

УДК 535.42

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ОСТРОСФОКУСИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ЗОНДЫ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

© 2012 С. А. Дегтярев, С. Н. Хонина, Д. Л. Скуратов

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Проведён анализ возможности детектирования острогофокусированного излучения с помощью зондов различной конфигурации. Найдены соотношения энергетических характеристик на входе и выходе сканирующих зондов различных конфигураций с различными размерами входных окон. Показана чувствительность конического диэлектрического зонда к острогофокусированному излучению с преобладающей продольной составляющей электрического поля в центральном пике фокального пятна.

Ближнеполюсная микроскопия, сканирующий зонд, рефракционный микроаксикон, острая фокусировка, детектирование излучения, метод FDTD.

При острой фокусировке лазерных пучков с радиальной поляризацией в фокальном пятне неизбежно возрастает продольный компонент колебаний электрического поля [1, 2]. Чтобы получить аналогичный эффект для линейно-поляризованного пучка, нужно внести в него вихревую или линейную фазовую зависимость [3, 4]. Особенность острогофокусированного излучения состоит в наличии преобладающей продольной компоненты электрического поля, распространение которой происходит перпендикулярно оптической оси зонда. Этот факт ставит вопрос о возможности детектирования такого типа излучения зондами сканирующих ближнеполюсных микроскопов.

В современных микроскопах используются оптические зонды с металлическим покрытием (рис. 1, 2, 3). Однако известно, что чувствительность зондов к острогофокусированному излучению с преобладающей продольной компонентой очень низка. В работе проведено моделирование прохождения сфокусированного микроаксиконом излучения через различные детектирующие элементы. Исследовались следующие элементы: рефракционный аксикон, цилиндрический и конический зонды с металлическим покрытием.



Рис. 1. Цилиндрический зонд



Рис. 2. Конический волновод



Рис. 3. Конический зонд

Численное моделирование осуществлялось с помощью разностного метода решения уравнений Максвелла (FDTD) [5], реализованного в программном пакете RSoft FullWAVE. В силу того, что при использовании данного метода затруднительно моделировать металлы с высокой проводимостью, в работе использовался коэффициент затухания материала, которым покрыт зонд, равный 1,6 и соответствующий слабопроводящим металлам. Показатель преломления диэлектрического материала сердцевинки зондов равен 1,5. Длина волны бралась равной 633 нм.

Обратимость хода излучения в аксиконе

Пусть на входе в основание аксикона задано распределение вектора напряжённости электрического поля, соответствующее лазерному пучку с вихревой структурой фазы:

$$E_x(r, j, z=0) = A r \exp\left(-\frac{r^2}{s^2}\right) \exp(ij), \quad (1)$$

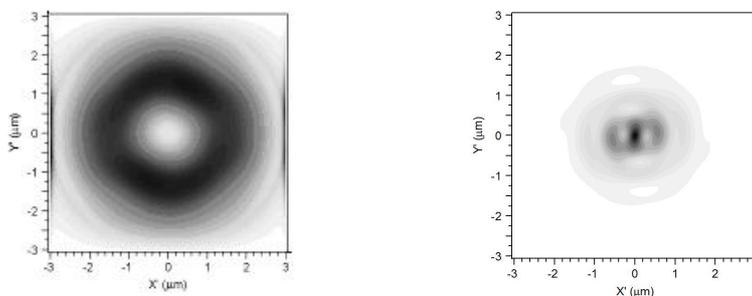


Рис. 4. Интенсивность в иницирующем излучении в основании (слева), в фокальном пятне (справа)

Рассмотрим детектирование фокального пятна (рис. 4 (справа)) микроаксиконом. Для этого используем схему, приведённую на рис. 5. Два одинаковых микроаксикона расположены вершинами друг к другу и их оптические оси совпадают. Левый аксикон фокусирует вихревой пучок, входящий в него слева. На расстоянии $d = 10 \text{ нм}$ от вершины фокусирующего микроаксикона формируется фокальное пятно, которое входит в правый детектирующий микроаксикон (рис. 5).

где (r, j) – полярные координаты в плоскости $z=0$ (непосредственно в плоскости основания аксикона); A – нормирующий множитель; $s = 1,5 \text{ мкм}$ – радиус гауссовского пучка.

На рис. 4 (слева) приведён график интенсивности в основании аксикона.

При фокусировке пучка (1) микроаксиконом с углом раскрытия 94° (высота – 2,8 мкм, диаметр основания – 6 мкм) на выходе формируется фокальное пятно, распределение интенсивности которого изображено на рис. 4 (справа) [6]. Размер фокального пятна, изображённого на рис. 4 (справа): $FWHM_x = 0,31$ – диаметр пятна по полуспаду. При этом в центральном пике фокального пятна основной вклад в интенсивность вносит продольный компонент вектора электрического поля. Возникает вопрос о том, как детектировать остросфокусированные фокальные пятна с подобной структурой.

При прохождении сфокусированного излучения (рис. 4 (справа)) через микроаксикон от вершины к основанию наблюдается некоторая обратимость хода лучей. На рис. 6 показано распределение интенсивности на выходе из основания правого микроаксикона.

Из рис. 4 (слева) и рис. 6 видно, что фокусируемое и расфокусированное излучения имеют сходную кольцеобразную структуру. В центре обоих пятен наблюдается минимум интенсивности. Энерге-

тический анализ пятен на входе и выходе показал, что 90% энергии проходит от острия до основания правого аксикона, изображённого на рис. 5 справа. При этом наиболее полное пропускание наблюдается при равенстве углов левого и правого аксиконов.

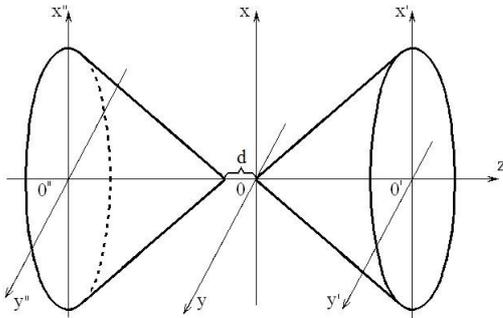


Рис. 5. Расположение аксиконов в вычислительном эксперименте

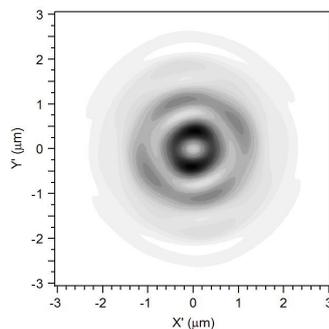


Рис. 6. Интенсивность на выходе из правого аксикона

Детектирование z-компоненты с помощью цилиндрического зонда

Однако на практике микроаксикон не может быть использован в качестве сканирующего элемента ближнепольного микроскопа из-за того, что в него входят не только излучение остросфокусированного малого пятна, расположенного на оптической оси, но и периферийные помехи. Для того чтобы избавиться от периферийных помех и улучшить отражение от стенок, сканирующий зонд покрывают металлом.

После моделирования детектирования остросфокусированного пятна (рис. 4, правый) цилиндрическим зондом (рис. 1) с металлическим покрытием можно сделать вывод о том, что такой зонд не чув-

ствителен к сильно расходящемуся входному излучению с преобладающей z-компонентой в центральном пике. Диаметр входного окна зонда брался равным 100 нм. Диаметр выходного окна – 6 мкм.

Энергетический анализ входного и выходного излучений показывает, что во входное окно зонда входит лишь 0,05% энергии, что крайне мало для детектирования.

В табл. 1 приведён покомпонентный энергетический анализ на входе и выходе зонда.

Таблица 1. Энергии на входе и выходе цилиндрического зонда с диаметром входного окна 100 нм

Энергия	Полная	z-комп.	x-комп.
На входе	121000	20000	89000
На выходе	50	8	33
Соотношение	0,0005	0,0004	0,0005

Из табл. 1 видно, что цилиндрический зонд с диаметром входного окна в 100 нм пропускает через себя 0,05% энергии, что недостаточно для детектирования рассматриваемого излучения.

Детектирование z-компоненты с помощью конического волновода

Волновод конической формы, выполненный из металла (рис. 2), так же, как и цилиндрический зонд, пропускает очень малую долю входного сфокусированного излучения. Через входное окно волновода диаметром в 100 нм проходит только 0,06% всей энергии остросфокусированного входного излучения. Диаметр выходного окна – 6 мкм.

В табл. 2 приведён покомпонентный энергетический анализ на входе и выходе конического волновода.

Таблица 2. Энергии на входе и выходе конического волновода с диаметром входного окна 100 нм

Энергия	Полная	z-комп.	x-комп.
На входе	130000	31100	99500
На выходе	23	6	15
Соотношение	0,0002	0,0002	0,0002

Из табл. 2 видно, что конический волновод с диаметром входного окна в 100 нм пропускает через себя 0,02% энергии, что недостаточно для детектирования рассматриваемого излучения.

Детектирование z-компоненты с помощью конического зонда с металлическим покрытием

Рассмотрен случай, когда для детектирования острогофокусированного излучения с преобладающей z-компонентой в центральном пике используется кониче-

ский зонд, покрытый металлом (рис. 3). Рассмотрены случаи, когда диаметр входного окна равен 50 и 100 нм. Диаметр выходного окна - 6 мкм.

Распределение интенсивности на входе и выходе конического зонда представлено на рис. 7.

В табл. 3 и 4 приведён энергетический анализ излучения на входе и выходе зонда для диаметров входных окон – 100 нм и 50 нм.

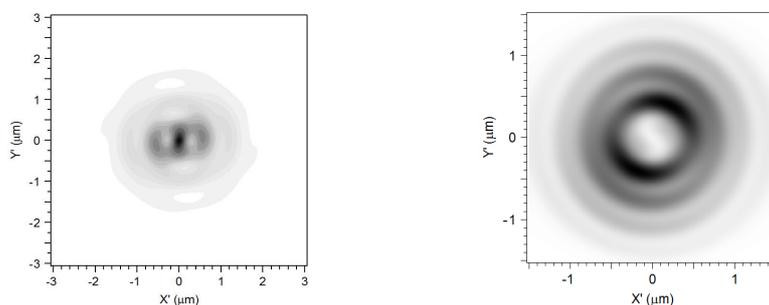


Рис. 7. Распределение интенсивности на входе и выходе конического зонда

Таблица 3. Энергии на входе и выходе конического зонда с диаметром входного окна 100 нм

Энергия	Полная	z-комп.	x-комп.
На входе	134000	31100	99500
На выходе	2300	480	1730
Соотношение	0,017	0,015	0,017

Таблица 4. Энергии на входе и выходе конического зонда с диаметром входного окна 50 нм

Энергия	Полная	z-комп.	x-комп.
На входе	132000	29000	100000
На выходе	1260	262	950
Соотношение	0,009	0,009	0,0095

Из табл. 3 видно, что конический зонд с диаметром входного окна в 100 нм пропускает через себя 1,7% энергии, что вполне достаточно для детектирования рассматриваемого излучения.

Из табл. 4 видно, что конический зонд с диаметром входного окна в 50 нм пропускает через себя 0,9% энергии. Таким образом, установлено, что с уменьшением размеров входного окна зонда уменьшается энергия, которую пропускает через себя зонд. С уменьшением пло-

щади входного окна в 4 раза энергия, входящая в окно, уменьшается в 1,9 раза.

На рис. 8 показаны графики интенсивности I в сечениях пятен вдоль оси x на выходе из зонда (рис. 7 (справа)) для конических зондов с различными диаметрами входных окон.

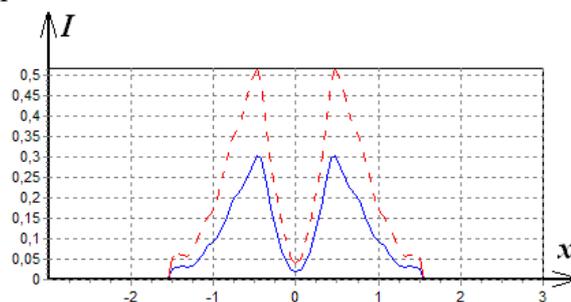


Рис. 8. Интенсивность в сечениях пятен на выходе из конического зонда (пунктирная линия – диаметр входного окна равен 100 нм, сплошная линия – диаметр входного окна равен 50 нм)

Из рис. 8 видно, что с уменьшением входного окна зонда структура выходного пятна не изменяется, но уменьшается его интенсивность.

Заключение

При прохождении вихревого пучка через микроаксикон формируется фокальное пятно, в центральном пике которого преобладает продольный компонент колебаний вектора электрического поля.

При прохождении сфокусированного пучка через микроаксикон от вершины к основанию сохраняется 90% энергии пучка, а также кольцевая структура распределения интенсивности на выходе микроаксикона, что подтверждает обратимость хода излучения при распространении в микроаксиконе.

Показано, что использование цилиндрического зонда, а также полого конического волновода неэффективно для детектирования рассматриваемого излучения.

Детектирование сфокусированного излучения с преобладающим вкладом продольного компонента в центральном пике может осуществляться с помощью конического зонда с оптически плотной сердцевиной и металлическим покрытием. Получено, что через такой зонд проходит 1,7% энергии, что почти в 30 раз больше, чем для других рассмотренных видов зондов с диаметрами входных окон в 100 нм. Это говорит о частичном преобразовании сильнорасходящегося излучения в распространяющееся внутри диэлектрического конического зонда с металлическим покрытием.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 10-07-00109-а и гранта Минобрнауки по ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" (соглашения № 8231).

Библиографический список

1. Котляр, В. В. Моделирование острой фокусировки радиально-поляризованной лазерной моды с помощью конического и бинарного микроаксиконов [Текст] / В. В. Котляр, С. С. Стафеев // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33. – № 1. – С. 52-60.
2. Хонина, С. Н. Управление вкладом компонент векторного электрического поля в фокусе высокоапertureной линзы с помощью бинарных фазовых структур [Текст] / С. Н. Хонина, С. Г. Волотовский // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34. – № 1. – С. 58-68.
3. Экспериментальное исследование дифракции линейно-поляризованного Гауссова пучка на бинарных микроаксиконах с периодом, близким к длине волны [Текст] / С. Н. Хонина, Д. В. Нестеренко, А. А. Морозов [и др.] // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35. – № 1. – С. 11-21.
4. Дегтярев, С. А. Острая фокусировка линейно-поляризованного вихревого пучка с помощью микроаксикона [Текст] / С. А. Дегтярев, С. Н. Хонина // Вест. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2012. – Т. 32. – № 1. – С. 195-206.
5. Головашкин, Д. Л. Расчет дифракции на оптическом микрорельефе методом FDTD [Текст] / Д. Л. Головашкин, Н. Л. Казанский, С. А. Малышева // LAP LAMBERT Academic Publishing. – Германия. – 2011. – 236 с. (ISBN-13: 978-3-8454-0996-2; ISBN-10: 3845409967).
6. Дегтярев, С. А. Влияние величины угла раскрытия на фокусирующую способность микроаксикона [Текст] / С. А. Дегтярев. // Изв. Самар. науч. центра РАН. – 2012. – Т. 14. – № 4. – С. 179-183.

MODELLING THE PROPAGATION OF SHARP FOCUSED LASER BEAMS THROUGH SCANNING PROBES OF DIFFERENT SHAPES

© 2012 S. A. Degtyaryov, S. N. Khonina, D. L. Skuratov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

The paper presents an analysis of the possibility to detect sharp focused radiation with the help of variously shaped probes. The relations of a beam's energy characteristics at the input and output of variously shaped scanning probes with different diameters of input windows are worked out. The sensitivity of a tapered dielectric probe to sharp focused radiation with the dominating longitudinal component of the electric field in the central peak of the focal spot is demonstrated.

Near-field microscopy, scanning probe, refractive microaxicon, sharp focusing, detection of beams, FDTD-method.

Информация об авторах

Дегтярев Сергей Александрович, аспирант кафедры технической кибернетики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sealek@gmail.com. Область научных интересов: сингулярная оптика, ближнепольная микроскопия.

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры технической кибернетики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: khonina@smr.ru. Область научных интересов: сингулярная оптика, дифракционная оптика, оптический анализ изображений.

Скуратов Дмитрий Леонидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механической обработки материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: skuratov_issa@mail.ru. Область научных интересов: структурно-параметрическая оптимизация технологических процессов механической обработки, процессы абразивной обработки.

Degtyaryov Sergei Alexandrovich, post-graduate student of the department of technical cybernetics, Samara State Aerospace University named after S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: sealek@gmail.com. Area of research: singular optics, near-field microscopy.

Khonina Svetlana Nikolaevna, doctor of science, professor of the department of technical cybernetics, Samara State Aerospace University named after S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: khonina@smr.ru. Area of research: singular optics, diffractive optics, optical image processing.

Skuratov Dmitry Leonidovich, doctor of technical science, professor of the department of mechanical treatment of materials, Samara State Aerospace University named after S. P. Korolyov (National Research University), doctor of science, professor. E-mail: skuratov_issa@mail.ru. Area of research: structure-parametrical optimization of technological processes of mechanical treatment, abrasive machining.