

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 535.016, 535.361, 535.393

Коллективные эффекты при формировании ансамбля фотонных наноструй упорядоченной микросборкой диэлектрических 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 26.11.2018 г.

Представлены результаты теоретических исследований пространственно-локализованных ближнепольных световых структур (фотонных наноструй, ФНС), формирующихся при рассеянии лазерного излучения на метаповерхности в форме однослойной упорядоченной сборки диэлектрических микрочастиц (сфер, конусов), внедренных в прозрачную матрицу (силиконовую пленку). Путем решения уравнений Максвелла по методике вычислительной электродинамики проанализированы основные параметры локализованных световых структур (длина, ширина, пиковая интенсивность) в условиях взаимовлияния световых полей соседних микрочастиц. Установлено, что основными факторами, влияющими на исследуемые характеристики ФНС, являются пространственная ориентация микроконусов, а также глубина их погружения в силиконовую матрицу. Показано, что ряд пространственных конфигураций конических микросборок позволяет создавать ансамбль ФНС со специфическими характеристиками, недостижимыми для изолированных микроконусов. Упорядоченные кластеры сферических частиц обладают преимуществом с точки зрения комплексной оценки параметров ФНС.

Ключевые слова: фотонная наноструя, микросборка частиц, диэлектрические микрочастицы; photonic nanojet, microassembly of particles, dielectric microparticles.

Введение

Задача экстремальной фокусировки света в субволновую область вблизи малых материальных объектов является крайне важной с точки зрения развития новых оптических технологий. Совершенствование устройств наноптики с целью повышения их быстродействия и компактности, ориентация на энерго- и ресурсосберегающие технологии выдвигают в настоящее время дисперсную среду в качестве удобного объекта реализации миниатюрных устройств на основе как одиночных, так и упорядоченныхборок (ансамблей) прозрачных микро- и наночастиц [1]. В последние годы исследования в этом направлении расширяются, поскольку были экспериментально продемонстрированы возможности микрочастиц по обеспечению функционирования различных устройств формирования и преобразования оптического излучения.

Способность микрочастиц различных пространственных форм концентрировать световую энергию находит практическое применение в современных оптических технологиях, связанных с обработкой материалов [2], детектированием и сортировкой наноразмерных частиц [3], ближнепольной микроскопией, прецизионным преобразованием излучения [4],

оптической хирургией в качестве «оптического скальпеля» или «оптического пинцета», а также в устройствах хранения данных с ультравысокой плотностью записи.

Наибольший интерес с точки зрения будущих приложений представляет возможность осуществления полного контроля за параметрами фотонных потоков вблизи микрообъектов на нанометровых масштабах, сравнимых с размерами современных полупроводниковых устройств. Это сделает возможным переход от электронных и оптоэлектронных систем к полностью оптическим схемам, которые обладают большим быстродействием.

Использование для целей локализации световой энергии диэлектрических микрообъектов в форме сфер [5, 6], микроцилиндров [7], дисков [8], конусов [9], а также комбинированных частиц [10] позволяет создавать в пространстве высоколокализованные световые потоки — так называемые фотонные наноструи (ФНС). Образование высокоинтенсивной области оптического поля в форме световой струи является следствием аберрационной фокусировки излучения слабо поглощающими микрообъектами, размер которых близок к длине волны падающего излучения (мезомасштабные частицы). Именно мезомасштабный размер частиц предопределяет и пространственную область существования ФНС, ограничивая ее границами ближней зоны дифракции световой волны, образованной суперпозицией уходящих и эванесцентных мод, что позволяет реализовать более

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

существенную ее локализацию, чем в дальней зоне дифракции. Форма рассеивающего излучение объекта, его микрофизические свойства, а также тип освещающего микрообъект излучения (плоская волна, сфокусированный пучок) определяют пространственную структуру и мощностные характеристики ФНС.

Как правило, в большинстве теоретических и экспериментальных исследований рассматриваются одиночные частицы, расположенные в свободном пространстве. Очевидно, что использование группы близкорасположенных микрообъектов (микросборки) вследствие интерференции оптических полей при дифракции излучения на соседних микрочастицах может существенным образом повлиять на параметры отдельных наноструй [11–13].

Простейшим видом микросборки является слой диэлектрических микросфер, нанесенный на поверхность материала, например из коллоидного раствора, и образующий в результате процесса самоорганизации плотную упаковку частиц [2]. Однако в ряде работ отмечается, что при таком типе микросборки применяемые в качестве фокусирующих элементов сферические микрочастицы формируют в ближнем поле рассеяния волновую структуру с невысоким пространственным разрешением, обусловленным как относительно большими размерами частиц ($> \lambda$), так и их сферической формой.

В настоящее время активно разрабатываются технологии лазерного наноструктурирования поверхностей с использованием массива упорядоченных диэлектрических мезомасштабных частиц, размещенного на диэлектрической подложке [14]. Такие микросборки формируют максимумы распределения интенсивности оптического поля с масштабами, меньшими длины волны используемого излучения, и могут быть применены для текстурирования материалов, записи и преобразования оптических сигналов, в качестве подложек при каталитических процессах. В роли подложки (матрицы) может выступать, например, полимерная силиконовая пленка, которая уникальна тем, что внедряемые в нее микрочастицы могут быть зафиксированы в любой пространственной конфигурации, а не только в форме плотно упакованных частиц. Затем гибкая полимерная матрица может быть перенесена на любую поверхность и освещена оптическим излучением. Поскольку такая пленка, по сути, является метаматериалом, то актуальными становятся исследования коллективных дифракционных эффектов от ансамбля частиц при различном их взаимном расположении относительно друг друга. Данный вопрос поднимался в ряде работ [11, 13, 15]: было установлено, что как подложка, так и соседние частицы могут привести, например, к кратному падению интенсивности оптического поля в фокальных зонах ФНС по сравнению со случаем изолированной сферы в вакууме.

В ряде практических задач требуется получение максимально протяженных ФНС. Способностью модифицировать фокальную перетяжку светового пучка в протяженную, практически бездифракционную область фокуса обладают аксиконы, т.е. линзы ко-

нической формы [9]. Пространственная структура оптического поля, сформированного такими линзами, зависит от вершинного угла (толщины) аксикона. Однако следует учитывать, что при формировании оптических полей от микроаксиконов ключевым моментом является их ориентация в пространстве, поскольку меняется величина оптического контраста среды при пересечении световой волной границ частицы, а соответственно, и фокусирующие свойства частицы.

Поскольку задача настоящего исследования состояла в поиске наиболее выигрышных конфигураций микросборок диэлектрических микрочастиц, позволяющих формировать ансамбль ФНС повышенной интенсивности и протяженности, то подробно был исследован вопрос о влиянии коллективных эффектов на пространственные и амплитудные характеристики ФНС при варьировании расстояния между частицами, их формы и пространственной конфигурации размещения в подложке. В качестве объекта исследований нами были выбраны микроконусы, размещенные в прозрачной силиконовой матрице и различно ориентированные относительно падающего излучения, а также традиционно используемые сферы с подобными оптическими свойствами.

Приведены результаты численного моделирования ближнепольной фокусировки световой волны ансамблем микрочастиц, размещенных в прозрачной силиконовой матрице в узлах прямоугольной пространственной решетки. Показано, что путем варьирования периода размещения и конфигурации сборки частиц удается модифицировать параметры формирующихся световых наноструй, что открывает новые перспективы управления ансамблем ФНС.

Методика численного моделирования

Численный расчет структуры ближнего поля при дифракции световой волны на сборке микрочастиц проводился при помощи коммерческого программного пакета Lumerical FDTD Solutions. Использовалась 3D-геометрия расчетной области, на границах которой ставились условия идеального согласования полей и пространственной симметрии (рис. 1). Точность численного решения уравнений контролировалась адаптивной расчетной сеткой, узлы которой сгущались в областях резких градиентов диэлектрической проницаемости среды (границы частиц). Общее число узлов сетки составляло несколько десятков миллионов при пространственном и временном шагах схемы порядка 2 нм и 0,06 фс соответственно. Вдоль направления падения излучения (ось z) задавался набор абсолютно согласованных слоев (PML).

Нами был рассмотрен наиболее распространенный тип микросборки, представляющий собой прямоугольную однослойную конфигурацию идентичных частиц на плоскости. Исследовались два типа частиц: сферы с радиусом a и круговые конусы с радиусом основания a и высотой h . Массив микрочастиц размещался внутри прозрачной подложки толщиной $s \geq h$ и периодом расположения (периодом решетки) g ,

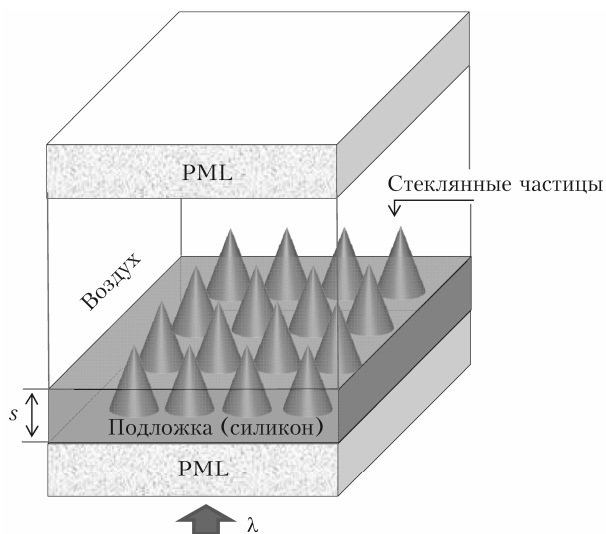


Рис. 1. 3D-геометрия расчетной области, используемой при численном моделировании

что соответствует типичному случаю самосборки и образованию либо плотной ($g = a$), либо разреженной ($g > a$) упаковки частиц. Полагалось, что подложка представляет собой непоглощающую пленку органического полимера, имеющего для определенности показатель преломления $n_l = 1,4$, который находился в воздухе ($n = 1$), а микрочастицы изготовлены из непоглощающего в оптическом диапазоне стекла ($n = 1,6$). Глубина погружения частиц f в матрицу варьировалась в пределах $0 \leq f \leq 2a$. Менялась также ориентация микроконусов (прямая и обратная) относительно падающего излучения.

В начальный момент времени на нижней границе области включался источник монохроматического излучения с длиной волны $\lambda = 0,532$ мкм, представлявший собой плоскую линейно поляризованную волну с вектором электрического поля, направленным вдоль оси x . Оптическая волна распространялась сквозь сборки частиц в направлении положительных значений оси z и формировала дифракцион-

ную картину в ближнем поле рассеяния, которая затем усреднялась за временной интервал в две пикосекунды, что по оценкам было достаточным для учета всех переходных процессов, протекающих в частицах и матрице. Полученные таким образом пространственные распределения относительной интенсивности поля $B(x, z) = |\mathbf{E}(x, z)|^2 / E_0^2$ (E_0 – амплитуда падающей волны) анализировались на предмет обнаружения локализованных областей повышенной интенсивности (ФНС) и определения их размерных и амплитудных характеристик.

Основные параметры ФНС, согласно [16]: эффективная длина струи L и ее поперечный размер R . Данные характеристики определены на рис. 2, б при рассмотрении пространственных профилей интенсивности оптического поля в области внешнего фокуса стеклянного микроаксикона. Будем определять ширину и пространственную протяженность ФНС на уровне половины максимума интенсивности поля (FWHM). Амплитудной характеристикой ФНС является величина пиковой (относительной) интенсивности B_m оптического поля в области ближней зоны рассеяния. Верхняя граница силиконовой матрицы обозначена сплошной линией.

Прежде всего, рассмотрим вопрос о влиянии пространственной ориентации микроконусов на параметры формируемых ими ФНС. В качестве примера на рис. 2, а, б показаны пространственные профили интенсивности B оптического поля вблизи одиночных ($g \gg a$) стеклянных конусов с радиусом основания $a = 2\lambda$, когда частица ориентирована широкой гранью (прямая ориентация) или вершиной (обратная ориентация) к падающему излучению. Здесь же представлен случай формирования ФНС от диэлектрической микросферы с радиусом $a = 2\lambda$ (рис. 2, в), обладающей теми же оптическими свойствами, что и конус. Глубина погружения частиц в матрицу $f = a$.

Видно, что распределение оптического поля в области внешнего фокуса полупогруженных в подложку частиц при одинаковых условиях моделирования существенно различается. Так, для случая

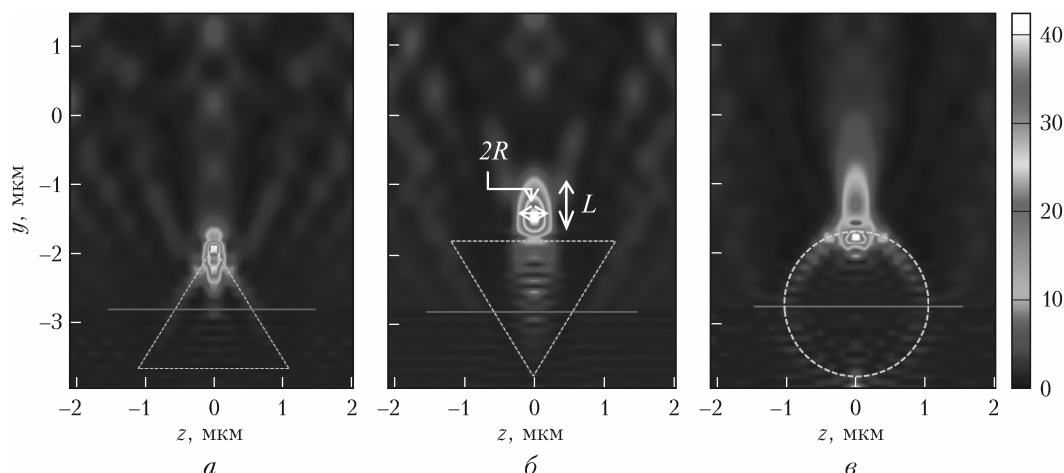


Рис. 2. Пространственный профиль интенсивности B оптического поля в окрестности стеклянных микрочастиц, погруженных в полимерную матрицу: микроконус с прямой (а) и обратной (б) ориентацией; микросферы (в). Излучение падает снизу вверх. Цветной вариант рисунка смотри на сайте: journal@iao.ru

прямой ориентации конуса максимум интенсивности оптического поля располагается в предельно локализованной области у острия частицы, а ФНС образована «вытекающим» из фокальной перетяжки полем. Это обуславливает крайне небольшую протяженность струи ($L \approx 0,1\lambda$) и невысокую интенсивность ($B_m \approx 11$). Изменение пространственной ориентации частицы с прямой на обратную приводит к резкому увеличению длины фотонного потока за ее пределами. ФНС теперь располагается вне поверхности частицы, а также характеризуется более высокой амплитудой ($B_m \approx 35$) и большей длиной ($L \approx 2\lambda$). Данное обстоятельство является прямым следствием изменения величины оптического контраста среды при пересечении световой волной границ частицы [17]. Для сравнения: соответствующие параметры для сферы составляют $L \approx 2,1\lambda$; $B_m \approx 22$. Здесь, как и в случае прямо ориентированного конуса, максимум интенсивности поля находится внутри частицы, но «вытекающий» световой поток имеет большую протяженность. Следует заметить, что иные варианты заглубления микрочастиц в фиксирующую подложку формируют фотонные наноструи с другими размерными и мощностными характеристиками.

На рис. 3 и 4 представлены результаты моделирования базовых характеристик ансамбля ФНС при варьировании расстояния между отдельными частицами g и различной степени погружения в матрицу f . Для удобства анализа размерные параметры кластеров микрочастиц и производимых ими ФНС даются в единицах длины волны освещающего частицы излучения. Это позволяет обобщить установленные закономерности, поскольку, согласно теории Ми [18], сама структура распределения оптического поля дифрагированной на частице волны зависит от безразмерного отношения R/λ . Были рассмотрены крайние ситуации, когда расстояние между отдельными частицами в кластере $g/a = 0$ (плотная упаковка частиц) и $g/a = 1$ (разреженная упаковка). Степень погружения частиц в подложку регулировалась параметром f ($f/a = 0$ – частица на поверхности; $f/a = 2$ – полное погружение в матрицу).

Прежде всего обращает на себя внимание подобие зависимостей основных параметров ФНС для кластера конических частиц с прямой ориентацией, что свидетельствует о крайне слабом влиянии коллективных эффектов при формировании ансамбля фотонных наноструй упорядоченной микросборкой таких диэлектрических частиц. Особенность фокусировки оптического поля подобного рода частицами (см. рис. 2, a) обуславливает низкую протяженность струи, поскольку максимум интенсивности поля располагается главным образом внутри рассеивающей частицы. При этом поперечный размер ФНС всегда является субдифракционным ($R \approx 0,38\lambda$) и не зависит от степени погружения микроконусов с прямой ориентацией в подложку.

Обратная конфигурация конических частиц обнаруживает иные зависимости. Из рис. 1–4 следует, что длина фотонного потока слабо зависит от степени погружения микроконусов в матрицу при

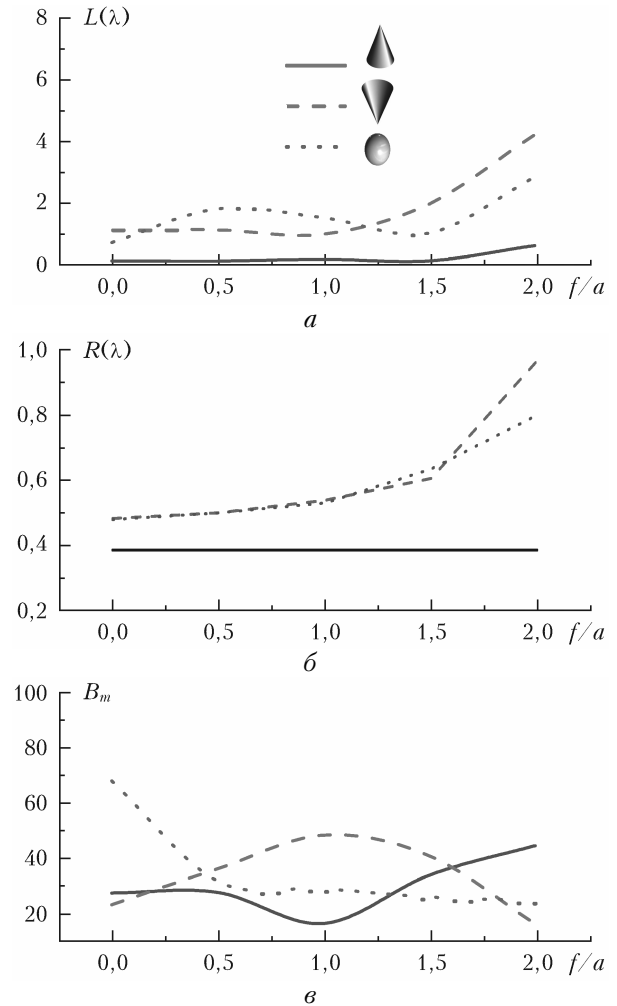


Рис. 3. Основные параметры ФНС (a – длина; b – ширина; ϵ – пиковая интенсивность) для плотно упакованного ($g/a = 0$) кластера стеклянных микрочастиц при изменении степени их погружения в матрицу f/a . Сплошная линия – прямая ориентация конуса; штриховая – обратная ориентация; пунктирная – сфера

$f/a < 1,5$. Другими словами, ансамбль микроконусов, частично погруженных в прозрачную силиконовую матрицу, формирует совокупность ФНС определенной фиксированной длины вне зависимости от взаимного расположения частиц в кластере. Влияние ближайшего окружения каждого конуса, обратно ориентированного относительно падающего излучения, сказывается на длине формируемых в зоне ближнего поля рассеяния ФНС только для полностью погруженных в подложку частиц. Так, значение L для плотно упакованных частиц ($g/a = 0$) в полтора раза меньше соответствующего значения для разреженной ($g/a = 1$) упаковки конусов, что объясняется в первом случае вкладом коллективных эффектов при формировании ансамбля ФНС микросборкой обратно ориентированных конических частиц.

Расчеты показывают, что средняя полуширина ансамбля фотонных наноструй от кластера обратно ориентированных конических частиц имеет тенденцию

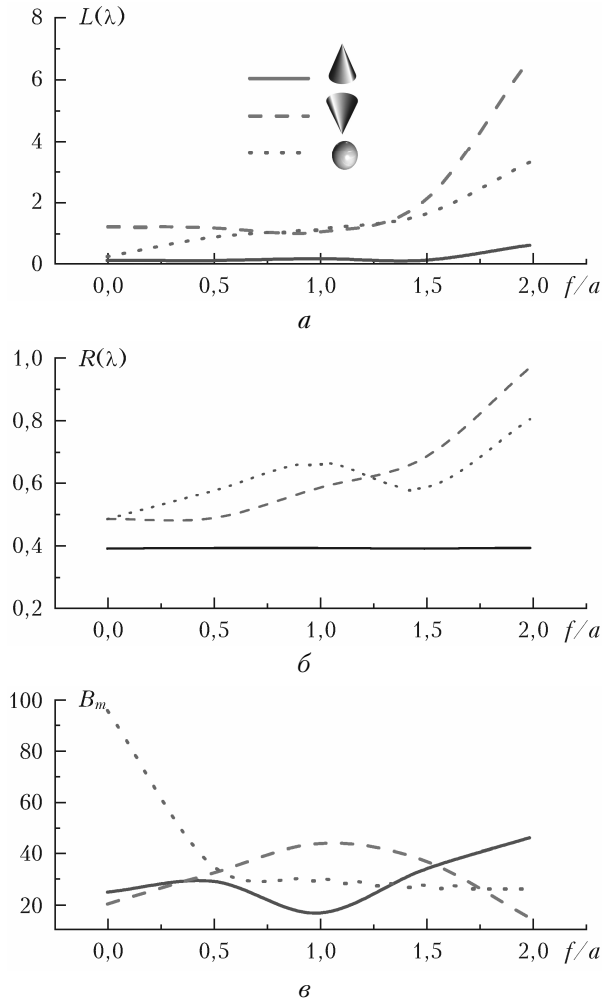


Рис. 4. Основные параметры ФНС (a – длина; b – ширина; v – пиковая интенсивность) с разреженным типом упаковки ($g/a = 1$) кластера стеклянных микрочастиц при изменении степени их погружения в матрицу f/a . Обозначения см. на рис. 3

к увеличению с погружением в непоглощающую матрицу. Можно отметить, что наиболее узкие ФНС возникают для частично погруженных частиц ($f/a < 1$). Кроме того, наблюдается эффект некоторого сужения фотонной струи при уплотнении частиц в кластере.

На рис. 3 и 4 показаны также результаты численных расчетов третьего важного параметра ФНС, а именно пиковых значений относительной интенсивности оптического поля B_m . Видно, что данный параметр характеризуется подобным типом зависимостей для рассматриваемых вариантов упаковки частиц (плотная или разреженная). При частичном погружении микроконусов в обратной ориентации в подложку наблюдается заметное увеличение интенсивности струи (более чем в 2 раза). Изменение ориентации микрочастиц на противоположную (прямая ориентация) приводит к обратному эффекту – к резкому падению пиковых значений интенсивности B_m . Данный эффект связан с различной деформацией волнового фронта излучения, падающего на

частицы, что влечет за собой изменение фокусирующих свойств микроконусов. Наибольшие значения B_m достигаются при использовании кластера микросфер, размещенных на поверхности полимерной подложки. Заглубление микросфер в подложку приводит к падению интенсивности в области фотонной струи.

Комплексная оценка степени пространственной локализации ФНС проводится с помощью критерия качества $Q = (B_m L)/R$ [19]. Численные оценки параметра Q , полученные на основе расчетов размерных и мощностных характеристик ФНС с учетом структурного состава упорядоченной микросборки порождающих их микрочастиц, представлены на рис. 5.

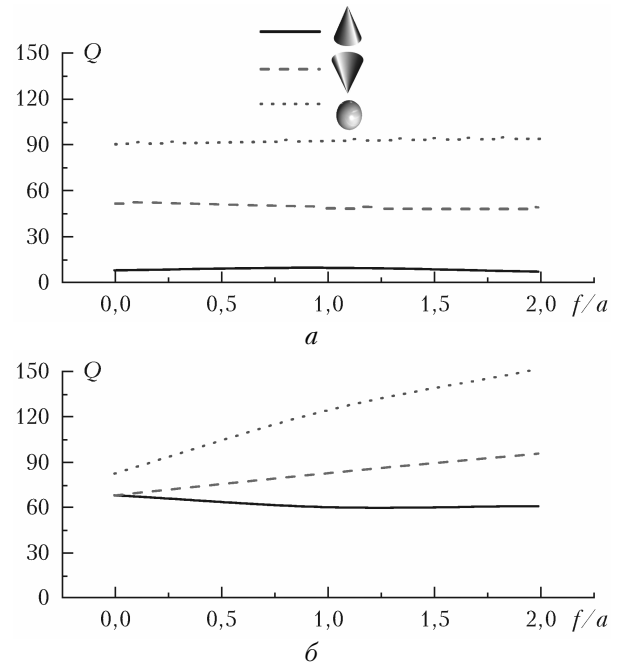


Рис. 5. Значения критерия качества Q ФНС для плотной (а) и разреженной (б) упаковки кластера микрочастиц при изменении степени их погружения в матрицу f/a . Обозначения см. на рис. 3

Видно, что для рассмотренных типов частиц плотная микросборка (рис. 5, а) приводит к формированию ФНС с худшим качеством, чем от изолированных частиц в матрице (рис. 5, б). Это говорит о негативном влиянии коллективных эффектов с точки зрения комплексной оценки параметров ФНС. Когда диэлектрическая микрочастица находится в окружении себе подобных, деструктивная интерференция полей от отдельных микрочастиц может «гасить» ФНС, что выражается в снижении ее интенсивности. При этом, однако, в ряде случаев может наблюдаться продление хвостовой части и, соответственно, некоторое увеличение длины струи. С увеличением расстояния между частицами влияние коллективных интерференционных эффектов ослабевает.

Из рис. 5 следует, что основным фактором, влияющим на величину Q , является форма и ориентация частиц. Ансамбль микросфер дает стабильно

более высокие значения критерия качества по сравнению с аналогичной микросборкой конических частиц. Установлено также, что если частицы находятся на достаточном расстоянии друг от друга ($g > a$), что соответствует случаю их разреженной упаковки, то существенным фактором, влияющим на значение критерия качества, является степень погружения микросфер в полимерную матрицу. При полном погружении ($f/a = 2$) реализуются ФНС с наивысшим параметром качества $Q \approx 150$, что в 2 раза превышает соответствующее значение при $f/a = 0$ (сфера расположена на поверхности подложки).

Ансамбль микроконусов с обратной пространственной ориентацией дает более высокие значения Q относительно прямо ориентированных частиц благодаря, прежде всего, высокой протяженности формируемой струи. Плотность упаковки частиц и их пространственное размещение в фиксирующей подложке в данном случае позволяют несколько увеличить значение комплексного параметра оценки фотонной наноструи Q .

Заключение

Рассмотренные выше примеры дифракционных структур в форме фотонного потока, образующиеся в области ближней зоны рассеяния светового излучения на упорядоченных микросборках диэлектрических микрочастиц, внедренных в прозрачную матрицу, указывают на различие пространственных форм ФНС. На основе теоретического моделирования были исследованы длина, ширина и интенсивность образующихся фотонных наноструй при различной ориентации и пространственной конфигурации размещения частиц в подложке. Показано, что каждый из изученных типов кластеров способен формировать в ближней зоне дифракции массив фотонных струй с субволновым пространственным разрешением. Влияние соседних частиц при формировании ФНС связано с взаимной интерференцией оптических полей и проявляется в основном в пульсациях интенсивности и длины фотонной струи при изменении периода кластерной решетки.

Установлено, что ансамбль конических частиц с прямой ориентацией образует струи с наибольшей устойчивостью пространственных параметров ФНС (длина и ширина), но мощностные характеристики оказались весьма чувствительными к пространственному размещению частиц в подложке, определяемому параметром заглупления частиц. При этом параметры ФНС от кластера конусов, ориентированных вершиной по направлению падения излучения (обратная ориентация), демонстрируют значительные изменения при варьировании глубины погружения частиц в матрицу и расстояния между отдельными частицами.

Установлено, что более плотная упаковка обратно ориентированных конусов благодаря интерференции полей соседних струй неизбежно приведет к пульсациям их интенсивности и может вызвать пространственный «разрыв» изначально сплошной

ФНС на отдельные сегменты вдоль вектора распространения оптической волны, что выражается в колебаниях ширины струи. С увеличением расстояния между частицами влияние коллективных интерференционных эффектов ослабевает. Подобие же зависимостей ФНС для кластера конических частиц с прямой ориентацией свидетельствует о крайне слабом влиянии коллективных эффектов, что обусловлено особенностями фокусировки оптического поля такой рассеивающей частицы. Для прямо ориентированных частиц интерес представляет случай полного погружения микроконусов в матрицу с иным показателем преломления. Формируемые ФНС имеют очень ограниченный размер, но высокую интенсивность и стабильно малый поперечный размер струи.

При определенном расположении диэлектрических частиц в кластере становится возможным реализовать ФНС с параметрами, существенно лучшими, чем для изолированной частицы. Это является принципиальным моментом для ряда практических задач. Так, дифракционное взаимодействие полей от отдельных микроконусов и сфер может продлить хвостовую часть струи, как в случае полностью погруженного в полимерную матрицу массива плотно упакованных частиц (прямая ориентация), либо значительно уменьшить поперечный размер струи при соответствующем повышении ее интенсивности, как в случае частично погруженных в подложку микроконусов (обратная ориентация).

С точки зрения комплексной оценки ФНС (критерий качества) установлено, что кластер микрочастиц формирует ФНС с худшим качеством, чем от изолированной микросферы такого же радиуса, расположенной в матрице. Однако с увеличением расстояния между частицами влияние коллективных интерференционных эффектов ослабевает по причине большей удаленности струй друг от друга и в связи с резким повышением их интенсивности. Это выравнивает качество ФНС от кластера частиц и одиночной частицы.

Кроме того, упорядоченная микросборка диэлектрических микросфер позволяет реализовать фотонный поток с параметром качества, существенно превышающим аналогичное значение для массива конусов вне зависимости от расположения частиц в диэлектрической подложке.

1. Allen K.W., Astratov V.N., Farahi N., Li Y. Super-resolution microscopy by movable thin-films with embedded microspheres: Resolution analysis // *Ann. Phys.* 2015. V. 527, N 7–8. P. 513–522.
2. Wu W., Katsnelson A., Memis O.G., Hooman M. A deep sub-wavelength process for the formation of highly uniform arrays of nanoholes and nanopillars // *Nanotechnology*. 2007. V. 18. DOI: 10.1088/0957-4484/18/48/485302.
3. 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. 131102.
4. Mendes M.J., Araújo A., Vicente A., Bguas H., Ferreira I., Fortunato E., Martins R. Design of optimized wave-optical spheroidal nanostructures for photonic

- enhanced solar cells // *Nano Energy*. 2016. V. 26. P. 286–296.
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 2. P. 526–533.
 6. *Kim M.-S., Scharf T., Mühlig S., Rockstuhl C., Hertzog H.P.* Engineering photonic nanojets // *Opt. Express*. 2011. V. 19, N 11. P. 10206–10220.
 7. *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.
 8. *McCloskey D., Wang J.J., Donegan J.F.* Low divergence photonic nanojets from Si₃N₄ microdisks // *Opt. Express*. 2012. V. 20, N 1. P. 128–140.
 9. *Liberale C., Mohanty S.K., Mohanty K.S., Degiorio A., Cabrinid S., Carpentierod A., Ferrarid E., Cojoc D., Fabrizio E.D.* Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 2006. V. 6095. DOI: 10.1117/12.647277.
 10. *Geints Yu.E., Minin I.V., Panina E.K., Zemlyanov A.A., Minin O.V.* Comparison of photonic nanojets key parameters produced by nonspherical microparticles // *Opt. Quant. Electron*. 2017. V. 49, N 3. DOI: 10.1007/s11082-017-0958-y.
 11. *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, N 8. P. 9052–9057.
 12. *Arnold N.* Influence of the substrate, metal overlayer and lattice neighbors on the focusing properties of colloidal microspheres // *Appl. Phys. A*. 2008. V. 92, N 4. P. 1005–1012.
 13. *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.
 14. *Bityurin N., Afanasiev A., Bredikhin V., Alexandrov A., Agareva N., Pikulin A., Ilyakov I., Shishkin B., Akhmedzhanov R.* Colloidal particle lens arrays-assisted nano-patterning by harmonics of a femtosecond laser // *Opt. Exp*. 2013. V. 21, N 18. P. 21485–21490.
 15. *Rizzato S., Primiceri E., Monteduro A.G., Colombelli A., Leo A., Manera M.G., Rella R., Maruccio G.* Interaction-tailored organization of large-area colloidal assemblies // *Beilstein J. Nanotechnol*. 2018. V. 9. P. 1582–1593.
 16. *Geints Yu.E., Panina E.K., Zemlyanov A.A.* Control over parameters of photon nanojets of dielectric microsphere // *Opt. Commun*. 2010. V. 283. P. 4775–4781.
 17. *Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Панина Е.К.* «Фотонные струи» от диэлектрических микроаксиконов // *Квант. электрон*. 2015. Т. 45, № 8. С. 743–747.
 18. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 662 с.
 19. *Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Панина Е.К.* Эффект «фотонной наноструи» в многослойных микронных сферических частицах // *Квант. электрон*. 2011. Т. 41, № 6. С. 520–525.

Yu.E. Geints, E.K. Panina, A.A. Zemlyanov. Collective effects in the formation of an ensemble of photonic nanojets by an ordered microassembly of dielectric microparticles.

The results of theoretical studies of spatially localized near-field light structures (photonic nanojets) that are formed when laser radiation is scattered on a meta-surface in the form of a single-layer ordered assembly of dielectric microparticles (spheres, cones) embedded in a transparent matrix (silicone film) are presented. By solving Maxwell's equations by the method of computational electrodynamics (FDTD), a detailed analysis of the main parameters of localized light structures (length, width, peak intensity) under the influence of the light fields of neighboring microparticles was carried out. It has been established that the main factors influencing the characteristics of the photon nanojet under study are the spatial orientation of the microcones, as well as the depth of their immersion into the silicone matrix. It is shown that a number of spatial configurations of conic microassemblies allow the creation of an ensemble of photon nanojet with specific characteristics unattainable for isolated microcones. Ordered clusters of spherical particles have an advantage in terms of a comprehensive assessment of the parameters of photonic nanojets.