

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 535.016, 535.361, 535.393

**Сравнительный анализ ключевых параметров  
фотонных наноструй от осесимметричных  
несферических микрочастиц**

**Ю.Э. Гейнц, Е.К. Панина, А.А. Землянов\***

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

Поступила в редакцию 6.04.2018 г.

Теоретически рассмотрен эффект фотонных наноструй (ФНС), возникающих в ближнем поле рассеяния у поверхности диэлектрических осесимметричных микрочастиц (полусфера, аксикон, комбинированные частицы) при освещении их оптическим излучением. Методом дискретно-дипольной аппроксимации выполнен численный расчет ключевых параметров ФНС (длина, ширина, пиковая интенсивность) и проведен анализ их зависимости от геометрической формы рассеивающих излучение микрочастиц. Показано, что при использовании специального типа комбинированных частиц, состоящих из аксикона и полусферы, могут быть реализованы локализованные световые потоки с пиковой интенсивностью, значительно превышающей соответствующие значения для частиц простых форм (полусфера, аксикон).

*Ключевые слова:* фотонная наноструя, полусфера, аксикон, комбинированные частицы; photonic nanojet, hemisphere, combined particles.

Развитие современных оптических технологий направлено на миниатюризацию дифракционных элементов и усложнение их пространственной конфигурации. В дифракционной оптике все чаще используют объекты, имеющие несферическую форму, например микроконусы, микропирамиды, микрокубоиды и т.д. [1–4]. Подобно хорошо известным сферическим микрочастицам они также могут менять пространственную структуру падающего на них излучения и формировать вблизи своей поверхности в ближнем поле рассеяния локализованные световые потоки – так называемые фотонные наноструи (ФНС) [5]. Особенности ФНС являются существенно более высоким уровнем интенсивности (относительно падающего излучения) и повышенное пространственное разрешение (поперечные размеры), которое недостижимо при фокусировке излучения обычной оптической линзой в дальней зоне дифракции. Поперечный размер ФНС составляет доли длины волны падающего излучения  $\lambda$  ( $1/3 \div 1/4$ ), что значительно меньше дифракционного предела классической линзы. При этом протяженность ФНС, образованной микронной частицей, может достигать десятков  $\lambda$ . Варьируя размеры и оптические свойства частиц, можно эффективно управлять пространственными и амплитудными характеристиками струи, увеличивая ее длину, уменьшая поперечный размер либо повышая пиковую интенсивность [3, 6].

Расширяющиеся возможности практического применения эффекта ФНС требуют подробной информации о пространственной структуре оптического поля вблизи таких микрообъектов. Это связано в первую очередь с определенными техническими требованиями, предъявляемыми к струям для решения различных практических задач. С помощью ФНС удается проводить перфорирование микроотверстий и лазерное травление различных материалов [7–12], детектирование и сортировку наноразмерных частиц [13]. В литературе сообщается об использовании ФНС в качестве «оптического скальпеля» и «оптического пинцета» в лазерной хирургии [14–16], а также в устройствах хранения данных с ультравысокой плотностью записи [5].

В настоящей статье мы систематизируем результаты наших исследований, касающихся ключевых параметров ФНС, которые формируются в ближнем поле рассеяния определенного класса несферических микронных частиц, характеризующихся осевой пространственной симметрией. Оказывается, что различные форма и ориентация миниатюрных дифракционных элементов-частиц по отношению к направлению падения излучения приводят к формированию качественно различных фотонных наноструй в области ближнего поля рассеяния и, соответственно, к реализации новых методов формирования ФНС с заданными характеристиками.

Численные расчеты пространственной структуры оптических полей в окрестности микрочастиц проводились с использованием метода дискретной дипольной аппроксимации (ДДА), что позволило решить задачу рассеяния световой волны на диэлектрических

\* Юрий Эльмарович Гейнц (ygeints@iao.ru); Екатерина Константиновна Панина (pek@iao.ru); Александр Анатольевич Землянов (zaa@iao.ru).

микрообъектах различных пространственных форм. Подробное математическое обоснование метода ДДА приведено, например, в [17].

Сферы и аксиконы (круговые конусы), ось которых ориентирована вдоль направления падения излучения, традиционно используются в оптических системах в качестве светофокусирующих элементов. Кардинальные различия между этими оптическими элементами при формировании ФНС обусловлены тем, что сфера наиболее эффективно использует излучение, собирая большую часть энергии оптической волны в локализованную область пространства по форме, близкой к шару. Это является следствием наличия на пути излучения двух преломляющих сферических поверхностей с противоположной кривизной. В результате ФНС формируется в области геометрической тени частицы, при этом интенсивность наноструи превышает начальное значение, как правило, на несколько порядков величины [18]. Из-за специфической фокусировки световой волны микрочастицами конического типа область внешнего фокуса удлиняется вдоль оптической оси, что уменьшает пиковую интенсивность ФНС, но значительно увеличивает ее длину.

Важно также рассмотреть характеристики ФНС от комбинированных частиц, которые объединяют фокусирующие особенности сферы и конуса. Такие частицы состоят из усеченного конуса и одного или двух полусферических колпачков, прикрепленных к его граням. Как будет показано ниже, комбинация двух типов фокусировки (коническая и сферическая) приводит к образованию распределенной оптической ловушки с увеличенной длиной, т.е. к модификации фокальной области, образованной обычной сферической линзой.

На рис. 1 (здесь и далее цв. оригинал см. <http://www.iao.ru>) в качестве примера представлено тоновое распределение относительной интенсивности лазерного излучения в окрестности изолированного усеченного микроаксикона с диаметром основания  $a_0 = 1,5\lambda$ . Интенсивность на графике нормирована на свое максимальное значение. Здесь и в дальнейшем рассматриваются кварцевые непоглощающие частицы с показателем преломления  $n = 1,5$ , находящиеся в воздухе и освещенные лазерным излучением с длиной волны  $\lambda = 0,532$  мкм. Для удобства восприятия цветовой шкала на рисунках с двумерными профилями интенсивности выбрана в одинаковом диапазоне значений интенсивности.

Фотонные наноструи, как пространственно-локализованная световая структура, могут быть охарактеризованы несколькими пространственными параметрами (рис. 1): протяженностью (длиной)  $L$ , минимальным поперечным размером (шириной)  $R$  и фокальным расстоянием  $d$ , измеренным от задней поверхности частицы до максимума интенсивности ФНС. Параметр  $d$  важен, поскольку определяет область «рабочей зоны» ФНС, где интенсивность светового потока является наиболее высокой. Амплитудной характеристикой ФНС является (относительная) пиковая интенсивность оптического поля в области ближнего рассеяния  $I_{\max} = \max(I(\mathbf{r})/I_0)$ ,

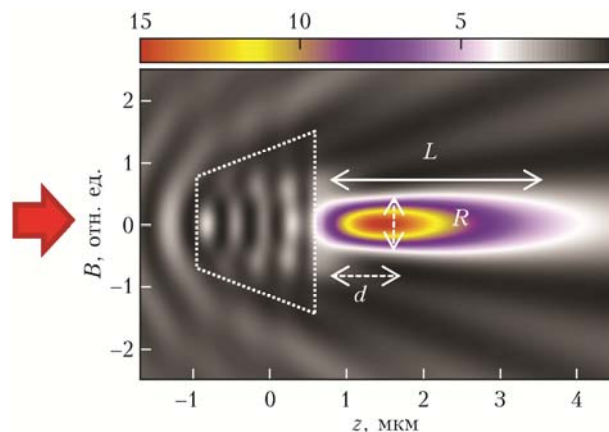


Рис. 1. Тоновое распределение относительной интенсивности оптического поля  $I(y, z)$  в окрестности кварцевого усеченного микроаксикона

где  $I_0$  – интенсивность падающей световой волны;  $\mathbf{r}$  – векторная координата точки в пределах струи. Чтобы избежать неоднозначности при вычислении параметров, определим  $L$  и  $R$  по уровню половины максимума (FWHM – full width at half maximum).

Далее обратимся к рис. 2, на котором представлены результаты численных расчетов основных параметров ФНС (длина, ширина, пиковая интенсивность) от изолированных осесимметричных частиц простых форм (полусфера и аксикон) с прямой и зеркальной ориентациями относительно падающего излучения. Здесь же для удобства восприятия показаны соответствующие им двумерные распределения интенсивности поля.

Сравнение параметров ФНС показывает, что не только форма, но и пространственная ориентация частиц (относительно падающего излучения) влияет на характеристики поля в области формирования струи. Преимущество зеркально-ориентированной («левой») полусферы – протяженность ФНС ( $L \sim 4\lambda$ ). Координата пика интенсивности ФНС (расстояние  $d$ ), создаваемого таким полусферическим колпачком, расположена на расстоянии  $1,5\lambda$  от края частицы. И наоборот, прямо ориентированная («правая») полусфера фокусирует падающее излучение главным образом внутри объема частицы, а также образует довольно длинную, но слабоинтенсивную внешнюю струю.

Теперь рассмотрим, как изменяется форма струи при замене полусферы на усеченный аксикон. В расчетах длина аксикона и диаметр его основания были фиксированными и составляли  $\sim 1,5\lambda$ . Как и в случае с полусферами, мы видим, что фокусирующие свойства микроаксиконов также меняются из-за изменений aberrаций, наложенных на волновой фронт различно ориентированным конусом. Следовательно, форма и ключевые параметры поля в области ФНС различны.

В случае, когда аксикон ориентирован широкой гранью к падающему излучению (рис. 2, б), оптическое поле локализуется главным образом внутри частицы, а вытекающий световой поток хотя и длинный ( $\sim 3,5\lambda$ ), но слабоинтенсивный ( $I_{\max} \sim 15$ ).

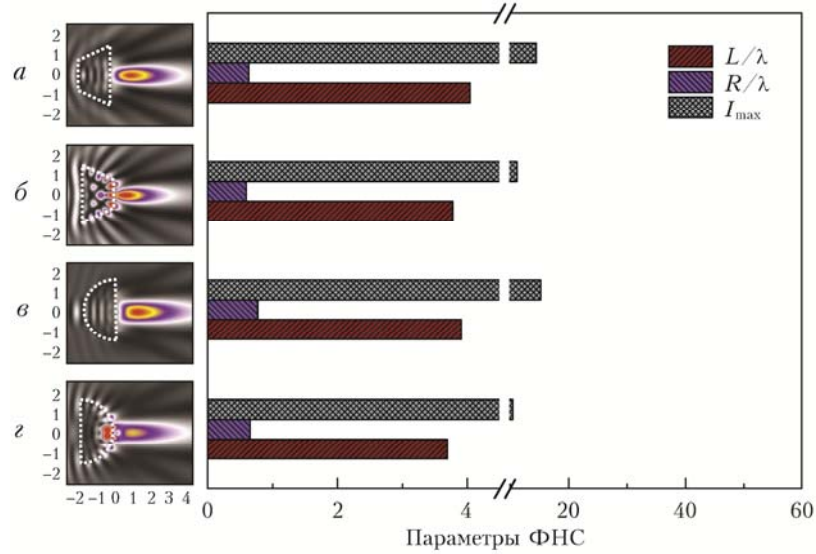


Рис. 2. Параметры ФНС от диэлектрических полусфер и усеченных конусов: зеркальная ориентация (*a*, *в*); прямая ориентация (*б*, *г*)

С другой стороны, когда используется зеркальная конфигурация микроаксикона (рис. 2, *a*), фотонная струя отрывается от задней поверхности конуса, образуя достаточно протяженную пространственно локализованную область на значительном удалении от поверхности с фокальной дистанцией  $d \sim 1,7\lambda$ . Наши численные оценки показали, что зеркальная ориентация конуса не дает заметного увеличения интенсивности, но значительно увеличивает рабочий диапазон ФНС до  $L \sim 4\lambda$  (рис. 2, *a*).

Современные оптические технологии позволяют создавать миниатюрные объекты и более сложных пространственных конфигураций, чем полусферы и конусы. Использование каждого такого дифракционного микрообъекта может быть направлено на решение конкретной практической задачи.

На рис. 3 показаны основные параметры ФНС от комбинированных частиц, состоящих из аксикона и одной или двух полусфер, прикрепленных к его граням. Параметры расчета соответствуют рис. 2. Видно, что присоединение к аксикону полусферы (рис. 3, *в–г*) приводит к усилению поля ФНС из-за дополнительной сферической фокусировки. Струя «прилипает» к внешней грани сложной частицы и выходит из нее в виде экспоненциально убывающего хвоста. Здесь ориентация комбинированных частиц относительно падающего излучения также существенна, поскольку меняется оптическое действие составляющих ее элементов. Первоначально волновой фронт падающего излучения деформируется первым рассеивающим элементом, а затем подфокусируется вторым элементом «составной» частицы.

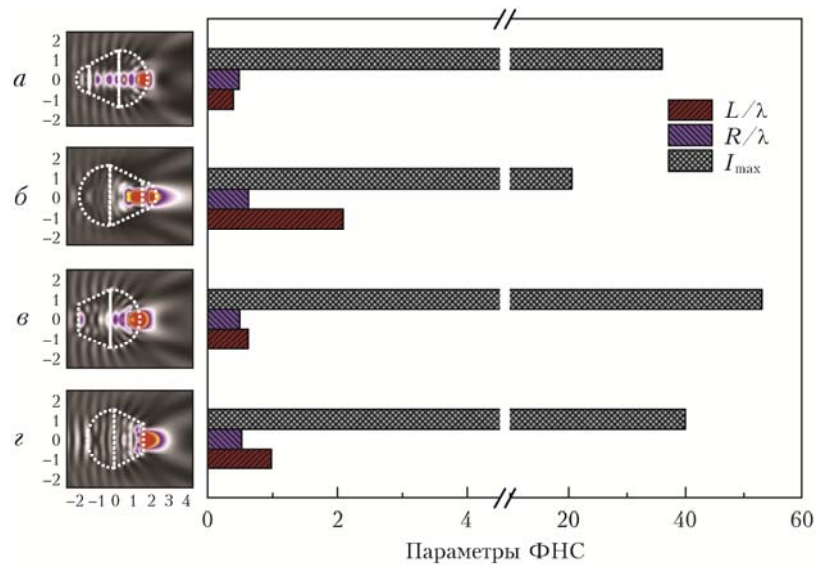


Рис. 3. Параметры ФНС от комбинированных частиц: зеркальная ориентация (*a*, *в*); прямая ориентация (*б*, *г*)

Это приводит в ряде случаев к более чем трехкратному увеличению пиковой интенсивности по сравнению с чистым аксиконом.

Следует заметить, что вариант микрочастицы «аксикон + правая полусфера» является наиболее выигрышным (по сравнению с зеркально-ориентированной частицей) с точки зрения увеличения интенсивности струи ( $I_{\max} = 53$ ). Слабая коническая фокусировка перекрывается сферической, налагаемой полусферой справа, что приводит к дополнительному увеличению пиковой интенсивности ФНС на 25%.

Другой тип составных частиц (рис. 3, а, б) представляет собой более сложную комбинацию усеченного кругового конуса и двух полусферических шапок, прикрепленных к его сторонам. Подобная конфигурация частиц значительно сокращает протяженность струи, но почти удваивает его пиковую интенсивность ( $I_{\max} \approx 36$ ) по сравнению с чистым усеченным конусом ( $I_{\max} \approx 15$ ).

Анализ результатов численных расчетов, представленных на рис. 3, позволяет сделать вывод о том, что фотонные струи от составных микрочастиц демонстрируют более высокие значения пиковой интенсивности по сравнению с простыми полусферами или аксиконами. Экстремально высокие значения  $I_{\max}$  достигаются благодаря добавлению к микроаксиконо полусферы справа. Пространственный размер таких струй достаточно компактен и составляет порядка  $R \approx \lambda/2$ .

Стоит заметить, что в простых сферах и аксиконах область «рабочей зоны» невелика ( $d \approx \lambda/2$ ), в то время как поперечные размеры струи различны:  $R \approx 0,44\lambda$  для аксикона и  $R \approx 0,56\lambda$  для сферы. Кроме того, струи, образованные такими простыми геометрическими фигурами, имеют близкую интенсивность  $I_{\max} \approx 15$  и протяженность  $L \approx 4\lambda$ . Композитные же частицы, собранные из усеченного конуса и одного или двух полушарий, создают ФНС с повышенной интенсивностью. Такие струи имеют меньшую протяженность, однако обладают субдифракционным поперечным размером. Это может представлять практический интерес с точки зрения экстремальной локализации оптического поля вблизи теневой поверхности частицы за счет дополнительной фокусировки световой волны.

Таким образом, в данной статье мы исследовали влияние формы и ориентации прозрачных несферических диэлектрических микрочастиц на пространственные и энергетические характеристики фотонных струй, формирующихся в их окрестности под воздействием плоской волны. Численные расчеты, проведенные с помощью метода дискретной дипольной аппроксимации, ясно показывают, что, изменяя пространственную форму рассеивающих микрообъектов, можно в определенной степени контролировать характеристики ФНС, а именно существенно улучшить их ключевые параметры (увеличить длину струи, уменьшить ее ширину или повысить пиковую интенсивность).

Комбинированные частицы (полусферы, соединенные с усеченным конусом), благодаря совмещению сферической и конической типов фокусировки, способны создавать фотонные струи с экстремальной пространственной локализацией и пиковой интенсивностью, превышающей в несколько раз значения, достижимые для частиц базовых геометрических форм (полусфера, аксикон).

1. Geints Yu.E., Zemlyanov A.A., Panina E.K. Microaxicon-generated photonic nanojets // J. Opt. Soc. Am. B. 2015. V. 32. P. 1570–1574.
2. Kotlyar V.V., Stafeev S.S. Modeling the sharp focus of a radially polarized laser mode using a conical and a binary microaxicon // J. Opt. Soc. Am. B. 2010. V. 27. P. 1991–1997.
3. 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. (Berlin). 2015. V. 527. P. 491–497.
4. Minin I.V., Minin O.V., Pacheco-Pena V., Beruete M. Localized photonic jets from flat, three-dimensional dielectric cuboids in the reflection mode // Opt. Lett. 2015. V. 40. P. 2329–2332.
5. Li X., Chen Z., Taflove A., Backman V. Optical analysis of nanoparticles via enhanced backscattering facilitated by 3-D photonic nanojets // Opt. Express. 2005. V. 13, N 22. P. 526–533.
6. Geints Yu.E., Panina E.K., Zemlyanov A.A. Control over parameters of photon nanojets of dielectric microspheres // Opt. Commun. 2010. V. 283. P. 4775–4781.
7. 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. 2008. V. 18. P. 485302. DOI: 10.1088/0957-4484/18/48/485302.
8. Wu W., Dey D., Memis O.G., Katsnelson A., Mohseni H. Fabrication of large area periodic nanostructures using nanosphere photolithography // Nanoscale Res. Lett. 2008. V. 3. P. 351–354.
9. Grojo D., Boarino L., De Leo N., Rocci R., Panzarsa G., Delaporte P., Laus M., Sparnacci K. Size scaling of mesoporous silica membranes produced by nanosphere mediated laser ablation // Nanotechnology. 2012. V. 23. P. 485305. DOI: 10.1088/0957-4484/23/48/485305.
10. Allen K.W., Farahi N., Li Y., Limberopoulos N.I., Walker D.E., Urbas A.M., Liberman V., Astratov V.N. Super-resolution microscopy by movable thin-films with embedded microspheres: Resolution analysis // Ann. Phys. (Berlin). 2015. V. 527. P. 513–522.
11. Bityurin N., Afanasiev A., Bredikhin V., Alexandrov A., Agareva N., Pikulin A., Ilyakov I., Shishkin B., Akhmedzhanov R. Colloidal particle lens arrays-assisted nanopatterning by harmonics of a femtosecond laser // Opt. Express. 2013. V. 21. P. 21485–21490.
12. Abdurrochman A., Lecler S., Mermet F., Tumbelaka B.Y., Serio B., Fontaine J. Photonic jet breakthrough for direct laser microetching using nanosecond near-infrared laser // Appl. Opt. 2014. V. 53. P. 7202–7207.
13. Ghenuche P., De Torres J., Ferrand P., Wenger J. Multi-focus parallel detection of fluorescent molecules at picomolar concentration with photonic nanojets arrays // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105, N 13. P. 131102. DOI: 10.1063/1.4896852.
14. Astratov V.N., Darafsheh A., Kerr M.D., Allen K.W., Fried N.M., Antoszyk A.N., Ying H.S. Photonic nano-

- jets for laser surgery // SPIE Newsroom. 2010. DOI: 10.1117/2.1201002.002578.
15. *Cui X., Erni D., Hafner C.* Optical forces on metallic nanoparticles induced by a photonic nanojet // *Opt. Express*. 2008. V. 16, N 18. P. 13560–13568.
16. *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. V. 18, N 48. P. 485302. DOI: 10.1088/0957-4484/18/48/485302.
17. *Draine B.T., Flatau P.J.* Discrete-dipole approximation for periodic targets: Theory and tests // *J. Opt. Soc. Am. A*. 2008. V. 25. P. 2693–2703.
18. *Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Панина Е.К.* «Фотонные струи» от диэлектрических микроаксионов // *Квант. электрон.* 2015. Т. 45, № 8. С. 743–747.

*Yu.E. Geints, E.K. Panina, A.A. Zemlyanov.* **Comparative analysis of key parameters of photonic nanojets from axisymmetric nonspherical microparticles.**

The effect of “photonic nanojet” (PNJ) arising in the near-field scattering region on the surface of dielectric axisymmetric microparticles (hemisphere, axicon, and combined particles) under optical illumination is theoretically considered. Key PNJ parameters (length, width, and peak intensity) are numerically calculated using the method of discrete-dipole approximation; the dependence of these parameters on the geometric shape of microparticles is analyzed. We show that the use of a special type of combined transparent particles, which consists of an axicon and two attached hemispheres, allows ultra-localized light fluxes with a peak intensity considerably exceeding the corresponding values for particles of simple shapes (hemisphere and axicon).