УДК: 535.016, 535.361, 535.393

# ФОТОНИКА МЕЗОРАЗМЕРНЫХ ИЗОЛИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ: ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ

И.В. Минин, О.В. Минин, Н.А. Харитошин

*В статье рассмотрен вопрос об экстремальной фокусировке излучения в пространственную область с субволновым размером при использовании особенностей взаимодействия излучения с изолированными диэлектрическими частицами произвольной формы и характерным размером, равным длине волны. Представлены результаты численных расчетов интенсивности электромагнитного поля вблизи поверхности таких частиц. Исследован вопрос о локальной фокусировке непоглощающей мезочастицы («фотонных мезоструях»). Установлено, что варьирование формы частицы и ее ориентации в пространстве относительно направления падения излучения при фиксированных оптических параметрах ее материала позволяет эффективно управлять амплитудными и пространственными характеристиками области «фотонной мезоструи».*

*Ключевые слова: фотоника, мезоразмер, диэлектрическая частица, фотонная струя.*

В связи с активным развитием и использованием в науке и промышленности различных нанотехнологий, в настоящее время появилась возможность создания нано- и мезообъектов различных форм (сфероиды, пирамиды, конуса, кубики, призмы и т. п.). Каждая такая частица создается для наиболее эффективного решения конкретной практической задачи для создания оптимальной конфигурации электромагнитного поля. Существенным аспектом указанной проблемы является возможность субдифракционной фокусировки электромагнитного поля, например, сферическими или цилиндрическими диэлектрическими частицами – так называемый эффект «фотонных наноструй» [1–3].

До недавнего времени считалось, что такие микрочастицы принципиально должны обладать высокой степенью пространственной осевой симметрией формы – сферы, сфероиды, цилиндры, диски. В тоже время в [4, 5] показано, что фотонные струи могут быть сформированы и диэлектрическими частицами, не обладающими пространственной осевой симметрией формы.

В настоящей работе приведены результаты моделирования особенностей формирования фотонных струй от диэлектрических мезоразмерных частиц произвольной формы. Показатель преломления материала частиц был выбран равным 1.46 [4], диаметр сферической частицы составлял длину волны излучения при освещении линейно-поляризованной (по У) плоской волной. Остальные рассмотренные ниже частицы произвольной формы были «вписаны» в сферу указанных размеров.

Моделирование проводилось на основе решения уравнений Максвелла методом FIT [6] с пространственной сеткой и условиями, аналогичными работе [4].

Комплексная характеристика фотонной мезоструи, формируемой диэлектрической частицей произвольной трехмерной формы, в настоящей работе представлена в виде модифицированного т. н. «фактора качества» струи $Q$ [7], который связывает все основные характеристики струи: $Q = L_{jet} I_{\max} / FWHM_{x,y}$ – в данной работе в отличие от [7] мы определяем длину фотонной струи $L_{jet}$ как ширину на уровне половинной мощности (FWHM) вдоль направления распространения излучения (оси z), $I$ – максимальное значение интенсивности поля вдоль мезоструи. Таким образом, длина струи определяется как $FWHM_z$ от распределения интенсивности поля вне частицы (т. е. если максимум интенсивности находится внутри частицы, длина струи отсчитывается от поверхности этой частицы). $FWHM_{x,y}$ – минимальное значение ширины распределения интенсивности поля поперек фотонной струи в плоскости «фокуса» – точки максимальной интенсивности поля вдоль оси распространения излучения.

Основные результаты моделирования основных свойств фотонных мезоструй приведены в таблице 1.

Здесь: N – номер рисунка (рисунок 1), на котором показано распределение интенсивности поля вдоль оси распространения излу-

чения для частицы соответствующей формы, x/λ, y/λ, z/λ – значения FWHM соответственно по каждой из осей в единицах длины волны излучения, L/λ – расстояние от внешней теневой поверхности частицы до точки с максимальным значением интенсивности поля вдоль фотонной мезоструи (знак "–" соответствует нахождению этого значения внутри частицы), $I_{max}$ – максимальное значение интенсивности поля вдоль мезоструи, нормированное на соответствующее значение для сферической частицы.

Таблица 1 – Результаты моделирования основных свойств фотонных мезоструй

| N | x/λ | y/λ | z/λ | L/λ | $L_{jet}$, λ | $I_{max}$ | Q |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| а | 0.39 | 0.37 | 0.72 | -0,1 | 0,51 | 1 | 1.38 |
| г | 0.45 | 0.43 | 1.07 | 0 | 0,84 | 1.24 | 2.41 |
| д | 0.29 | 0.57 | 1.09 | -0,15 | 0,71 | 0.6 | 1.47 |
| е | 0.29 | 0.57 | 1.6 | 0,15 | 1,38 | 0.48 | 2.28 |
| б | 0.51 | 0.41 | 1.12 | -0,1 | 0,88 | 0.8 | 1.72 |
| в | 0.49 | 0.37 | 1.06 | 0 | 0,83 | 1 | 2.24 |

На рисунке 2 показаны гистограммы распределения следующих основных характеристик фотонных мезоструй: эллиптичность струи ($FWHM_x/FWHM_y$), положение начала струи, фактор качества, минимально достижимое субволновое разрешение формируемой струи.

Анализ полученных результатов сводится к следующему:

– при выбранных параметрах оптического контраста и размера частиц наилучший фактор качества струи обеспечивается кубической частицей (поскольку по сравнению со сферической частицей струя начинается непосредственно у теневой поверхности частицы),

– наилучшую аксиальную симметрию струи обеспечивают частицы сферической и кубической формы,

– наилучшим субволновым разрешением обладают частицы конической формы (аксиконы) при максимальной (среди рассмотренных частиц) эллиптичности струи,

– максимальную длину струи формирует частица в виде аксикона при падении излучения на ее вершину, однако значение максимальной интенсивности поля вдоль струи почти в два раза ниже, чем для кубической или сферической частиц.

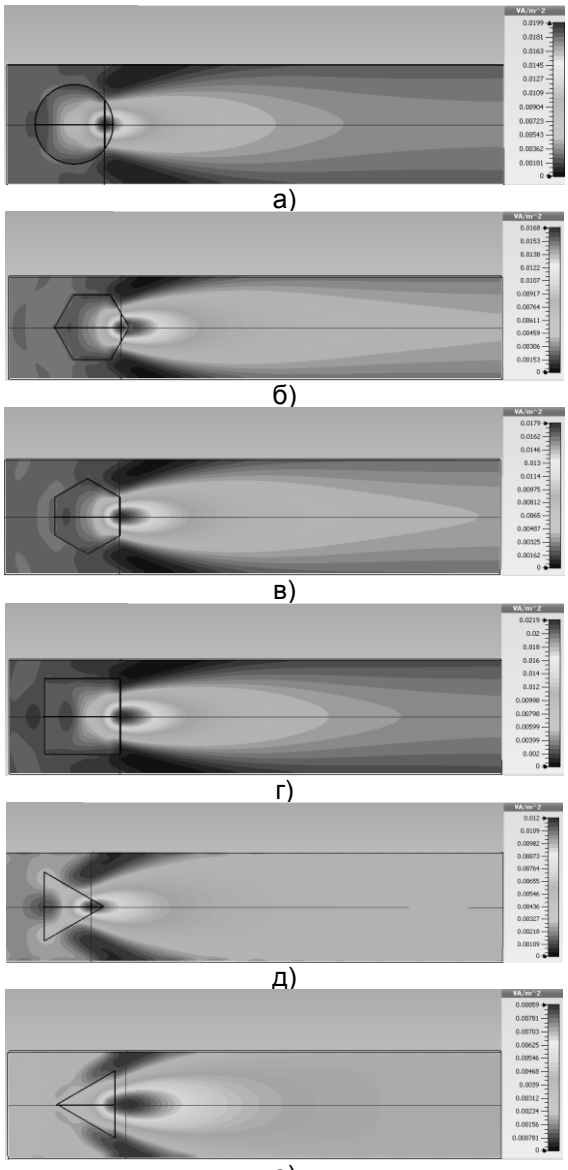


Рисунок 1 – Распределение интенсивности поля вдоль направления распространения излучения

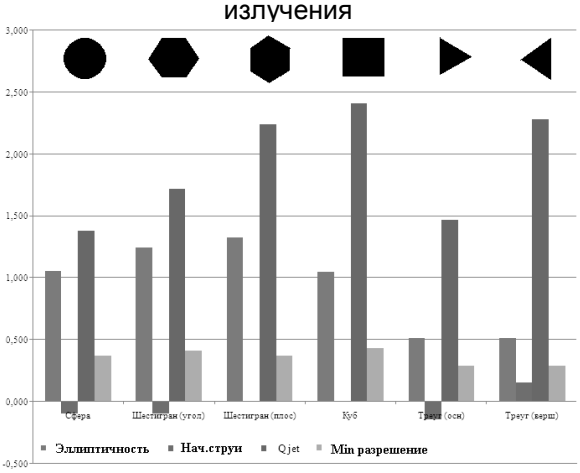


Рисунок 2 – Основные параметры формируемых фотонных мезоструй

Следует отметить еще одну особенность формирования фотонных струй частицами произвольной формы, отсутствующей у частиц сфероподобной, «классической» формы. Так, в [5] была рассмотрена частица осесимметричной конической формы (аксикон [8]) при падении излучения со стороны вершины конуса с параметрами: показатель преломления материала диэлектрика 1.42, диаметр основания конуса $1.0\lambda_0$, высота – $1.0\lambda_0$. Величина распределения интенсивности поля в области максимальной концентрации на оптической оси (по уровню половинной мощности, FWHM) составила $0.47\lambda_0$, что меньше классического дифракционного предела. Однако в случае «обратной» ориентации частицы (падение излучения со стороны основания) фотонная струя при выбранных параметрах не образуется, что объясняется разными условиями существования эффекта полного внутреннего отражения [9] для конических частиц в зависимости от направления падения излучения. Проникновение части излучения в виде затухающих волн за границу аксикона в этом случае отчетливо видно на рисунке 3, когда обеспечивается наибольшая концентрация электромагнитной энергии на вершине аксикона. В этом случае основной поток энергии начинает распространяться под большими углами к оптической оси симметрии, а не вдоль нее, что обусловлено увеличением вклада продольной компоненты электрического поля. На этом же рисунке видно, что область концентрации сфокусированной энергии (фотонной “струи”) находится внутри частицы.

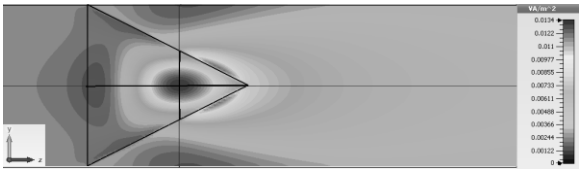

Рисунок 3 – Распределение интенсивности поля в окрестности поверхности аксикона

В приближении геометрической оптики можно показать, что для условия отсутствия внутреннего отражения при падении излучения со стороны основания аксикона угол при вершине должен удовлетворять условию: $\alpha > \arccos(1/n)$. При падении излучения со стороны вершины аксикона аналогичное соотношение записывается в виде: $\alpha > arctg\left(\sqrt{n^2-1}-1\right)$ при $n > \sqrt{2}$. Зависимости предельных углов для диэлектрических рефракционных аксиконов для оптического контраста *n:1* показаны на рисунке 4.

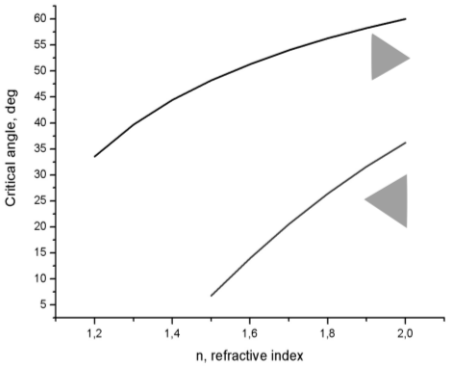


Рисунок 4 – Предельные углы конической поверхности частицы в виде осесимметричного аксикона

Заметим, что для плоского случая в работе [10] было показано, что характерной особенностью взаимодействия плоской волны с бруском треугольного профиля при падении излучения со стороны основания является набор высоко локализованных наноразмерных пиков интенсивности (NIP, характерный размер около 43 нанометров в тангенциальном направлении вдоль поверхности конуса, что существенно меньше дифракционного предела), возникающих по теневой стороне поверхности частицы (треугольный брусок с показателем преломления 3.5 на длине волны 0.5 мкм и диаметром основания 4.5 мкм). Поэтому увеличение внешнего выхода электромагнитного излучения в случае частицы в форме аксикона может быть достигнуто за счет создания дополнительного рассеивающего излучение рельефа (шероховатости) на поверхности полного внутреннего отражения. Однако такой подход технологически будет оправдан, вероятно, для частиц с характерным размером значительно большим длины волны излучения.

Таким образом, варьирование формы частицы и ее ориентации относительно направления падения излучения при фиксированных оптических параметрах ее материала позволяет эффективно управлять амплитудными и пространственными характеристиками области «фотонной мезоструи».

Подчеркнем, что эффект «фотонной струи» для частиц в виде сферы, цилиндра и диска является следствием формул теории Ми – поскольку оптическое поле как внутри, так и вне слабо поглощающей диэлектрической сферы, освещенной электромагнитной волной, характеризуется наличием внутренних и внешних фокусов [11]. Их появление обусловлено кривизной сферической поверхности частицы, приводящей к соответствующим деформациям

падающего на частицу фазового волнового фронта. Таким образом сферическая микрочастица выполняет роль рефракционной аберрационной микролинзы, фокусирующей световое излучение в пределах субволнового объема с протяженностью порядка нескольких длин волн излучения в среде [1–3].

Для частиц же не сфероподобной формы, принцип формирования «фотонной струи» заключается в следующем [4–5]. Плоская волна, падая на частицу, проникает внутрь диэлектрического материала. Поскольку излучение внутри частицы в окрестности ее краев распространяется с большей фазовой скоростью, чем излучение в центре частицы, возникающий набег фазы между различными участками падающей волны приводит к деформациям волнового фронта излучения, который при определенных параметрах частицы приобретает положительную кривизну (излучение направляется внутрь частицы от края к центру), что соответствует условию фокусировки излучения.

В работе рассмотрена проблема экстремальной фокусировки волнового фронта излучения в локальную пространственную область с субволновым размером при использовании особенностей взаимодействия этого излучения с изолированными диэлектрическими мезоразмерными частицами произвольной трехмерной формы.

Полученные результаты могут быть использованы в элементах нанофотоники изолированных частиц произвольной формы, оптического захвата наночастиц [например, 12] и т.п. и служить физическими основами создания нового поколения устройств и передовой элементной базы для оптоэлектроники и интегральной оптики. Отметим, что изучение эффекта фотонной струи от частиц произвольной формы на прямую связано и с проблемой создания новых информационных технологий по управлению оптическими нанополями, поскольку по физической природе нанополя существуют только вблизи или на поверхности сред и, следовательно, зависят от размеров и геометрии нанообъектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen, Z. Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique / Z. Chen, A. Taflove, V. Backman // Optics Express. – 2004. – № 12(7). – P. 1214–1220.

2. Li, X. Optical analysis of nanoparticles via enhanced backscattering facilitated by 3-D photonic nanojets / X. Li, Z. Chen, A. Taflove, V. Backman // Opt. Express. – 2005. – № 13(2). – P. 526–533.

3. Heifetz, A. Photonic Nanojets / A. Heifetz, S.-C. Kong, A. V. Sahakian, A. Taflove, V. Backman // J. Comput. Theor. Nanosci. – 2009. – № 6(9). – P. 1979–1992.

4. Pacheco-Pena, V. Terajets produced by 3D dielectric cuboids / V. Pacheco-Pena, M. Beruete, I. V. Minin, O. V. Minin. // Appl. Phys. Lett. – 2014. – № 105(1). – P. 084102–084105.

5. Минин, И. В. Формирование фотонных тераструй от диэлектрических частиц, не обладающих осевой пространственной симметрией формы / И. В. Минин, О. В. Минин, Н. А. Харитошин // Вестник СГГА. – 2014. – № 4(28). – С. 102–111.

6. CST – Computer Simulation Technology [Электронный ресурс] // CST, URL: https://www.cst.com/

7. Kong, S.-C. Quasi one-dimensional light beam generated by a graded-index microsphere / S.-C. Kong, A. Taflove, V. Backman // Opt. Express. – 2009. – № 17(5). – P. 3722–3731.

8. McLeod, J.H. The axicon: a new type of optical element / J.H. McLeod // Journal of Opt. Soc. Am. – 1954. – № 44(8). – P. 592–597.

9. *Г. Ван де Хюлст*. Рассеяние света малыми частицами / пер. с англ. Т. В. Водопьяновой, под ред. В. В. Соболева. – М. : Изд-во иностранной литературы. 1961. – 537 с.

10. Z. Chen, X. Li, A. Taflove, V. Backman. Backscattering enhancement of light by nanoparticles positioned in localized optical intensity peaks // Appl. Opt. – 2006. – №. 45(4). – P. 633-638.

11. Золотарёв, В. М. Полное внутреннее отражение // Физическая энциклопедия / Гл. ред. А. М. Прохоров. – М. : Большая Российская энциклопедия. – 1994. – Т. 4. – 704 с.

12. Cizmar, T. An optical nanotrap array movable over a milimetre range / T. Cizmar, M. Siler, P. Zemanek // Appl. Phys. – 2009. – № 84(1/2). – P. 197–203.

***Минин И.В.*** *– профессор кафедры МиТОП, д.т.н, профессор, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, тел.: 8(383)361-07-45, prof.minin@gmail.com.*

***Минин О.В.*** *– зав. кафедрой МиТОП, д.т.н., профессор, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, тел.: 8(383)361-07-45, kaf.metrol@ssga.ru.*

***Харитошин Н.А.*** *– аспирант кафедры МиТОП, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, тел.: 8(952)940-84-49, Kharitoshin.N.A@mail.ru.*