

ОСТРАЯ ФОКУСИРОВКА ЛАЗЕРНОГО СВЕТА ПУТЕМ РЕЗОНАНСНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ В ОДНОРОДНОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ МИКРОЦИЛИНДРЕ

© 2015 Д.А. Козлов¹, В.В. Котляр^{1,2}

¹ Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара

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

Поступила в редакцию 05.02.2015

В данной статье показано, что из аналитического решения задачи дифракции ТЕ-поляризованного монохроматического непараксиального гауссова пучка на однородном диэлектрическом цилиндре при радиусах цилиндра, сравнимых с длиной волны света, можно получить фокусное пятно вне цилиндра, поперечные размеры которого в 2 раза меньше дифракционного предела. Было получено решение, при котором радиус диэлектрического цилиндра больше длины волны всего в два раза, но интенсивность в точке максимальной интенсивности света в 48 раз больше максимальной интенсивности падающего гауссова пучка.

Ключевые слова: фотонные наноструктуры, субволновая фокусировка.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время внимание уделяется изучению субволновой фокусировки лазерного света на микрочастицах, в том числе на микросферах и микроцилиндрах, радиусы которых сравнимы с длиной волны падающего света [1-5]. Так в [1-4] численно исследовалась фокусировка многослойными микросферами [1], сфероидальными микросферами [2], двухслойными микросферами [3, 4]. Минимальный диаметр фокусного пятна по полуспаду интенсивности среди рассмотренных работ $\text{FWHM}=0,4\lambda$, где λ – длина волны [2], а максимальная протяженность пятна по полуспаду вдоль оптической оси (глубина фокуса) $\text{DOF}=20\lambda$ [3, 4]. В [5,6] рассматривалась фокусировка микроцилиндром: эллиптическим [5] и многослойным [6]. Минимальная ширина по полуспаду $\text{FWHM}=0,46\lambda$ была получена в [6]. В [7,8] моделировалась резонансное возбуждение моды шепчущей галереи в диэлектрической микросфере. В [7] с помощью диэлектрической микросферы с нанометровым металлическим шариком получено фокусное пятно с шириной $\text{FWHM}=0,25\lambda$, для диэлектрической микросферы было получено при помощи резонансного возбуждения фокусное пятно с шириной $\text{FWHM}=0,4\lambda$ [8].

В данной статье рассматривается фокусировка ТЕ-поляризованного лазерного света микроцилиндром. Для 19-ой моды (мода шепчущей галереи) получено фокусное пятно с шириной $\text{FWHM}=0,22\lambda$ вне цилиндра. Это меньше, чем во всех перечисленных работах.

Козлов Дмитрий Андреевич, техник лаборатории лазерных измерений. E-mail: kozlov.dmitry.a@gmail.com

Котляр Виктор Викторович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры технической кибернетики СГАУ, заведующий лабораторией лазерных измерений ИСОИ РАН. E-Mail: kotlyar@smr.ru

РЕЗОНАНСНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ

Из аналитического решения задачи дифракции гауссова ТЕ-поляризованного пучка на однородном диэлектрическом цилиндре могут быть найдены решения, соответствующие резонансным возбуждениям – то есть случаям, когда в цилиндре происходит усиление одной из мод Бесселя. Поле внутри цилиндра выражается в виде ряда [9]:

$$E_{in}(r, \phi) = \sum_j i^j b_j C_j J_j(knr) e^{ij\phi}, \quad (1)$$

где k – волновое число в вакууме; n – показатель преломления света в среде; (r, ϕ) – полярные координаты в плоскости сечения цилиндра; b_j – коэффициент разложения, зависящий от геометрии, а C_j – коэффициент, зависящий от конфигурации падающего поля. Коэффициенты определяются формулами

$$C_j = \frac{\omega_0 \sqrt{\pi}}{\lambda} \int_j \exp\left(-\frac{k^2 q^2 \omega_0^2}{4} - ik(px_0 + qy_0) - ij \arcsin q\right) dq, \quad (2)$$

$$b_j = \frac{J_j(kR)H_j^{(1)'}(kR) - J_j'(kR)H_j^{(1)}(kR)}{J_j(nkR)H_j^{(1)'}(nkR) - nJ_j'(nkR)H_j^{(1)}(nkR)}, \quad (3)$$

где, соответственно, ω_0 – радиус перетяжки гауссова пучка, (x_0, y_0) – положение перетяжки в декартовых координатах, R – радиус цилиндра, $p = \sqrt{1 - q^2}$. Можно отметить, что: во-первых, при значениях знаменателя b_j близких к нулю можно получить усиление в (1) той или иной Бесселевой моды, а во-вторых, эффект зависит только от длины волны падающего света, так как b_j не зависит от положения и радиуса перетяжки.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Резонанс был исследован на диэлектрическом цилиндре с показателем $n = 1,59$. Был подобран радиус цилиндра, при котором возникает увеличение коэффициента при 19 моде Бесселя. Цилиндра с радиусом $R = 2,175 \lambda$ облучался гауссовым пучком с радиусом $\omega_0 = 19 \lambda$, перетяжка которого располагается на расстоянии 3λ от оси цилиндра. Для анализа было получено по точкам распределение на рис. 1. Значения напряженности для распределения были посчитаны по первым 100 слагаемым (первые 50 для положительных индексов и 50 для отрицательных в (1)) с шагом $1/20 \lambda$. Интенсивность рассчитывалась как квадрат модуля напряженности. В рассматриваемом случае свет фокусируется в пятно с $\text{DOF} = 0,25 \lambda$ и $\text{FWHM} = 0,2 \lambda$, что более чем в два раза меньше дифракционного предела в воздухе для двумерного случая ($\text{FWHM} = 0,44 \lambda$). Интенсивность света в точке максимума в $\eta = 48,9$ раз превосходит интенсивность падающего гауссова пучка в перетяжке.

Полученная картина интенсивности неустойчива, и при малом отклонении радиуса от установленного значения максимумы на границе цилиндра пропадают. На рис. 2 представлена зависимость отношения значения интенсивности в точке максимума к интенсивности гауссова пучка в перетяжке η . На рисунке пикам соответствуют случаи резонансного возбуждения бесселевых мод. Указанному радиусу $2,175 \lambda$ соответствует 19 мода, а первому максимуму на графике — 9 мода ($R = 1,05 \lambda$). Ширина максимума для 19 моды составляет $0,003 \lambda$.

Кривая для глубины фокуса DOF представлена на рис. 3. Следует отметить, что минимумам на кривой соответствуют максимумы на кривой рис. 2, то есть резонансное возбуждение всегда сопровождается уменьшением размеров фокусного пятна. FWHM при резонансном возбуждении уменьшается до $0,2 \lambda$.

При фокусировке цилиндром с $R = 2,2 \lambda$ образуется пятно с $\text{DOF} = 0,8 \lambda$ и $\text{FWHM} = 0,4 \lambda$.

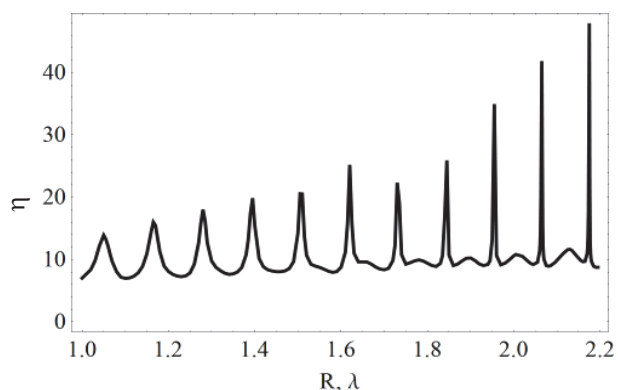


Рис. 2. Отношение интенсивностей η в точке максимума и перетяжке гауссова пучка для различных радиусов цилиндра

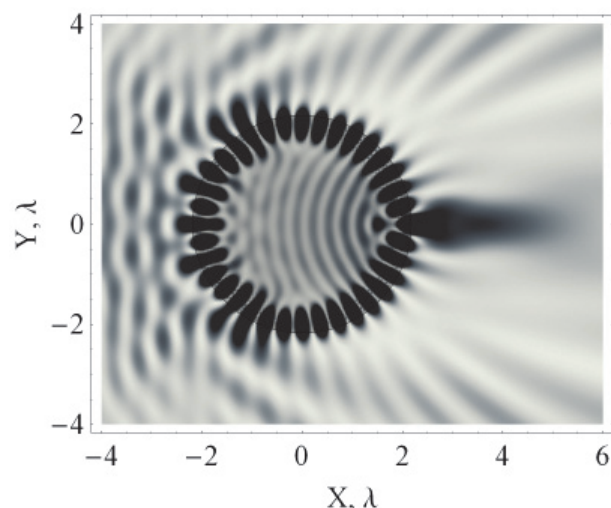


Рис. 1. Негательное распределение интенсивности в сечении цилиндра для случая резонанса

Интенсивность в максимуме превосходит интенсивность в перетяжке в 8,8 раз. Отношение значений интегралов интенсивности по области фокусного пятна (энергетических эффективностей) в резонансном и нерезонансном случае можно оценить отношением произведения DOF , FWHM и η . Для $R = 2,175 \lambda$ и $R = 2,2 \lambda$ отношение отказывается приблизительно равным 0,86. Это соответствует потере 14 процентов в энергетической эффективности фокусировки, однако в то же время это указывает на лучшую локализацию энергии при резонансном возбуждении — при уменьшении области фокуса в 6,4 раз эффективность падает всего на 14 процентов. Не исключается возможность сохранения энергетической эффективности, однако это должно означать, что интенсивность в максимуме выше, чем указанное выше, так как точку максимума не удалось точно определить из-за дискретизации распределений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе численно, на основе аналитического решения уравнений Максвелла, показано, что из решения задачи дифракции монохроматического

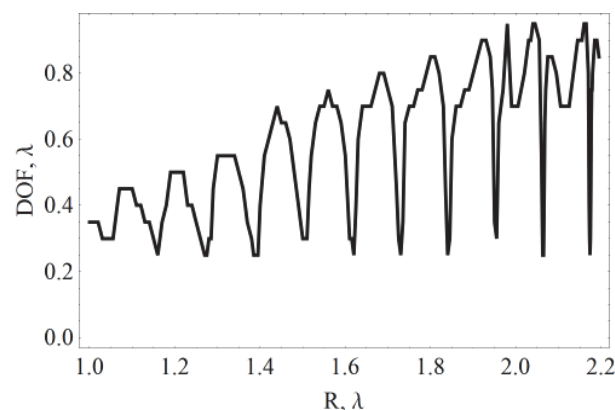


Рис. 3. Зависимость глубины фокуса от радиуса цилиндра

непараксиального гауссова пучка на однородном диэлектрическом цилиндре при радиусах цилиндра, сравнимых с длиной волны света, можно получить фокусное пятно вне цилиндра, размер которого в два раза меньше дифракционного предела. Для рассмотренного решения можно отметить, что в разложении по функциям Бесселя напряженности поля, коэффициент при 19 моде превосходит все остальные. На распределениях это выражается в периодических максимумах вблизи границ цилиндра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Photonic nanojet calculations in layered radially in homogeneous micrometer-sized spherical particles / Y.E. Geints, A.A. Zemlyanov, E.K. Panina // J. Opt. Soc. Am. B. 2011. Vol. 28, № 8. P. 1825-1830.
2. Photonic jet generated by spheroidal particle with Gaussian-beam illumination / L. Han, Y. Han, G. Gouesbet, J. Wang, G. Grehan // J. Opt. Soc. Am. B. 2014. Vol. 31, № 7. P.1476-1483.
3. Bessel-like photoic nanojets from core-shell sub-wavelength spheres / D. Grojo, N. Sandeau, L. Boarino, C. Constantinescu, N. De Leo, M. Laus, K. Sparnacci // Opt. Lett. 2014. Vol. 39, № 13, P. 3989-3992.
4. Ultralong photonic nanojet formed by a two-layer dielectric microsphere / Y. Shen, L.V. Wang, J. Shen // Opt. Lett. 2014. Vol. 39, № 14. P. 4120-4123.
5. Liu C., Chang L. Photonic nanojet modulation by elliptical microcylinders // Optik. 2014. Vol. 125, №15. P. 4043-4046.
6. Annular focusing lens based on transformation optics / B.B. Xu, W.X. Jiang, G.X. Yu, T.J. Cui // J. Opt. Soc. Am. A. 2014. Vol. 31, № 5. P. 1135-1140.
7. Subdiffraction optical resolution of a gold nanosphere located within the nanojet of a Mie-resonant dielectric microsphere / A. Heifetz, J.J. Simpson, S.C. Kong, A. Taflov V. Backman // Opt. Exp. 2007. Vol. 15, № 25. P.17334-17342.
8. Photonic jets from resonantly excited transparent dielectric microspheres/ Y.E. Geints, A.A. Zemlyanov, E.K. Panina // J. Opt. Soc. Am. B. 2012. Vol. 29, №4. P.758-762.
9. Налимов А.Г. Итеративное решение двумерной задачи дифракции и расчёт силы действия света на микроцилиндр : дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Самара, 2006. С. 139.

SHARP LASER FOCUSING BY RESONANT EXITATION IN HOMOGENIOUS MICROCYLINDER

© 2015 D.A. Kozlov¹, V.V. Kotlyar^{1,2}

¹ Image Processing Systems Institute of the RAS, Samara

² Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

In this paper it is shown that analytical solution for diffraction problem of TE-polarized monochromatic Gaussian beam on homogeneous dielectric cylinder, when the radius of the cylinder have the same order of magnitude as the incident wavelength, produces focal spot outside the cylinder with transverse dimensions half the size of the diffraction limit. A solution was obtained in the case when radius of dielectric cylinder is only two times more than wavelength but maximum intensity in focal spot is 48 times as much as maximum intensity of incident Gaussian beam.

Key words: photonic nanojets, subwavelength focusing.

Dmitry Kozlov, Technician of Laser Measurement Laboratory.
E-mail: kozlov.dmitry.a@gmail.com

Victor Kotlyar, Doctor of Physics and Mathematics, Professor
at the Technical Cybernetics Department of SSAU, Head of
Laser Measurement Laboratory at the IPSI.
E-mail: kotlyar@smr.ru