

Особенности формирования фотонных наноструй от шарового кластера диэлектрических наночастиц

Ю.Э. Гейнц[✉], Е.К. Панина*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 13.04.2023 г.;
после доработки 15.07.2023 г.;
принята к печати 27.07.2023 г.

Представлены результаты численного моделирования фокусировки оптического излучения «метачастицей», представляющей собой кластер одинаковых наносфер, плотно упакованных в шаровой объем определенного радиуса. Проведены расчеты параметров фокальной области (интенсивность, продольный и поперечный размеры), формируемой метачастицами с различным внутренним наполнением. Показано, что в некоторых случаях реализация шаровой кластерной сборки наночастиц позволяет свести задачу фокусировки излучения метачастицей к задаче дифракции световой волны на однородной сфере с эффективным показателем преломления. Установлено, что определенные топологии микросборок позволяют улучшить фокусировку оптической волны в области ближнего поля, в частности повысить пиковую интенсивность или усилить ее пространственную локализацию.

Ключевые слова: шаровой кластер частиц, плотная упаковка, фотонная наноструя, эффективная среда, FDTD-метод; particle cluster, close packing, photonic nanojet, effective medium approximation, FDTD simulation.

Введение

Впервые на формирование локализованных световых потоков повышенной интенсивности вблизи поверхности диэлектрического микроцилиндра было обращено внимание в работе [1]. Данный эффект получил название «фотонная наноструя» (ФНС). В дальнейшем исследования ФНС становились более разнообразными и комплексными. Была показана возможность формирования областей фокусировки поля в ближней зоне (по сути — ФНС) при рассеянии излучения не только на одиночных частицах различной геометрической формы (микросферах [2, 3], микроцилиндрах [4], микроконусах [5], микродисках [6], микросфероидах [7], других несимметричных частицах [8]) и внутренней структуры (радиально-неоднородных частицах [9, 10]), но и на одномерных микросборках, представляющих собой массив частиц, размещенных в один слой на плоскости, а также на агрегатах частиц [11–13].

Возможность манипулирования параметрами ФНС (увеличение длины либо повышение пиковой интенсивности) расширяет спектр практического применения данного эффекта. К настоящему времени локализованные световые потоки от микрочастиц

широко используются для технологий сверхвысокого разрешения [14–16], обнаружения и обработки наночастиц [17], нанолитографии [18], а также в биологии, например в качестве оптического пинцета [19]. Дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования, несомненно, позволят расширить возможности практического внедрения эффекта ФНС и развития научных направлений, связанных, например, с разработкой наноматериалов при использовании микрочастиц с различными конструктивными особенностями в качестве оптических элементов, преобразующих падающее излучение.

Следует отметить, что в большинстве исследований, посвященных проблеме управления фотонными наноструями, рассматриваются, как правило, одиночные изолированные частицы, расположенные в свободном пространстве. Распределение оптического поля вблизи изолированной частицы зависит только от ее микрофизических параметров и характеристик падающего излучения. Объединение нескольких частиц в ансамбль (кластер) меняет характеристики поля в области внешнего фокуса вследствие интерференции оптических полей при дифракции излучения на соседних частицах. Оптическое поле в этом случае характеризуется более сложной пространственной структурой, но может быть локализовано сильнее, чем при дифракции излучения на изолированной частице.

Одним из перспективных объектов, эффективно преобразующих падающее излучение, является

* Юрий Эльмарович Гейнц (ygeints@iao.ru); Екатерина Константиновна Панина (pek@iao.ru).

так называемая металинза, собранная из отдельных элементов, обладающих подобными или, наоборот, различными оптическими свойствами. Некоторые из первых образцов металинз обладали сверхразрешением (выше дифракционного предела), но не могли сфокусировать плоскую волну без aberrаций из-за отсутствия механизма фазовой компенсации, в отличие от обычной параболической оптической линзы [20]. Впоследствии появились усовершенствованные конструкции металинз, совмещающие эти две функции путем использования плазмонных волноводных ответвителей [21, 22] или градиента показателя преломления [23, 24].

В работе [25] в качестве «строительных блоков» для создания искусственной металинзы были предложены оптические нановолокна различного диаметра, объединенные в гексагональную структуру. Варьированием размера прозрачных нановолокон, плотно контактирующих между собой, достигается изменение фокусирующих свойств металинзы микронного размера. Полученные при численном моделировании распределения оптических полей в области фокуса сравнивали с эталонными профилями, полученными при фокусировке света однородным цилиндром. Показано, что в металинзе в области внешнего фокуса удается добиться лучшей фокусировки за счет изменения диаметра нановолокон.

В публикации [26] с помощью FDTD-методики (Finite Difference Time Domain) численно исследованы металинзы с градиентным изменением показателя преломления гексагональных нановолокон. Отметим, что манипулирование ключевыми параметрами ФНС путем изменения оптического контраста оболочек микросферы было ранее исследовано в [9, 10]. В [26] данная идея получила развитие в виде создания градиентной линзы, представляющей собой плотно упакованные нановолокна фиксированного диаметра, но с разным показателем преломления. Наглядно продемонстрировано, что подобные комбинированные металинзы в ряде случаев более эффективно собирают падающее на них излучение, что позволяет улучшать параметры фокальной области вблизи таких рассеивающих объектов.

Заметим, что в отмеченных выше работах рассматриваются либо упорядоченные сборки квазидвумерных объектов (волокон), либо однослойные массивы частиц, расположенные на плоскости. Моделирование эффекта ФНС на плотной упаковке сферических частиц в трехмерной геометрии является достаточно трудоемкой задачей из-за большого объема вычислений.

Цель настоящей работы — теоретическое рассмотрение ближнепольной дифракции оптической волны на кластере оптически подобных сферических наночастиц (НЧ), плотно упакованных в объем некоторой условной сферы микронного размера. Такую упорядоченную микросборку наночастиц будем называть метачастицей. Считается, что наночастицы располагаются в узлах гексагональной пространственной решетки в пределах границ заданного сферического объема. Мы показываем, что подобная

сборка наночастиц формирует некую консолидированную фотонную структуру, способную эффективно рассеивать оптическое излучение и формировать фокальные области повышенной интенсивности вблизи ее поверхности. Мы также определяем условия, при которых задача о рассеянии излучения на кластере оптически подобных плотноупакованных НЧ может быть сведена к задаче рассеяния на однородной сферической частице с некоторыми эффективными оптическими свойствами. Реализация данной идеи возможна путем применения модели эффективной среды (модель Бругемана), которая, как правило, используется при описании композитов, содержащих наноструктурные объекты с равновеликой объемной долей структурных фаз. Данный подход к исследованию кластеров наночастиц позволит значительно упростить численное моделирование и заметно сократить объем проводимых вычислений.

Компьютерная модель метачастицы

Численное моделирование рассеяния оптического излучения проводилось на основе решения системы дифференциальных уравнений Максвелла для электромагнитного поля вблизи микрочастицы при использовании методики конечных разностей во временной области (FDTD-методика) [27, 28]. FDTD — метод, хорошо известный в литературе и широко применяемый при численном моделировании электродинамических задач, связанных с рассеянием оптического излучения на частицах. Алгоритм вычисления полей является рекурсивным, т.е. значения сеточных функций на текущем временном слое вычисляются с помощью рассчитанных на предыдущем слое. Все счетное пространство для предотвращения отражения от границ заключалось в матрицу, содержащую набор идеально согласованных (поглощающих) слоев, которые характеризуются низким коэффициентом отражения.

При численном моделировании нами рассматривался сферический тип кластерной сборки, когда отдельные наночастицы собраны в сферический объем с некоторым фиксированным радиусом $R = 1$ мкм. Показатель преломления наносфер n_1 , их число N и радиус r_1 являлись варьируемыми параметрами заполнения. Окружающая среда считалась воздухом. Согласно используемому типу микросборки N наночастиц упаковывается в узлы гексагональной пространственной решетки в пределах границ заданного сферического объема с максимально достижимым значением коэффициента заполнения материала $f = N(r_1/R)^3$. Этот тип сборки будем называть плотной упаковкой.

Для построения ансамбля НЧ использовался специальный алгоритм, позволяющий генерировать массив координат центров НЧ, размещенных в детерминированных позициях. Для этого внутри счетного домена выделялась шаровая область радиусом R и считалось, что ансамбль НЧ целиком находится

внутри этой области. Далее в цикле вычислялись декартовы координаты центра каждой сферической наночастицы по известному алгоритму с учетом ее радиуса r_1 . В результате формировался кластер контактирующих плотноупакованных НЧ, распределенных в шаровой области.

Поскольку считается, что радиус НЧ существенно меньше длины волны освещающего света λ , то для решения задачи рассеяния электромагнитной волны на композитной метачастице в электростатическом приближении разумно воспользоваться моделью эффективной среды, например в формулировке Бруггемана [29].

Предложенное Бруггеманом приближение эффективной среды используется, как правило, при описании композитов, содержащих наноструктурные объекты с близкими объемными долями. При этом эффективные параметры случайно-неоднородных композитных сред зависят не только от структурного распределения составляющих среду компонент, но и от их объемных соотношений. Для наиболее распространенной модели сферических частиц с относительной объемной долей f_1 , находящихся в диэлектрической матрице с приведенным объемом $f_2 = 1 - f_1$, используют уравнение вида [30]:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = f_1 \varepsilon_1 \Lambda_1 + f_2 \varepsilon_2 \Lambda_2, \quad (1)$$

где ε_{eff} — искомая диэлектрическая проницаемость «эффективной» среды; $\Lambda_j = 3\varepsilon_{\text{eff}} / (\varepsilon_j + 2\varepsilon_{\text{eff}})$; где $j = 1, 2$, причем индекс 1 соответствует материалу частиц, а индекс 2 — материалу матрицы. Уравнение (1) симметрично относительно перестановки индексов j и преобразуется в обыкновенное квадратное уравнение.

Основная идея наших исследований заключалась в поиске условий, при которых задача о рассеянии излучения на кластере плотноупакованных однородных НЧ, помещенных в объем некоторой условной сферы заданного радиуса, может быть сведена к задаче рассеяния на однородной сферической частице того же размера, но с некоторыми эффективными оптическими свойствами. Данное допущение позволит значительно сократить объем вычислений и упростить численное моделирование без ущерба для качества расчетов.

Результаты численного расчета

В качестве иллюстрации на рис. 1, *а* приведено двумерное распределение относительной интенсивности оптического поля $B(x, z) = |\mathbf{E}(x, z)|^2 / E_0^2$, где $\mathbf{E}(x, z)$ — интенсивность поля в выбранной точке пространства — зоне ФНС; E_0 — амплитуда падающей световой волны вблизи композитной метачастицы, находящейся в воздухе и освещенной лазерным излучением с $\lambda = 0,8$ мкм, поляризованным вдоль оси x . Длина волны оптического излучения (0,8 мкм) не является принципиальной, пока выполняется условие мезомасштабности композитной «мультичастицы», т.е. ее радиус одного порядка с длиной волны лазерного излучения.

Отметим, что все частицы в объеме выделенной сферы подобны, т.е. имеют одинаковые оптические свойства и размер (показатель преломления $n_1 = \sqrt{\varepsilon_1} = 1,5$; $r_1 = 250$ нм). Общее число частиц $N = 21$. Здесь же (рис. 1, *б*) для сравнения показано распределение поля в области ФНС для однородной диэлектрической сферы радиуса $R = 1$ мкм

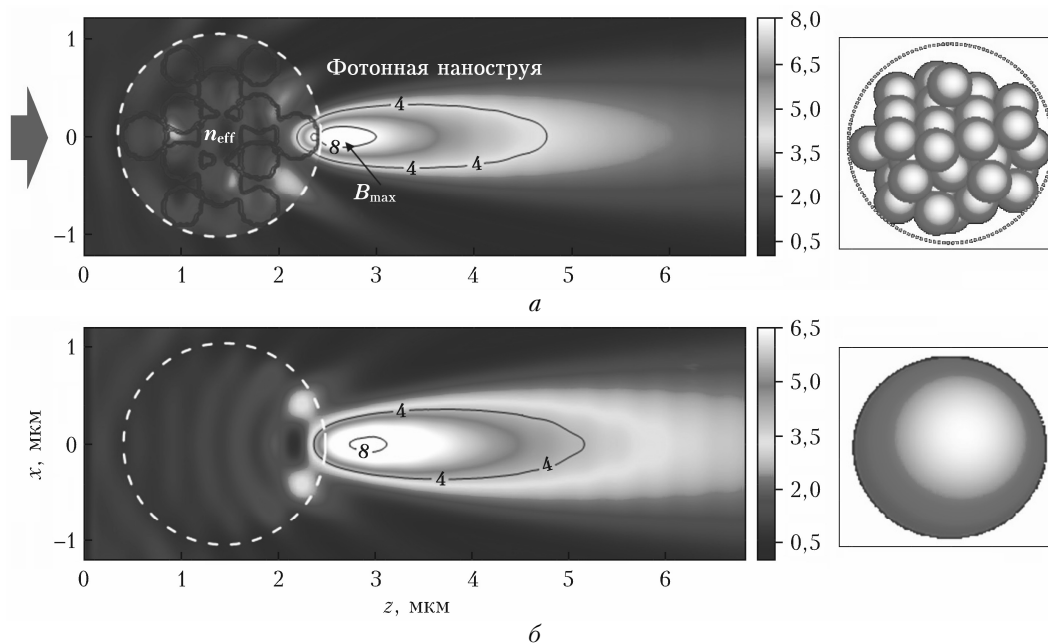


Рис. 1. Распределение относительной интенсивности поля $B(x, z)$ в области ФНС при рассеянии излучения на метачастице, представляющей собой упорядоченную упаковку наночастиц (*а*), и на однородной сфере с $R = 1$ мкм (*б*) (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.09>)

с эффективным показателем преломления $n_{\text{eff}} = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} = 1,15$, что соответствует показателю преломления для рассмотренной выше микросборки НЧ в модели эффективной среды (1). Приведенные на рис. 1 распределения относительной интенсивности поля носят исключительно иллюстративный характер. Выбор НЧ, составляющих композитную метачастицу ($n_1 = 1,5$), в целом является произвольным, однако сами частицы имеют параметры, соответствующие, например, типичным коммерчески доступным стеклянным наносферам.

Визуально форма ФНС от метачастицы близка к таковой для однородной сферы. Однако когда метачастица собрана из достаточно крупных НЧ, то возникающая фотонная струя выглядит заметно короче. При этом максимум интенсивности поля приближен к ее поверхности, в отличие от случая фокусировки поля однородной микрочастицей. Данный эффект связан с деформацией волнового фронта излучения отдельными НЧ, что влечет за собой изменение фокусирующих свойств всей микросборки. Очевидно, что с уменьшением размеров упакованных наносфер подобие форм ФНС будет усиливаться.

Далее более детально исследуем базовые характеристики ФНС (рис. 2) и обсудим, как оптические свойства кластера наносфер влияют на параметры генерируемых ими фотонных наноструй. Амплитудной характеристикой ФНС является пиковая (относительная) интенсивность B_{max} оптического поля в области ближней зоны рассеяния. Поперечная ширина струи фиксируется по двум координатным осям R_x, R_y на уровне половины максимума интенсивности поля. Ключевым параметром ФНС также является фокусное расстояние z_f , определяемое от поверхности частицы до главного максимума интенсивности.

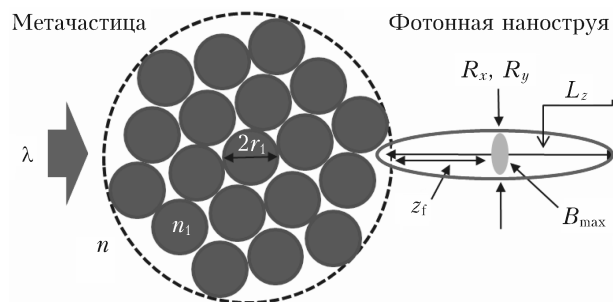


Рис. 2. Схематическое изображение метачастицы, собранной из подобных сферических НЧ радиуса r_1 , с указанием параметров фотонной наноструи

Для наглядности на рис. 3 показаны расчетные значения количества НЧ, формирующих микросборку, упакованную в шар с $R = 1$ мкм. Размер пакуемых НЧ определяет результирующее количество частиц N и их пространственное распределение. Согласно рис. 3 в случае малых НЧ с $r_1 = 50$ нм $N = 5411$, в то время как при $r_1 = 300$ нм $N = 13$. Очевидно, что объемные соотношения составляющих метачастицу компонент, входящих в модель эффек-

тивной среды (1), влияют на структуру пятна фокусировки в ближнем поле рассеяния.

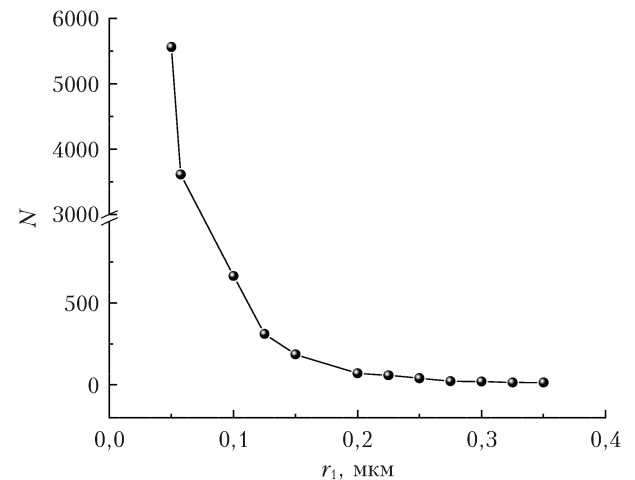


Рис. 3. Количество НЧ, упакованных в объем сферы с $R = 1$ мкм, в зависимости от размера

Серия графиков на рис. 4 представляет результаты численных расчетов параметров ФНС, формируемой сборками НЧ различного размера ($r_1 = 50 \div 350$ нм). Моделирование проведено для двух значений показателя преломления НЧ: $n_1 = 1,5$ и $n_1 = 2$. Здесь же для сравнения показаны соответствующие зависимости, полученные для однородной сферы радиусом 1 мкм и с эффективным показателем преломления n_{eff} , определяемым в рамках модели эффективной среды (1).

В целом можно отметить, что путем выбора конфигурации метачастицы можно изменить параметры ФНС, поскольку дифракционное взаимодействие полей от отдельных сфер может либо «ослабить», либо, наоборот, «усилить» некоторые характеристики фотонной струи. Однако следует учесть, что использование модели эффективной среды не позволяет добиться полного количественного соответствия основных параметров ФНС микросборок НЧ и идеальной сплошной микросферы. Об определенном подобии фотонных струй можно говорить только в смысле их поперечного размера (R_x, R_y) (рис. 4, в).

Из анализа полученных зависимостей следует, что при плотной упаковке НЧ определяющее значение имеет их показатель преломления n_1 . Так, для НЧ с $n_1 = 1,5$ пиковая интенсивность фокального пятна (фотонной струи) выше, чем для однородной сферы. При этом ФНС имееткратно меньшую длину и поперечный размер, т.е. более компактные пространственные размеры. Оптически более плотные частицы, например с $n_2 = 2$, генерируют фотонный поток близкой протяженности, но значительно меньшей интенсивности, чем у эталонной сферы. Важно отметить, что кластеризация НЧ в сферическую метачастицу в виде упорядоченной плотной упаковки всегда приводит к формированию пространственно локализованных ФНС без отрыва от поверхности.

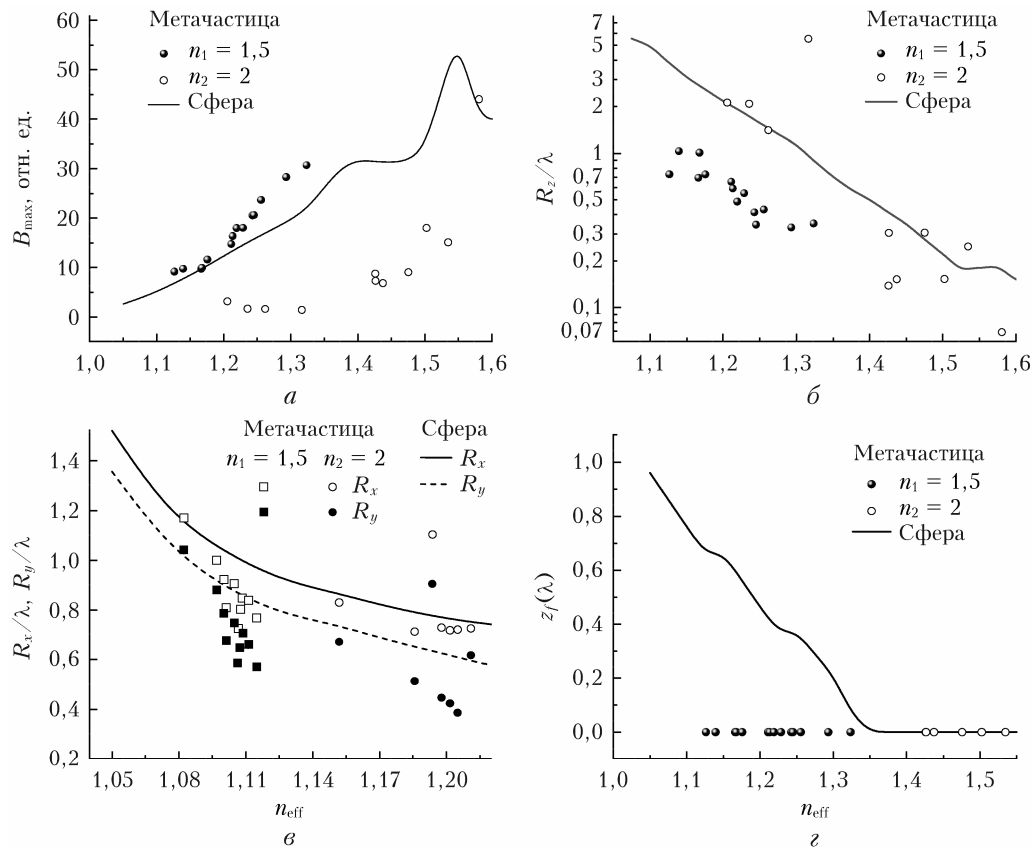


Рис. 4. Параметры ФНС, формирующихся шаровыми кластерами плотно упакованных НЧ различного радиуса (точки) и однородной сферой с $R = 1$ мкм (сплошные кривые): a — максимальная интенсивность; b — относительная длина; v — относительная полуширина по осям x и y ; z — фокусное расстояние

Заключение

Рассмотрена задача дифракции оптического излучения на шаровом кластере диэлектрических сферических наночастиц, составляющих сферическую метачастицу. Результаты численного моделирования показали, что с точки зрения подобию основных характеристик фотонных наноструй, формирующихся в ближнем поле рассеяния метачастицы, существуют ситуации, при которых возможна замена неоднородной метачастицы однородной сферой такого же радиуса, но с некоторым эффективным показателем преломления. Значение этого показателя преломления может быть определено с помощью модели эффективной среды, например, по формуле Бруггемана. Однако при этом достигается подобие только поперечного размера возникающих фотонных наноструй. По остальным параметрам (длина, интенсивность) фокальная область сферической микросборки наночастиц неэквивалентна равновеликой однородной сфере.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Chen Z., Taflove A., Backman V. Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: A potential novel visible-light ultramicroscopy technique // Opt. Express. 2004. V. 12, N 7. P. 1214–1220.

2. Devilez A., Bonod N., Stout B., Gerard D., Wenger J., Rigneault H., Popov E. Three-dimensional subwavelength confinement of light with dielectric microspheres // Opt. Express. 2009. V. 17. P. 2089–2094.
3. 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.
4. Maděránková D., Provazník I., Klepárník K. Numerical modeling of photonic nanojet behind dielectric microcylinder // World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering September 7–12, 2009. / O. Dössel, W.C. Schlegel (ed.). Munich: Springer, 2009. P. 1135–1138. DOI: 10.1007/978-3-642-03882-2_302.
5. Geints Yu.E., Panina E.K., Zemlyanov A.A. Microaxicon-generated photonic nanojets // J. Opt. Soc. Am. B. 2015. V. 32, N 8. P. 1570–1574.
6. McCloskey D., Wang J.J., Donegan J.F. Low divergence 354 photonic nanojets from Si_3N_4 microdisks // Opt. Express. 2012. V. 20. P. 128–140.
7. Mendes M.J., Tobias I., Marti A., Luque A. Near-field scattering by dielectric spheroidal particles with sizes on the order of the illuminating wavelength // J. Opt. Soc. Am. B. 2010. V. 27, N 6. P. 1221–1231.
8. Minin I.V., Minin O.V., Geints Yu.E. Localized EM and photonic jets from non-spherical and non-symmetrical dielectric mesoscale objects: Brief review // Ann. Phys. 2015. V. 527, N 7. P. 1–7.
9. Kong S.-C., Taflove A., Backman V. Quasi one-dimensional light beam generated by a graded-index microsphere // Opt. Express. 2009. V. 17. P. 3722–3731.
10. Geints Yu.E., Zemlyanov A.A., Panina E.K. A photonic nanojet calculations in layered radially-inhomogeneous

- micrometer-sized spherical particles // *J. Opt. Soc. Am. B*. 2011. V. 28, N 8. P. 1825–1830.
11. Wang Z.B., Guo W., Luk'yanchuk B., Whitehead D.J., Li L., Liu Z. Optical near-field interaction between neighbouring micro/nano-particles // *J. Laser Micro/Nanoeng.* 2008. V. 3, N 1. P. 14–18.
 12. Pikulin A., Afanasiev A., Agareva N., Alexandrov A.P., Bredikhin V., Bityurin N. Effects of spherical mode coupling on near-field focusing by clusters of dielectric microspheres // *Opt. Express*. 2012. V. 20. P. 9052–9057.
 13. Geints Yu.E., Zemlyanov A.A. Metalens optical 3D-trapping and manipulating of nanoparticles // *J. Opt.* 2018. V. 20, N 7. P. 1–7. DOI: 10.1088/2040-8986/aac643.
 14. Heifetz A., Simpson J.J., Kong S.-C., Taflove A., Backman V. Subdiffraction optical resolution of a gold nanosphere located within the nanojet of a Mie-resonant dielectric microsphere // *Opt. Express*. 2007. V. 15, N 25. P. 17334–17342.
 15. Devilez A., Bonod N., Stout B., Gerard D., Wenger J., Rigneault H., Popov E. Three-dimensional subwavelength confinement of light with dielectric microspheres // *Opt. Express*. 2009. V. 17, N 4. P. 2089–2094.
 16. Yang H., Trouillon R., Huszka G., Gijs M.A.M. Super-resolution imaging of a dielectric microsphere is governed by the waist of its photonic nanojet // *Nano Lett.* 2016. V. 16, N 8. P. 4862–4870.
 17. 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. V. 5, N 12. P. e16176.
 18. Jacassi A., Tantussi F., Dipalo M., Biagini C., Maccaferri N., Bozzola A., De F. Angelis Scanning probe photonic nanojet lithography ACS // *Appl. Mater. Interfaces*. 2017. V. 9, N 37. P. 32386–32393.
 19. Kovrov A., Novitsky A., Karabchevsky A., Shalin A.S. A photonic nanojet as tunable and polarization-sensitive optical tweezers // *Ann. Phys.* 2018. V. 530, N 9. P. 1800129.
 20. Ma B., Liu Z.W. A super resolution metalens with phase compensation mechanism // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96. P. 183103.
 21. Sun Z., Kim H.K. Refractive transmission of light and beam shaping with metallic nano-optic lenses // *Appl. Phys. Lett.* 2004. V. 85, N 4. P. 642–644.
 22. Verslegers L., Catrysse P.B., Yu Z., White J.S., Barnard E.S., Brongersma M.L., Fan S. Planar lenses based on nanoscale slit arrays in a metallic film // *Nano Lett.* 2009. V. 9, N 1. P. 235–238.
 23. Ma B., Escobar M.A., Liu Z.W. Extraordinary light focusing and Fourier transform properties of gradient-index metalenses // *Phys. Rev. B*. 2011. V. 84. P. 195142.
 24. Ma H.F., Wang G.Z., Jiang W.X., Cui T.J. Independent control of differently-polarized waves using anisotropic gradient-index metamaterials // *Sci. Rep.* 2014. V. 4. P. 6337.
 25. Yue L., Yan B., Wang Z. Photonic nanojet of cylindrical metalens assembled by hexagonally arranged nanofibers for breaking the diffraction limit // *Opt. Lett.* 2016. V. 41, N 7. P. 1336.
 26. Liu C.-Y. Flexible photonic nanojet formed by cylindrical graded-index lens // *Crystals*. 2019. V. 9, N 4. P. 198.
 27. Yee K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1966. V. 14, iss. 3. P. 302–307.
 28. Taflove A., Hagness S. Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method. Boston: Artech House Pub., 2000. 852 p.
 29. Bruggeman D.A.G. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus Isotropen Substanzen Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus Isotropen Substanzen // *Ann. Phys.* 1935. V. 416. P. 636–664.
 30. Апресян Л.А., Власов Д.В., Задорин Д.А., Красовский В.И. О модели эффективной среды для частиц со сложной структурой // *Журн. техн. физ.* 2017. Т. 87, вып. 1. С. 10–17.

Yu.E. Geints, E.K. Panina. Peculiarities of photonic nanojet formation on a spherical cluster of dielectric nanoparticles.

The results of the numerical simulations on optical radiation focusing by a cluster of identical nanospheres densely packed into a spherical volume (a “metaparticle”) are presented. The parameters of the focal region (intensity, longitudinal and transverse dimensions) formed by metaparticles with different internal structure are calculated. We show that in certain cases, the problem of focusing optical radiation by a globular cluster of nanoparticles can be reduced to the problem of light focusing by a homogeneous spherical particle with an effective refractive index obtained from the effective medium theory. Moreover, certain globular cluster topologies make it possible to improve the optical focusing in the near-field region, in particular, by increasing the focal intensity or enhancing the spatial localization of the focal area.