

ФОКУСИРОВКА НЕПРЕРЫВНОГО И ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МИКРОСФЕРЫ

Стафеев С.С.¹, Козлова Е.С.^{1,2}, Козлов Д.А.², Морозов А.А.^{1,2}, Котляр В.В.¹

¹ Институт систем обработки изображений РАН,

² Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Аннотация

Рассмотрена фокусировка непрерывного и импульсного излучения с помощью полистироловой микросферы (микрошара) диаметром от 0,5 мкм до 5 мкм. Методом FDTD показано, что в обоих случаях при некоторых радиусах сферы возможно преодоление дифракционного предела. Моделирование с помощью программы FullWave показало, что при фокусировке микросферой с радиусом 2,5 мкм непрерывного лазерного излучения (плоская волна с длиной волны $\lambda = 633$ нм) наименьший диаметр фокуса, формируемого сферой, $\text{FWHM} = (0,55 \pm 0,08)\lambda$, а при фокусировке импульса длиной 1,25 фс ($\lambda = 633$ нм) – $\text{FWHM} = 0,54\lambda$. Численные результаты, полученные с помощью программы FullWave, согласуются с результатами, полученными с помощью программы MEEP ($\text{FWHM} = 0,60\lambda$), и находятся в согласии с экспериментальными данными ($\text{FWHM} = 0,60\lambda$), полученными методом сканирующей ближнепольной оптической микроскопии.

Ключевые слова: фотонная наноструя, FDTD-метод, сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия, фокусировка импульсного излучения.

Введение

То, что сфера с радиусом R фокусирует плоскую волну вблизи своей поверхности, следует из формулы для фокусного расстояния $f = R / (n - 1) \approx 2R$, где $n \approx 1,5$ – показатель преломления. В последнее время возрос интерес к фокусировке света микросферой. В [1] исследовалось прохождение плоской ТМ-поляризованной волны через двумерный диэлектрический цилиндр и впервые было введено понятие фотонной наноструи. Обобщение двумерного случая на трёхмерный приводится в статье [2]. В [2] было показано, что при фокусировке плоской линейно-поляризованной волны с длиной волны $\lambda = 400$ нм сферой с показателем преломления $n = 1,59$ и диаметром $2R = 1$ мкм диаметр перетяжки фотонной струи составит $\text{FWHM} = 0,325\lambda$ от длины волны. Первое прямое экспериментальное наблюдение фотонной наноструи было осуществлено в [3] методами конфокальной микроскопии. В [3] с помощью латексного ($n = 1,6$) шарика с $2R = 3$ мкм была получена фотонная струя с диаметром перетяжки $\text{FWHM} = 0,52\lambda$. Интерес представляет также экспериментальная работа [4], в которой с помощью высокоточного интерферометра изучалось влияние параметров входного излучения на фотонную струю. Было рассмотрено формирование фотонной наноструи при фокусировке плоской волны, сферической волны, бесселева пучка, а также азимутально-поляризованного пучка. В работе [5] экспериментально с помощью оптического микроскопа с $100\times$ объективом ($NA = 0,7$) исследовалась фотонная струя, формируемая с помощью диска из нитрида кремния ($n = 2,1$) высотой 400 нм и $2R = 9,5$ мкм. Такой диск позволяет получить фокусное пятно с наименьшим диаметром по полуспаду интенсивности $\text{FWHM} = 0,86\lambda$. Другая важная характеристика фотонной наноструи – её длина (глубина фокуса, DOF) – была исследована в статье [6].

Было показано, что применение градиентной микросферы, в которой показатель преломления меняется линейно от 1,43 до 1,59, позволяет увеличить длину фотонной наноструи до $\text{DOF} = 11,8\lambda$. Здесь нужно отметить, что длина определялась как расстояние от сферы до точки, где интенсивность падала в два раза по сравнению с освещающим сферу пучком. В [7] авторы поставили перед собой обратную задачу – добиться уменьшения размеров фотонной наноструи как по поперечным, так и по продольным координатам. Для этого микросфера (радиус $2,5\lambda$) освещалась гауссовым пучком, сфокусированным широкоапертурной линзой ($NA \approx 1$). Длина фотонной наноструи составила в данном случае $\text{DOF} = 0,88\lambda$.

Фотонные наноструи могут найти применение в рамановской спектроскопии [8], для оптических систем памяти [9], а также в нанолитографии. В [10] на основе микросфер была создана литографическая установка, в которой перемещение микросферы осуществлялось посредством оптического пинцета ($\lambda = 532$ нм, точность позиционирования сферы – 40 нм). Перемещённая в нужную точку и освещённая лазерным импульсом ($\lambda = 355$ нм) микросфера формировала позади себя фокусное пятно, используемое для прожигания канавки в подложке (удалось сформировать рисунок с размерами деталей 100 нм).

В данной работе было сделано следующее. Во-первых, численно с помощью метода FDTD было проведено сравнение результатов фокусировки микросферой, полученных разными программами – FullWave, MEEP и собственной реализацией метода BOR-FDTD. Во-вторых, было проведено сравнение фокусировки непрерывной волны и короткого лазерного импульса. В-третьих, экспериментально с помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа исследовалась фокусировка линейно поляризованного гауссова пучка $\lambda = 633$ нм

диэлектрической полистироловой ($n = 1,59$) микросферой с диаметром $2R = 5$ мкм.

1. Численное моделирование прохождения непрерывного излучения через микросферу

1.1. Метод BOR-FDTD, гауссов пучок

С помощью радиального метода разностного решения системы уравнений Максвелла в цилиндрических координатах (BOR-FDTD) было проведено численное моделирование прохождения линейно поляризованного (плоскость поляризации YZ) гауссова пучка с длиной волны $\lambda = 633$ нм с радиусом $\omega = 7\lambda$ через полистироловую микросферу ($n = 1,59$) с диаметром $2R = 5$ мкм со следующими параметрами: шаг сетки по пространству – $\lambda/50$, по времени – $\lambda/100c$, где c – скорость света в вакууме, на краях помещались поглощающие слои Беренгера толщиной λ . Геометрия рассматриваемой задачи приведена на рис. 1.

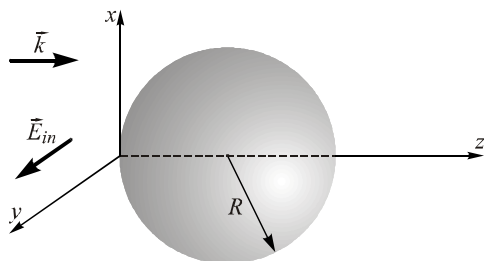


Рис. 1. Геометрия рассматриваемой задачи

Полученные в ходе моделирования результаты: размеры фокусного пятна составили вдоль оси x – $FWHM_x = (0,49 \pm 0,02)\lambda$, а вдоль оси y – $FWHM_y = (0,78 \pm 0,02)\lambda$. Максимум интенсивности располагался на расстоянии $0,134$ мкм от сферы. Данную точку в разных источниках называют или областью перетяжки фотонной наноструи [2], или областью фокуса [11], мы будем придерживаться второго наименования. Тогда под фокусным расстоянием будем подразумевать расстояние от поверхности микросферы до фокуса.

На рис. 2 показано усреднённое по времени распределение интенсивности в вычисляемой области в плоскости XZ , перпендикулярной к плоскости поляризации входного излучения (рис. 2а), и в плоскости YZ , параллельной плоскости поляризации входного излучения (рис. 2б). На рис. 3 показаны сечения интенсивности в фокусе вдоль оси x (рис. 3а) и y (рис. 3б), а на рис. 4 – распределение интенсивности вдоль оси z . Из рис. 4 можно оценить глубину фокусировки или длину фотонной наноструи по полуспаду интенсивности вдоль оси z : $DOF = (1,06 \pm 0,02)\lambda$.

1.2. Метод BOR-FDTD, плоская волна

С целью проверки правильности результатов моделирования, а также проверки влияния ширины входного пучка на размеры фокусного пятна было проведено сравнение результатов, полученных с помощью метода BOR-FDTD и с помощью коммерческой программы FullWave, на примере фокуси-

ровки плоской волны. В обоих случаях рассчитывалось только распределение интенсивности в плоскости, перпендикулярной к направлению поляризации входного излучения (плоскость XZ).

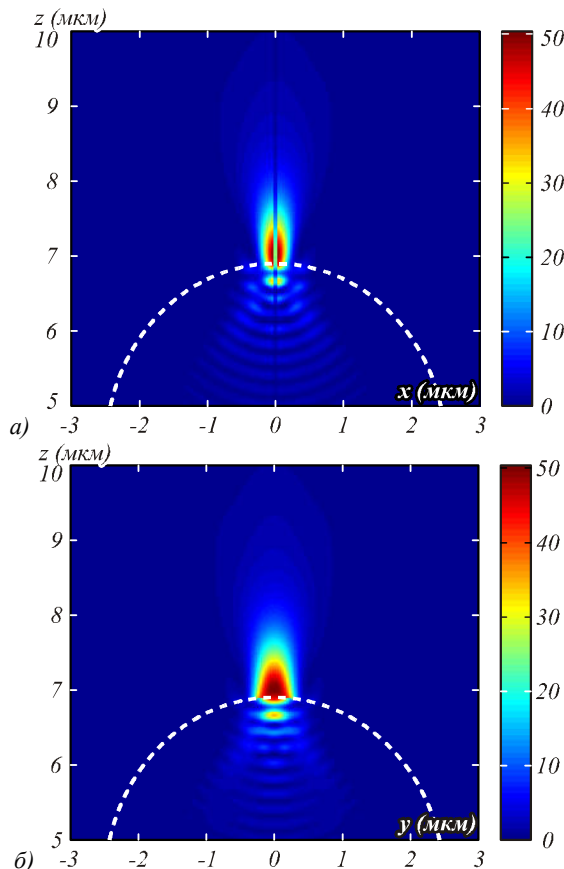


Рис. 2. Распределение интенсивности в вычисляемой области в плоскостях, перпендикулярной (а) и параллельной (б) к плоскости поляризации входного излучения

Моделирование методом BOR-FDTD проводилось с теми же параметрами, что и в предыдущем разделе. На рисунках ниже показаны результаты моделирования: на рис. 5 – распределение интенсивности в плоскости, перпендикулярной к направлению поляризации входного излучения (где наблюдается минимальный диаметр фокусного пятна), на рис. 6 – распределение интенсивности вдоль оси z , на рис. 7 – распределение интенсивности в фокусе в плоскости XZ вдоль оси x . В данном случае фокусное расстояние составило $0,108$ мкм (от поверхности сферы), а наименьший диаметр фокусного пятна $FWHM = (0,46 \pm 0,02)\lambda$; глубина фокуса – $DOF = (0,99 \pm 0,02)\lambda$.

1.3. Программа FullWave, плоская волна

При моделировании FDTD-методом, реализованным в программе FullWave, были выбраны следующие параметры: шаг сетки по пространству – $0,05$ мкм (или $\approx \lambda/13$), по времени – $0,025$ мкм/с, где c – скорость света в вакууме. Распределение интенсивности в плоскости, перпендикулярной к направлению поляризации входного излучения,

приведено на рис. 8. На рис. 9 приведено поперечное сечение интенсивности, а на рис. 10 – распределение интенсивности вдоль оси z . Наименьший диаметр фокусного пятна по полуспаду интенсивности составил $FWHM = (0,55 \pm 0,08)\lambda$, глубина фокуса $DOF = (0,68 \pm 0,08)\lambda$, а расстояние от сферы до максимума интенсивности – $0,05$ мкм.

Сетка отсчётов в программе FullWave была выбрана почти в 4 раза более редкой, чем для программы BOR-FDTD из-за того, что первая программа считает в десятки раз дольше, чем вторая.

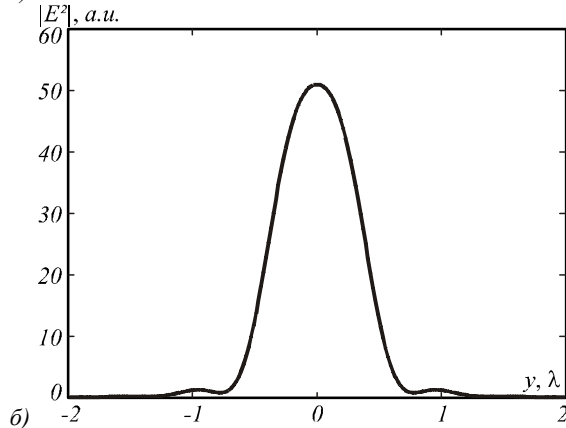
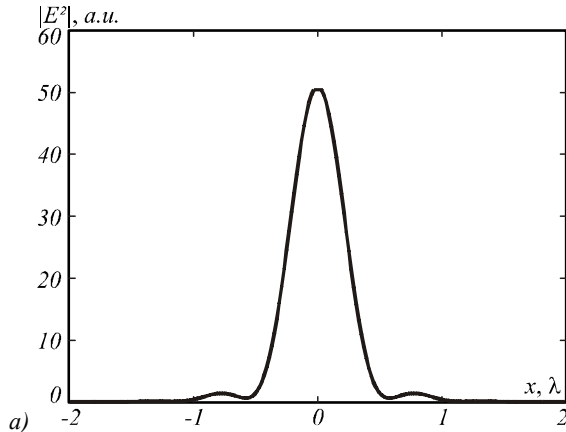


Рис. 3. Распределение интенсивности в фокусе вдоль осей x (а) и y (б)

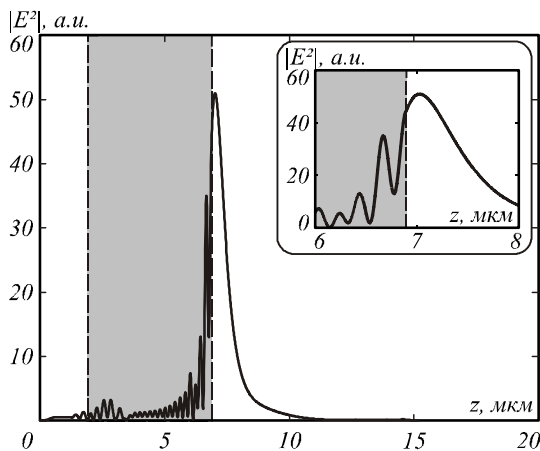


Рис. 4. Распределение интенсивности вдоль оси z (на вставке – увеличенный фрагмент вблизи поверхности сферы). Серым цветом показана область внутри микросферы

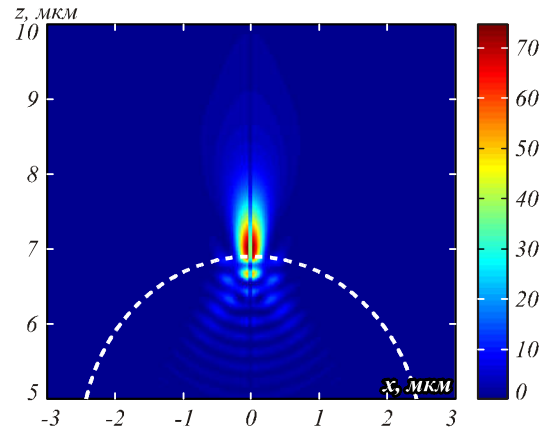


Рис. 5. Распределение интенсивности в вычисляемой области в плоскости XZ

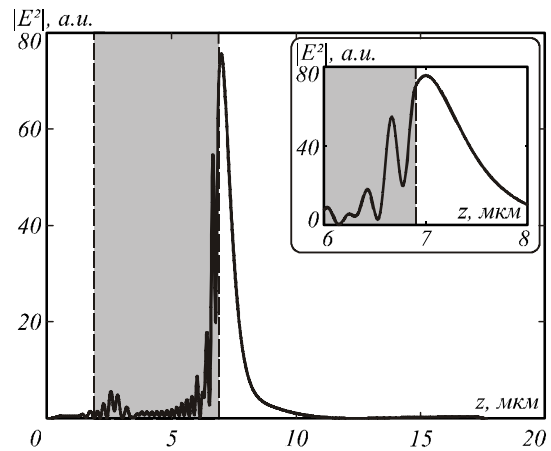


Рис. 6. Распределение интенсивности вдоль оси z (на вставке – увеличенный фрагмент вблизи поверхности сферы). Серым цветом показана область внутри микросферы

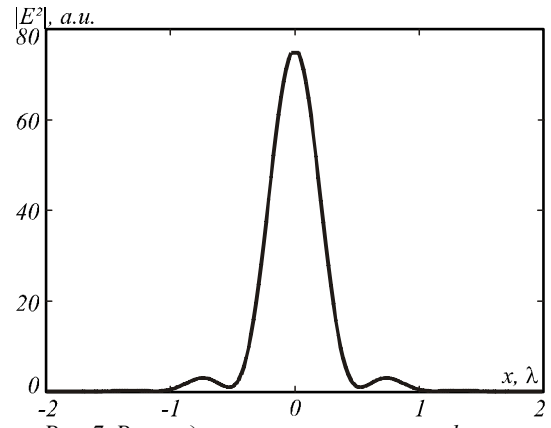


Рис. 7. Распределение интенсивности в фокусе вдоль оси x микросферы

1.4. Программа MEEP, гауссов пучок

С помощью программы MEEP (Массачусетский технологический институт) была рассмотрена фокусировка гауссова пучка шириной $\omega = 12\lambda$ сферами с показателем преломления $n = 1,59$, радиус которых варьировался от $0,5\lambda$ до 4λ . Размер вычисляемой области составил $10 \times 10 \times 10$ длин волн, а шаг сетки по пространству – $\lambda/20$. При расчёте интенсивности ус-

реднение проводилось по 20 периодам. На рис. 11 показана зависимость расстояния от центра сферы до точки максимальной интенсивности вне сферы. Графики зависимости диаметров фокусного пятна от радиуса сферы приведены на рис. 12.

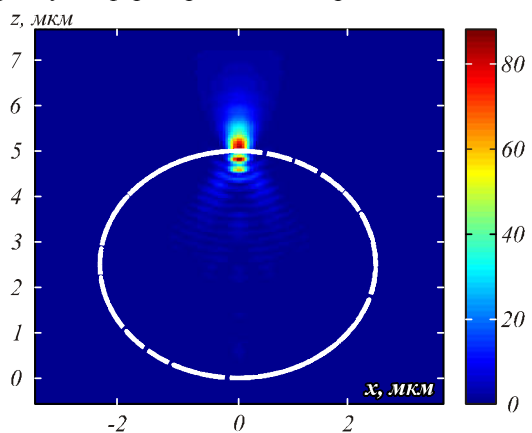


Рис. 8. Распределение интенсивности в вычисляемой области в плоскости XZ

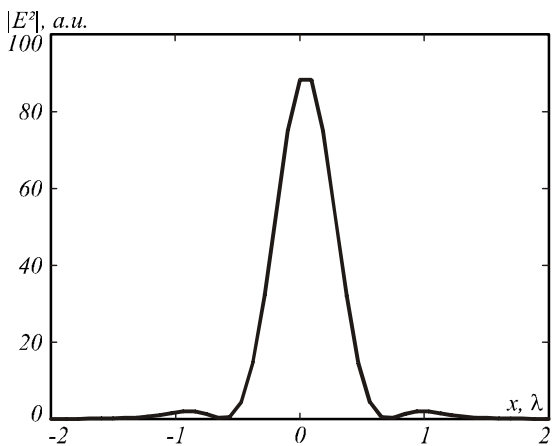


Рис. 9. Распределение интенсивности в фокусе вдоль оси x

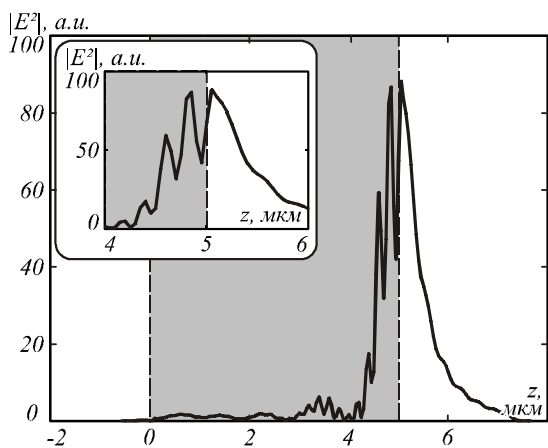


Рис. 10. Распределение интенсивности вдоль оси z (на вставке – увеличенный фрагмент вблизи поверхности сферы). Серым цветом показана область внутри сферы

Из рис. 12 видно, что если радиус сферы равен длине волны фокусируемого света $R = \lambda$, то диаметр фокусного пятна достигает своего наименьшего

значения – $FWHM = 0,3\lambda$. Для сферы с радиусом $R = 2,5 \text{ мкм} = 3,95\lambda$, которая рассматривалась в предыдущих разделах, получен следующий результат: $FWHM = (0,60 \pm 0,05)\lambda$.

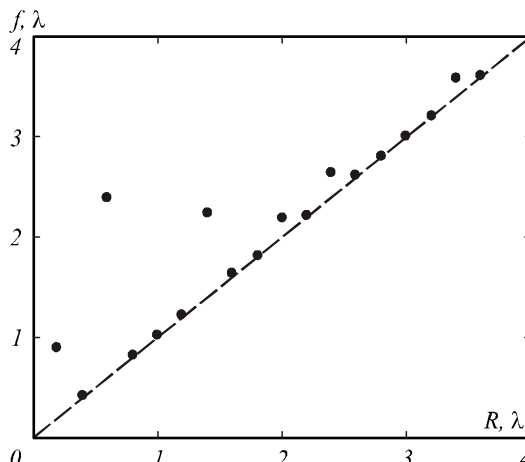


Рис. 11. Зависимость расстояния от центра сферы до точки максимальной интенсивности вне сферы

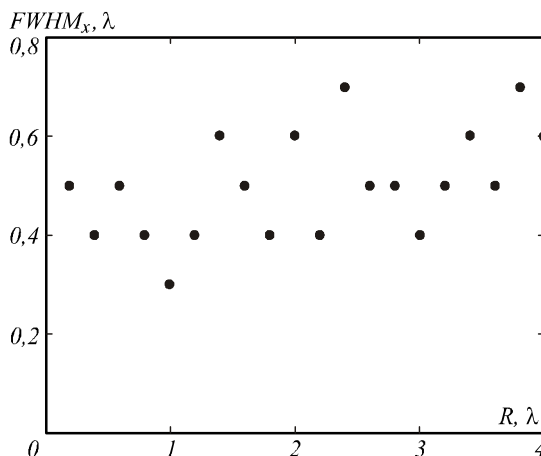


Рис. 12. Зависимости диаметров фокусного пятна FWHM вдоль оси x от радиуса сферы

2. Численное моделирование прохождения импульсного излучения через микросферу

Моделировалась фокусировка импульсов линейно поляризованной плоской волны длительностью 1,25 фс по полуспаду интенсивности ($\lambda = 633 \text{ нм}$) полистироловой сферой ($n = 1,59$) с диаметром $2R = 5 \text{ мкм}$. Численное моделирование фокусировки сферой импульсного лазерного излучения проводилось в программе FullWave при тех же параметрах, что и непрерывное: шаг сетки по пространству – 0,05 мкм (или $\approx \lambda/13$), по времени – 0,025 мкм/с (или $\approx \lambda/26$), где c – скорость света в вакууме.

Рассматриваемый нами импульс длительностью 1,25 фс имеет форму, показанную на рис. 13. В момент фокусировки микросферой $t = 30 \text{ фс}$ мгновенное распределение интенсивности в плоскости, перпендикулярной плоскости поляризации входного излучения, примет вид, показанный на рис. 14.

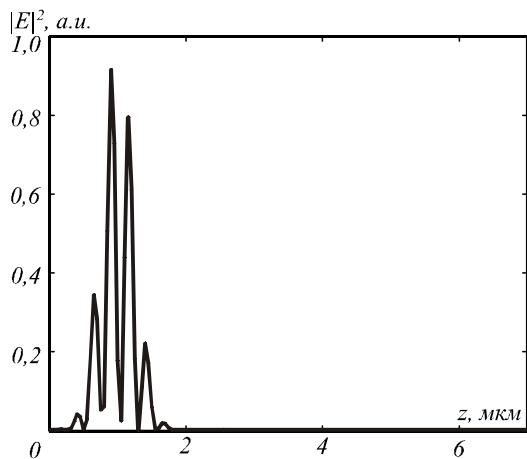


Рис. 13. Мгновенное распределение интенсивности входящего импульса длительностью 1,25 фс вдоль оси z

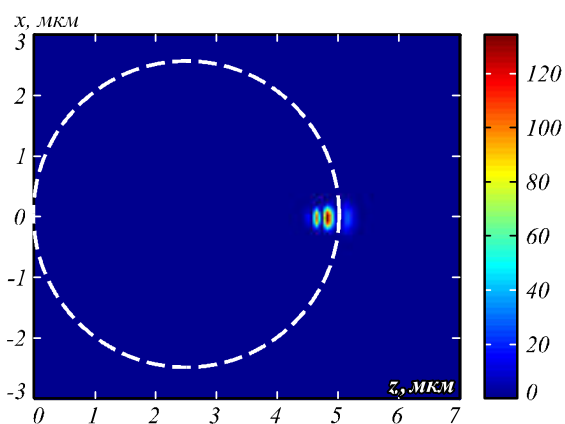


Рис. 14. Мгновенное распределение интенсивности в плоскости YZ ($x = 0$ мкм) для импульса длительностью 1,25 фс в момент фокусировки $t = 30$ фс

Сечение мгновенного распределения интенсивности вдоль оси z в момент фокусировки показано на рис. 15, а на рис. 16 – распределение интенсивности в фокусе вдоль оси x. Максимальная интенсивность в фокусе в произвольных единицах – 134,22 (это почти в 100 раз больше, чем максимальная интенсивность падающего импульса), а фокусное расстояние составило 0,05 мкм. Наименьший диаметр фокусного пятна по полуспаду интенсивности $\text{FWHM} = (0,55 \pm 0,08) \lambda$.

3. Эксперимент

Эксперимент проводился с помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа Интегра Спектра (фирмы NT-MDT), оптическая схема которого приведена на рис. 17. В данной схеме линейно поляризованный свет от лазера ЛГН-215 с длиной волны $\lambda = 633$ нм проходил через полистироловую сферу, формируя фотонную нанострую, поперечное распределение интенсивности в которой затем измерялось с помощью металлического пирамидального кантнлевера с размером отверстия 100 нм на разных расстояниях от поверхности сферы. Фокус располагался на расстоянии 100 нм от поверхности сферы.

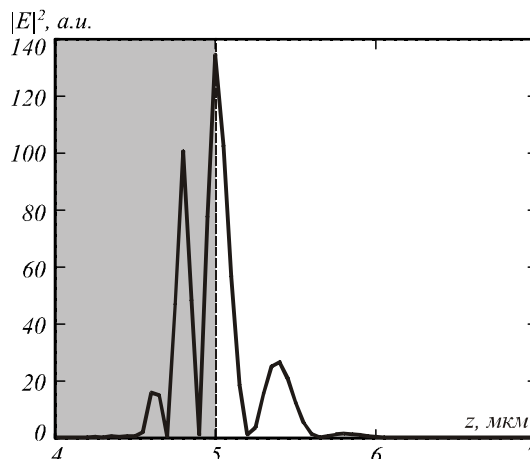


Рис. 15. Мгновенное распределение интенсивности вдоль оси z для импульса длительностью 1,25 фс в момент фокусировки $t = 30$ фс. Пунктиром отмечена граница сферы

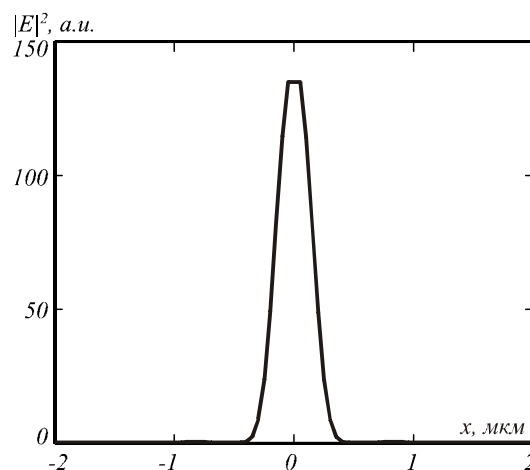


Рис. 16. Мгновенное распределение интенсивности в фокусе вдоль оси x для импульса длительностью 1,25 фс в момент фокусировки $t = 30$ фс

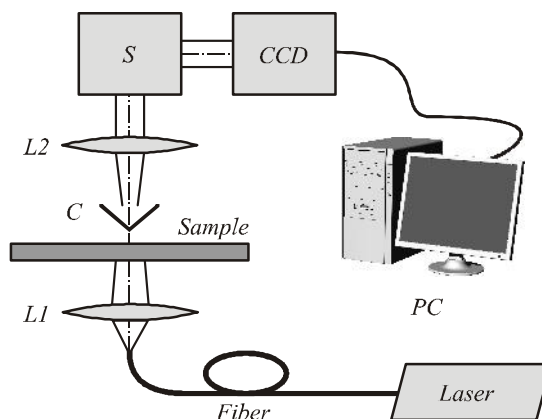


Рис. 17. Оптическая схема эксперимента: L1, L2 – линзы, Sample – исследуемый образец на подложке, C – кантнлевек с отверстием, S – спектрометр, CCD – ПЗС-камера, PC – компьютер

На рис. 18 показано распределение интенсивности, полученное в плоскости фокуса. Фокусное пятно имеет эллиптическую форму с размерами вдоль оси x – $\text{FWHM}_x = (0,73 \pm 0,08) \lambda$, а вдоль оси y –

$FWHM_y = (0,60 \pm 0,08)\lambda$. На рис. 19 показаны сечения интенсивности вдоль осей x и y рис. 18.

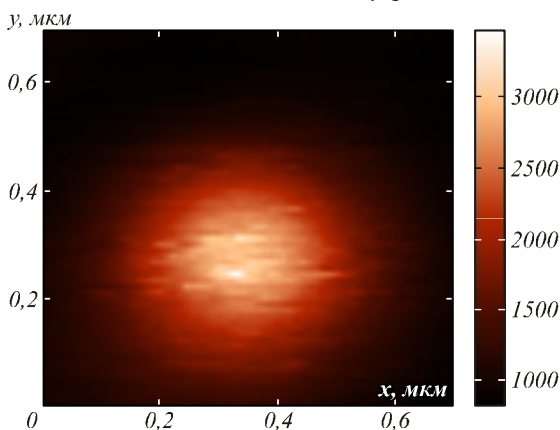


Рис. 18. Распределение интенсивности в фокусе, измеренное экспериментально с помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа

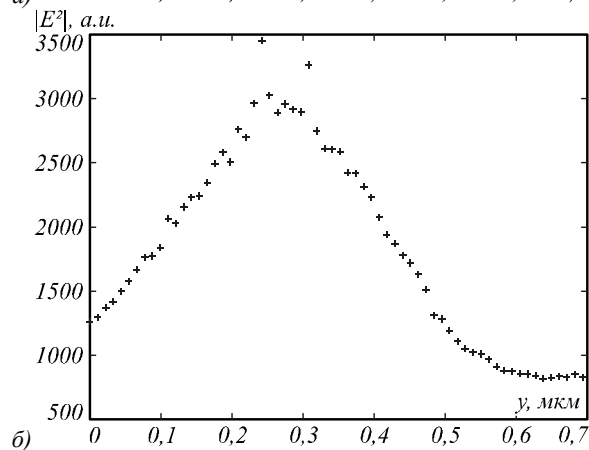
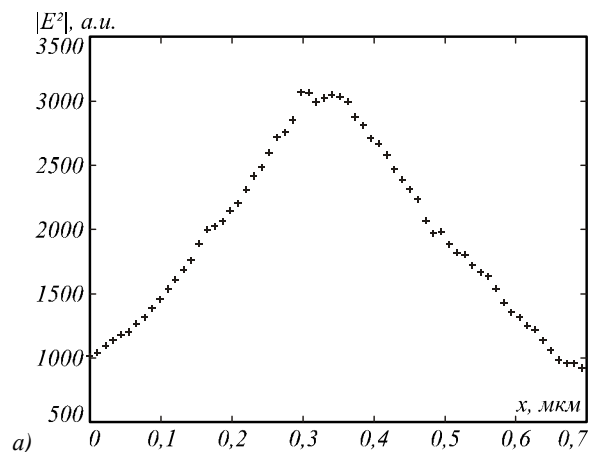


Рис. 19. Экспериментальные сечения интенсивности в фокусе (рис. 18) вдоль осей x (а), y (б)

Распределение интенсивности на рис. 18 и 19 получено при небольшом числе отсчётов с разрешением, равным размеру отверстия кантилевера – 100 нм. Ошибка при измерении диаметра фокусного пятна равна $0,08\lambda$.

В табл. 1 для сравнения приведены все данные, полученные в статье.

Таблица 1. Величина меньшего диаметра фокусного пятна, сформированного вблизи поверхности сферы с радиусом $3,95\lambda$ ($n = 1,59$), полученная разными методами

Способ получения величины диаметра	FWHM, λ
BOR-FDTD, гауссов пучок	$0,49 \pm 0,02$
BOR-FDTD, плоская волна	$0,46 \pm 0,02$
FullWave, плоская волна	$0,55 \pm 0,08$
FullWave, плоская волна, импульс	$0,54 \pm 0,08$
МЕЕР, широкий гауссов пучок	$0,60 \pm 0,05$
Эксперимент	$0,60 \pm 0,08$

Заключение

В данной статье FDTD-методом нами исследовалась фокусировка непрерывного и импульсного излучения с помощью полистироловой ($n = 1,59$) микро-сферы диаметрами до $2R = 5$ мкм. Было показано, что при некоторых значениях радиуса сферы (рис. 12) возможно преодоление дифракционного предела. Минимальное возможное значение диаметра фокуса достигается при радиусе $R = \lambda$ и равно $FWHM = 0,3\lambda$. Моделирование с помощью программы FullWave показало, что при фокусировке непрерывного лазерного излучения (плоская волна с длиной волны 633 нм) меньший диаметр фокуса для сферы с радиусом $R = 2,5$ мкм $= 3,95\lambda$ равен $FWHM = (0,55 \pm 0,08)\lambda$, а при фокусировке импульсного излучения с длительностью 1,25 фс – $FWHM = (0,54 \pm 0,08)\lambda$.

При расчёте с помощью программы МЕЕР было получено, что меньший размер фокусного пятна для сферы с тем же радиусом равен $FWHM = (0,60 \pm 0,05)\lambda$. Это значение равно значению диаметра фокусного пятна, измеренного с помощью оптического сканирующего микроскопа ближнего поля $FWHM = (0,60 \pm 0,08)\lambda$.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, (соглашение № 14.В37.21.2029 «Исследование методов получения, параметров и характеристик дифракционных и голограммных элементов для оптических систем различного назначения» и соглашение №8027 «Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования устройств нанопластики для субволновой фокусировки лазерного излучения и плазмонных волн»), грантов Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-4128.2012.9) и грантов РФФИ (12-07-00269, 12-07-31115, 13-07-97008).

Литература (References)

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 // Opt. Exp. – 2004. – V. 12. – P. 1214.
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. Exp. – 2005. – V. 13. – P. 526.

3. **Ferrand, P.** Direct imaging of photonic nanojets / P. Ferrand, J. Wenger, A. Devilez, M. Pianta, B. Stout, N. Bonod, E. Popov, H. Rigneault // *Opt. Exp.* – 2008. – V. 16. – P. 6930.
4. **Kim, M.-S.** Engineering photonic nanojets / M.-S. Kim, T. Scharf, S. Mühlig, C. Rockstuhl, H.P. Herzig // *Optics Express.* – 2011. – V. 19. – P. 10206.
5. **McCloskey, D.** Low divergence photonic nanojets from Si₃N₄ microdisks / D. McCloskey, J.J. Wang, J.F. Donegan // *Optics Express.* – 2012. – Vol. 20. – P. 128.
6. **Kong, S.-C.** Quasi one-dimensional light beam generated by a graded-index microsphere/ S.-C. Kong, A. Taflove, V. Backman // *Optics Express.* – 2009. – V. 17. – P. 3722.
7. **Devilez, A.** Three-dimensional subwavelength confinement of light with dielectric microspheres / A. Devilez, N. Bonod, J. Wenger, D. Gérard, B.S., H. Rigneault, E. Popov // *Optics Express.* – 2009. – V. 17. – P. 2089.
8. **Yi, K.J.** Enhanced Raman scattering by self-assembled silica spherical microparticles / K.J. Yi, H. Wang, Y.F. Lu, Z.Y. Yang // *J. Appl. Phys.* – 2007. – V. 101. – P. 063528.
9. **Kong, S.-C.** Photonic nanojet-enabled optical data storage / S.-C. Kong, A. Sahakian, A. Taflove, V. Backman // *Opt. Exp.* – 2008. – V. 16. – P. 13713.
10. **McLeod, E.** Subwavelength direct-write nanopatterning using optically trapped microspheres / E. McLeod, C.B. Arnold // *Nature Nanotechnology.* – 2008. – V. 3. – P. 413.
11. **Wang, T.** Subwavelength focusing by a microsphere array / T. Wang, C. Kuang, X. Hao, X. Liu // *J. Opt.* – 2011. – V. 13. – P. 035702.

FOCUSING OF CONTINUOUS AND PULSED LASER BEAMS BY MICROSPHERE

S.S. Stafeev¹, E.S. Kozlova^{1,2}, D.A. Kozlov², A.A. Morozov^{1,2}, V.V. Kotlyar¹

¹ *Image Processing Systems Institute of the RAS,*

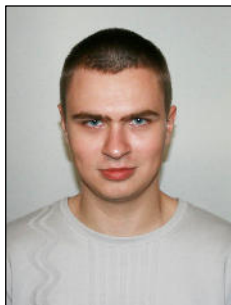
² *S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University)*

Abstract

We have considered the focusing of continuous and pulsed beams using polystyrene ($n=1.59$) microsphere with diameter of 5 μm . It was shown that it is possible to overcome the diffraction limit in both cases. Simulation using commercial software FullWave showed that the smallest diameter of the focus equals to $\text{FWHM}=(0.55\pm 0.08)\lambda$ in the case of focusing of the CW beam (a plane wave with a wavelength of 633 μm), and equals to $\text{FWHM}=(0.54\pm 0.08)\lambda$ in the case of focusing of the pulsed beam duration of 1.25 fs. Numerical results obtained using FullWave consistent with the results obtained using the MEEP and using own implementation of BOR-FDTD method, and are also in agreement with the experimental data.

Key words: photonic nanojet, FDTD-method, scanning near-field optical microscopy.

Сведения об авторах



Стафеев Сергей Сергеевич, 1985 года рождения, в 2009 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». Научный сотрудник лаборатории лазерных измерений Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН). Область научных интересов: дифракционная оптика, разностное решение уравнений Максвелла, оптика ближнего поля.

E-mail: sergey.stafeev@gmail.com.

Sergey Sergeevich Stafeev (b. 1985) received master's degree in applied mathematics and physics in Samara State Aerospace University (2009). He is research associate of Laser Measurements Laboratory at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). Scientific interests: diffractive optics, FDTD-method, near-field optics.

Козлова Елена Сергеевна, магистр прикладной математики и информатики, аспирант кафедры технической кибернетики Самарского государственного аэрокосмического университета, стажёр-исследователь ЛЛИ ИСОИ РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, численные методы.

E-mail: kozlova.elena.s@gmail.com.

Elena Sergeevna Kozlova, Master of Mathematics and Computer Science. Currently studies at Samara State Aerospace University. She is trainee researcher of Laser Measurements Laboratory at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). Research interests are diffractive optics and numerical methods.

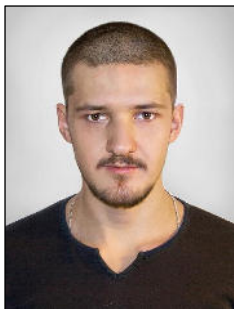


Козлов Дмитрий Андреевич, 1992 года рождения, студент третьего курса специальности «Прикладные математика и физика» Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: нанофотоника.

E-mail: dkz.rus@gmail.com.



Dmitry Andreevich Kozlov (b. 1992) third year student in applied mathematics and physics in Samara State Aerospace University. Scientific interests: nanophotonics.



Морозов Андрей Андреевич, 1987 года рождения, в 2008 получил степень бакалавра в СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». В 2010 получил степень магистра в СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». В списке научных работ А.А. Морозова 5 статей. Область научных интересов: дифракционная оптика.

E-mail: ragefalcon@mail.ru.

Andrey Andreevich Morozov (b. 1987) He received his bachelor of applied mathematics and physics (2008) in SSAU. He received his master of applied mathematics and physics (2010) in SSAU. He is co-author of 5 scientific papers. His research interests are currently diffractive optics.

Котляр Виктор Викторович, 1957 года рождения, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией лазерных измерений ИСОИ РАН и, по совместительству, профессор кафедры технической кибернетики Самарского государственного аэрокосмического университета (СГАУ). В 1979 году окончил физический факультет Куйбышевского государственного университета, в 1988 году защитил кандидатскую диссертацию в Саратовском государственном университете, а в 1992 году – докторскую диссертацию в Центральном конструкторском бюро Уникального приборостроения РАН (г. Москва). Область научных интересов: нанофотоника, дифракционная компьютерная оптика. Публикации: 300 научных трудов, 5 монографий, 7 авторских свидетельств.

E-mail: kotlyar@smr.ru.



Victor Victorovich Kotlyar is a head of Laboratory at the Image Processing Systems Institute (Samara) of the Russian Academy of Sciences and professor of Computer Science Department at Samara State Aerospace University. He received his MS, PhD and DrSc degrees in physics and mathematics from Samara State University (1979), Saratov State University (1988) and Moscow Central Design Institute of Unique Instrumentation, the Russian Academy of Sciences (1992). He is SPIE and OSA member. He is co-author of 300 scientific papers, 5 books and 7 inventions. His current interests are diffractive optics, gradient optics, nanophotonics, and optical vortices.

Поступила в редакцию 14 ноября 2012 г.