минин О.В.), в рамках программы повышения конку-

рентоспособности Томского политехнического университета и «Научного фонда им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» и государственного задания ИОА СО РАН (Ю.Э. Гейнц, Е.К. Панина).

1. *Lebedew P.* Untersuchungen liber die Dnickkräfte des Lichtes // *Annalen der Physik.* 1901. Fasc. 4, Bd 6. P. 433–458.
2. *Gao D., Ding W., Nieto-Vesperinas M., Ding X., Rahman M., Zhang T., Lim C.T., Qiu C.-W.* Optical manipulation from the microscale to the nanoscale: fundamentals, advances and prospects // *Light: Sci. & Appl.* 2017. V. 6. DOI: 10.1038/lsa.2017.39
3. *Rodriguez-Sevilla P., Labrador-Paez L., Jaque D., Haro-Gonzalez P.* Optical trapping for biosensing: materials and applications // *J. Mater. Chem. B.* 2017. V. 5, P. 9085–9101.
4. *Kotsifaki D.G., Chormaic S.N.* Plasmonic optical tweezers based on nanostructures: fundamentals, advances and prospects // *Nanophotonics.* 2019. V. 8, N 7. P. 1227–1245.
5. *Stelzer E.H.K.* Beyond the diffraction limit? // *Nature.* 2002. V. 417. P. 806–807.
6. *Rubinsztein-Dunlop H., Forbes A., Berry M.V., Dennis M.R., Andrews D.L., Mansuripur M., Denz C., Alpmann C., Banzer P., Bauer T., Karimi E., Marrucci L., Padgett M., Ritsch-Marte M., Litchinitser N.M., Bigelow N.P., Rosales-Guzmán C., Belmonte A., Torres J.P., Neely T.W., Baker M., Gordon R., Stilgoe A.B., Romero J., White A.G., Fickler R., Willner A.E., Xie G., McMorran B., Weiner A.M.* Roadmap on structured light // *J. Opt.* 2017. V. 19. P. 013001.
7. *Brasselet E.* Structured light: Optomechanical tomography // *Nature Phys.* 2016. V. 12, N 8. P. 725.
8. *Shi H., Bhattacharya M.* Optomechanics based on angular momentum exchange between light and matter // *J. Phys. B.* 2016. V. 49. P. 153001.
9. *Sukhov S., Dogariu A.* Negative nonconservative forces: Optical 'tractor beams' for arbitrary objects // *Phys. Rev. Lett.* 2011. V. 107, N 20. Art. 203602.
10. *Dogariu A., Sukhov S., Saenz J.* Optically induced 'negative forces' // *Nature Photonics.* 2013. V. 7, N 1. P. 24–27
11. *Brzobohatý O., Karásek V., Šiler M., Chvátal L., Čížmár T., Zemánek P.* Experimental demonstration of optical transport, sorting and self-arrangement using a 'tractor beam' // *Nature Photonics.* 2013. V. 7, N 2. P. 123–127.
12. *Heifetz A., Kong S., Sahakian A., Taflove A., Backman V.* Photonic nanojets // *J. Comput. Theor. Nanosci.* 2009. V. 6. P. 1979–1992.
13. *Geints Yu.E., Panina E.K., Zemlyanov A.A.* Control over parameters of photonic nanojets of dielectric microspheres // *Opt. Commun.* 2010. V. 283. P. 4775–4781.
14. *Гейнц Ю.Э., Панина Е.К., Землянов А.А.* Сравнительный анализ ключевых параметров фотонных наноструй от осесимметричных несферичных частиц // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 9. С. 706–710; *Geints Yu.E., Panina E.K., Zemlyanov A.A.* Comparative Analysis of Key Parameters of Photonic Nanojets from Axisymmetric Nonspherical Microparticles // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 1. P. 41–44.
15. *Luk'yanchuk B., Paniagua-Dominguez R., Minin I.V., Minin O.V., Wang Z.* Refractive index less than two: photonic nanojets yesterday, today and tomorrow // *Opt. Mater. Express.* 2017. V. 7. P. 1820–1847.
16. *Wang Z., Luk'yanchuk B., Yue L., Paniagua-Dominguez R., Yan B., Monks J., Minin O.V., Minin I.V., Huang S., Fedyanin A.* High order Fano resonances and giant magnetic fields in dielectric microspheres // *Sci. Rep.* 2019. V. 9, iss. 20293.
17. *Wang B., Shen L., He S.* Superlenses Formed by a One-dimensional Dielectric Photonic Crystal // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2008. V. 25. P. 391–395.
18. *Minin I.V., Minin O.V., Triandafilov Y.R., Kotlyar V.V.* Focusing properties of two types of diffractive photonic crystal lens // *Opt. Memory Neural Networks.* 2008. V. 17. P. 244–248.
19. *Gaujillet F., Akmansoy E.* Design and experimental evidence of a flat graded-index photonic crystal lens // *J. Appl. Phys.* 2013. V. 14. DOI: 10.1063/1.4817368.
20. *Minin I.V., Minin O.V., Gagnon N., Petosa A.* FDTD analysis of a flat diffractive optics with sub-Rayleigh limit resolution in MM/THz waveband // *Digest of the Joint 31st Intern. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 14th Inter. Conf. on Terahertz Electronics.* Shanghai, China. September, 2006. P. 170.
21. *Minin I.V., Minin O.V.* 3D diffractive lenses to overcome the 3D Abbe subwavelength diffraction // *Chin. Opt. Lett.* 2014. V. 12, N 6. URL: <http://www.opticsjournal.net/ViewFullPDF.htm?aid=OJ140530000016bHeKgN> (last access: 21.01.2020).
22. *Zhu Y., Zhou S., Wang Z., Yu Y., Yuan W., Liu W.* Investigation on Super-Resolution Focusing Performance of a TE-Polarized Nanoslit-Based Two-Dimensional Lens // *Nanomaterials.* 2020. V. 10, N 1. DOI: 10.3390/nano10010003.
23. *Chen K.R.* Focusing of light beyond the diffraction limit of half the wavelength // *Opt. Lett.* 2010. V. 35. P. 3763–3765.
24. *Ishii S., Kildishev A.V., Shalaev V.M., Drachev V.P.* Controlling the wave focal structure of metallic nanoslit lenses with liquid crystals // *Laser Phys. Lett.* 2011. V. 8. P. 828–832.
25. *Mote R.G., Minin O.V., Minin I.V.* Focusing behavior of 2-dimensional plasmonic conical zone plate // *Opt. Quant. Electron.* 2017. V. 49, N 8. P. 271–275.
26. *Jin L., Zhu Q.Y., Fu Y.Q., Yu W.X.* Flat lenses constructed by graded negative index-based photonic crystals with tuned configurations // *Chin. Phys. B.* 2013. V. 22, N 10. P. 104101.
27. *Li Y.H., Fu Y.Q., Minin O.V., Minin I.V.* Ultra-sharp nanofocusing of graded index photonic crystal-based lenses perforated with optimized single defect // *Opt. Mater. Express.* 2016. V. 6. P. 2628–2636.
28. *Cao Y., Liu Z., Minin O.V., Minin I.V.* Deep sub-wavelength-scale light focusing and confinement in nanohole-structured mesoscale dielectric spheres // *Nanomaterials.* 2019. V. 9, N 2. DOI: 10.3390/nano9020186.
29. *Minin I.V., Minin O.V., Cao Y., Liu Z., Geints Y., Karabchevsky A.* Optical vacuum cleaner by optomechanical manipulation of nanoparticles using nanostructured mesoscale dielectric cuboid // *Sci. Rep.* 2019. V. 9, iss. 12748.
30. *Wang C.-S., Otani Y.* Removal of nanoparticles from gas streams by fibrous filters: a review // *Indust. Engin. Chem. Res.* 2013. V. 52, N 1. P. 5–17.
31. *Erickson D., Serey X., Chen Y.F., Mandal S.* Nanomanipulation using near field photonics // *Lab Chip.* 2011. V. 11. P. 995–1009.
32. *Li Y.-C., Xin H.-B., Lei H.-X., Liu L.-L., Li Y.-Z., Zhang Y., Li B.-J.* Manipulation and detection of single nanoparticles and biomolecules by a photonic nanojet // *Light: Sci. Appl.* 2016. N 5. P. e16176.
33. *Zhao X., Zhao N., Shi Y., Xin H., Li B.* Optical Fiber Tweezers: A Versatile Tool for Optical Trapping and Manipulation // *Micromachines.* 2020. N 11. P. 114.

34. Li Y., Xin H., Zhang Y., Lei H., Zhang T., Ye H., Saenz J.J., Qiu C.-W., Li B. Living Nanospear for Near-Field Optical Probing // ACS Nano. 2018. V. 12, N 11. P. 10703–10711.
35. Minin I.V., Minin O.V. Diffractive Optics and Nanophotonics: Resolution Below the Diffraction Limit. Springer, 2016. 75 p.
36. Yue L., Minin O.V., Wang Z., Monks J., Shalin A., Minin I.V. Photonic hook: a new curved light beam // Opt. Lett. 2018. V. 43, P. 771–774.
37. Ang A., Karabchevsky A., Minin I.V., Minin O.V., Sukhov S., Shalin A. Photonic Hook based optomechanical nanoparticle manipulator // Sci. Rep. 2018. V. 8, iss. 2029.
38. Minin I.V., Minin O.V., Katyba G., Chernomyrdin N., Kurlov V., Zaytsev K., Yue L., Wang Z., Christodoulides D. Experimental observation of a photonic hook // Appl. Phys. Lett. 2019. V. 114. P 031105.
39. Dholakia K., Bruce G. Optical hooks // Nat. Photonics. 2019. V. 13. P. 229–230.
40. Minin I.V., Minin O.V., Ponomarev D.S., Glinskiy I.A. Photonic hook plasmons: a new curved surface wave // Annalen der Physik. 2018. V. 530, N 12. P. 1800359.
41. Rubio C., Tarrazy-Serrano D., Minin O.V., Uris A., Minin I.V. Acoustical hooks: a new subwavelength self-bending beam // Results in Phys. 2020. V. 16. P. 102921.
42. Xing E., Gao H., Rong J., Khew S., Liu H., Tong C., Hong M. Dynamically tunable multi-lobe laser generation via multifocal curved beam // Opt. Express. 2018. V. 26, iss. 23. P. 30944–30951.
43. Yang P., Twardowski P., Duo G.Y., Fontaine J., Lecler S. Ultra-narrow photonic nanojets through a glass cuboid embedded in a dielectric cylinder // Opt. Express. 2018. V. 26, iss. 4. P. 3723–3731.
44. Huang Y., Zhen Z., Shen Y., Min C., Veronis G. Optimization of photonic nanojets generated by multilayer microcylinders with a genetic algorithm // Opt. Express. 2019. V. 27, iss. 2. P. 1310–1325.
45. Minin I.V., Minin O.V. Subwavelength self-bending structured light beams // Proc. of the Fourth Russian-Belarusian Workshop “Carbon nanostructures and their electromagnetic properties”. Tomsk. April, 2019. P. 52–57.
46. Minin I.V., Minin O.V. Dielectric particle-based strategy to design a new self-bending subwavelength structured light beams // Proc. the 14th Intern. Forum on Strategic Technology (IFOST 2019). Tomsk: TPU Publishing House, 2019. P. 23.
47. Gu G., Shao L., Song J., Qu J., Zheng K., Shen X., Peng Z., Hu J., Chen X., Chen M., Wu Q. Photonic hooks from Janus microcylinders // Opt. Express. 2019. V. 27, N 26. P. 37771–37780.
48. Shen X., Gu G., Shao L., Peng Z., Hu J., Bandyopadhyay S., Liu Y., Jiang J., Chen M. Twin photonic hook generated by twin-ellipse microcylinder // IEEE Photonics. 2020. DOI: 10.1109/JPHOT.2020.2966782.
49. Ma X., Guo Y., Pu M., Jin J.J., Gao P., Li X., Luo X. Tunable Optical Hooks in the Visible Band Based on Ultra-Thin Metalenses // Ann. Phys. 2019. P. 1900396.
50. Ang A.S., Minin I.V., Minin O.V., Sukhov S.V., Shalin A., Karabchevsky A. Low-contrast photonic hook manipulator for cellular differentiation // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Metamaterials, Photonic crystals and Plasmonics, Marseille, France. June, 2018. P. 7–8.
51. Cui X., Erni D., Hafner C. Optical forces on metallic nanoparticles induced by a photonic nanojet // Opt. Express. 2008. V. 16. P. 13560–13568.
52. Wang H., Wu X., Shen D. Trapping and manipulating nanoparticles in photonic nanojets // Opt. Lett. 2016. V. 41. N 7. P. 1652–1655.
53. Minin I.V., Minin O.V., Pacheco-Peca V., Beruete M. Subwavelength, standing-wave optical trap based on photonic jets // Quant. Electron. 2016. V. 46. N 6. P. 555–557.
54. Li Y., Xin H., Liu X., Zhang Y., Lei H., Li B. Trapping and Detection of Nanoparticles and Cells Using a Parallel Photonic Nanojet Array // ACS Nano. 2016. V. 10, N 6. P. 5800–5808.
55. Geints Yu.E., Zemlyanov A.A. Metalens optical 3D-trapping and manipulating of nanoparticles. // J. Opt. 2018. V. 20. P. 075102.
56. Patel H.S., Majumder S. K. Photonic nanojet: generation, manipulation and applications // RRCAT newsletter. 2018. V. 31, N 2. P. 24–33.
57. Neves A.A.R. Photonic nanojets in optical tweezers // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Trans. 2015. V. 162. P. 122–132.
58. Du B., Xia J., Wu J., Zhao J., Zhang H. Switchable Photonic Nanojet by Electro-Switching Nematic Liquid Crystals // Nanomaterials. 2019. V. 9, N 1. P. 72.
59. Zhu J., Goddard L.L. All-dielectric concentration of electromagnetic fields at the nanoscale: the role of photonic nanojets // Nanoscale Advances. 2019. V. 1, N 12. P. 4615–4643.
60. Chen R., Lin J., Jin P., Cada M., Ma Y. Photonic nanojet beam shaping by illumination polarization engineering // Opt. Commun. 2020. N 456. P. 124593.
61. Minin O.V., Minin I.V., Kharitoshin N. Microcubes Aided Photonic Jet Scalpel Tips for Potential Use in Ultraprecise Laser Surgery // Proc. 2015 Intern. Conf. on Biomedical Engineering and Computational Technologies (SIBIRCON). Novosibirsk, Russia. October, 2015. P. 18–21.

I.V. Minin, O.V. Minin, Yu.E. Geints, E.K. Panina, A. Karabchevsky. Optical manipulation of micro- and nano-objects based on structured mesoscale particles: brief review.

The spatial resolution of conventional optics, which is necessary for non-destructive capture of micro-objects, is limited by diffraction to a value equal to half the radiation wavelength. Despite this limitation, the use of optical methods is one of the main directions in biological and biomedical research, since only optical methods have a minimal impact on living organisms. Rapid progress in this area is largely based on the development of new optical technologies. Significant progress in mesoscale photonics has allowed researchers to develop methods for controlling structured beams for optical traps. Some recent trends in the field of optical manipulation based on mesoscale dielectric particles are analyzed, mainly based on our studies.