

ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА, ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

РЕЗОНАНСНАЯ ОСТРАЯ ФОКУСИРОВКА СВЕТА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЦИЛИНДРОМ С КВАДРАТНЫМ СЕЧЕНИЕМ И КУБОМ

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

¹ Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия,

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

Аннотация

В работе численно продемонстрирована возможность резонансного возбуждения мод, аналогичных модам шепчущей галереи, в однородном диэлектрическом цилиндре с квадратным сечением при освещении плоской волной, падающей перпендикулярно оси цилиндра. Показано, что при резонансной фокусировке монохроматического света цилиндром с квадратным сечением наблюдается уменьшение поперечных размеров области максимальной интенсивности по сравнению с нерезонансной фокусировкой. Аналогичный результат был получен для куба на подложке из диэлектрика: показано, что можно добиться уменьшения размеров области максимальной интенсивности путём изменения размера куба.

Ключевые слова: резонанс, фокусировка света, FDTD-метод.

Цитирование: Козлов, Д.А. Резонансная острая фокусировка света диэлектрическим цилиндром с квадратным сечением и кубом / Д.А. Козлов, Е.С. Козлова, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 431-438. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-431-438.

Введение

Моды шепчущей галереи (ШГ), называемые иногда геометрическими резонансами или WGM-резонансами (*Whispering Gallery Modes Resonances*), находят применение в производстве чувствительных сенсоров [1–3], измерительных приборов [4], частотных фильтров и других оптических устройств [5], для которых основную роль играет чувствительность мод шепчущей галереи к малым отклонениям от резонансной длины волны. Моды ШГ характеризуются экстраординарными значениями добротности (Q -фактор порядка 10^9 удаётся получить экспериментально [6]) и меньшим размером светового пятна, в которое фокусируется монохроматическое излучение при прохождении через цилиндр или сферу в условиях резонанса [7, 8]. В большинстве работ, как правило, рассматриваются моды ШГ в микрорезонаторах, позволяющих достигать высокие значения добротности: сферических [6, 9], тороидальных [10] и других. Эффекту уменьшения поперечных размеров области максимальной интенсивности на теневой стороне частиц уделено намного меньше внимания, однако он позволяет значительно увеличить разрешение пространственных оптических сенсоров за счёт уменьшения области фокусировки без усложнения технологии их производства.

Сложность представляет задача определения условий возбуждения мод ШГ. Даже для известной задачи дифракции на цилиндре значения параметров определяются только численно [11]. Поиск условий возбуждения мод ШГ в частицах с произвольной геометрией вызывает необходимость прибегать к специальным численным методам.

В данной работе были исследованы резонансные моды цилиндра с квадратным сечением при помощи FDTD-метода (*Finite Difference Time Domain method*), реализованного в МБЕР, и пакета *Harminv*. В отличие от кругового цилиндра, цилиндр с квадратным сечением более прост в изготовлении и также фокусирует свет в область на теневой стороне цилиндра. Динамика

процесса формирования WGM-резонанса была исследована с помощью FDTD-метода, реализованного в FullWAVE. С помощью FEM (*Finite Element Method*), реализованного в COMSOL Multiphysics, было показано, что эффект, схожий с эффектом возбуждения мод ШГ, может наблюдаться не только в цилиндре с квадратным сечением, но и в диэлектрическом кубе.

FDTD-моделирование резонансных мод

Моды ШГ возникают в элементах с осевой симметрией в силу многократного внутреннего отражения электромагнитного излучения внутри элемента. Одним из полезных эффектов, наблюдаемых при WGM-резонансе, является уменьшение поперечных и продольных размеров области фокусировки на теневой стороне элемента, что, например, можно обнаружить при фокусировке света сферой или круговым цилиндром. Подобный эффект можно обнаружить и в элементах с другой геометрией: в условиях резонанса излучение задерживается внутри элемента, благодаря чему после длительного облучения светом он способен излучать некоторое время в определённом диапазоне частот. Благодаря описанному выше свойству, WGM-резонансы возможно выявлять при помощи FDTD-метода. Для выявления резонанса, как правило, требуется расчёт преобразования Фурье от временной зависимости электромагнитного поля в какой-либо точке вблизи исследуемого элемента: в спектре остаточного излучения максимумы будут соответствовать резонансным частотам. Спектр остаточного излучения может быть проанализирован после облучения элемента Гауссовым импульсом, при помощи Фурье-анализа или метода диагонализации фильтра [12], который был использован в данной работе.

Инвариантность уравнений Максвелла относительно масштаба [13] позволяет связать резонансные частоты с линейными размерами исследуемого элемента и таким

образом выразить их относительно длин волн. Ниже все резонансные характеристики будут приведены в масштабных параметрах соответствующего элемента – в единицах радиуса цилиндра с круглым сечением или в единицах длины стороны квадрата цилиндра с квадратным сечением. В качестве программы, реализующей FDTD-метод, использовалась программа MEEP.

Пригодность FDTD-метода для задачи определения параметров WGM-резонанса была проверена на задаче определения относительных радиусов цилиндра с круглым сечением, при которых возможно возбуждение WGM. Для диэлектрического цилиндра существует аналитическое решение задачи дифракции, поэтому параметры резонанса могут быть получены численно из аналитического решения [8].

Было проведено сравнение результатов [8] с результатами работы FDTD-метода, с помощью которого были рассчитаны радиусы цилиндра, при которых возможен резонанс. На дискретной сетке в xy -плоскости располагался цилиндр с круглым сечением радиуса $R = 2\lambda$ (λ – длина волны излучения) и показателем преломления $n = 1,59$ (полиэстер), облучаемый монохроматическим ТЕ-поляризованным светом из точечного источника. Шаги сетки моделирования FDTD: $\Delta x = 0,02\lambda$, число Куранта $S = 0,5$. Размер расчетной области $8\lambda \times 8\lambda$, ширина PML-слоев – $0,5\lambda$ (*Perfectly Matched Layer*).

Цилиндр облучается точечным источником Гауссова импульса с несущей частотой c/λ и спектральной шириной c/λ (c – скорость света в вакууме). После пятидесяти периодов значение z -компоненты напряжённости электрического поля регистрировалось в какой-либо точке вблизи цилиндра в течение следующих пятидесяти периодов, а полученный сигнал раскладывался на гармоники по методу диагонализации фильтра с помощью программы *Harminv*.

При моделировании в гармоническом разложении остаточного излучения (наблюдающегося вблизи цилиндра после прохождения импульса) могут присутствовать и нерезонансные частоты, а любые гармоники, которые были зарегистрированы вследствие особенностей положения источника или точки наблюдения, то есть они не будут наблюдаться, например, при других углах падения излучения. Чтобы увеличить точность полученных результатов, на дискретной сетке располагаются несколько точек, в которых регистрируется излучение, как представлено на рис. 1.

Из гармонического разложения зависимости остаточного излучения $E_z(t)$, полученного в точках вблизи цилиндра, были рассчитаны частоты мод, задерживающихся в цилиндре в двух случаях с разными расстояниями источника импульса до границы цилиндра: на расстоянии λ (рис. 1) и на границе цилиндра. Как уже было отмечено, инвариантность уравнений Максвелла позволяет связать частоты со значениями радиусов, которые обуславливают возникновение резонанса при облучении монохроматическим светом с длиной волны λ . Диаграмма значений радиуса, полученная из результатов моделирования, представлена на рис. 2.

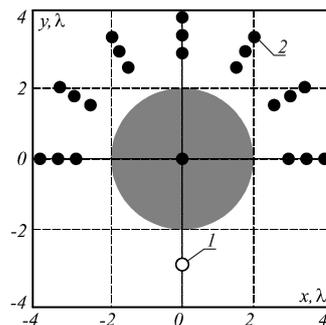


Рис. 1. Схема вычислительного эксперимента: 1 – точечный источник Гауссова импульса, 2 – точки обработки сигнала методом диагонализации фильтра

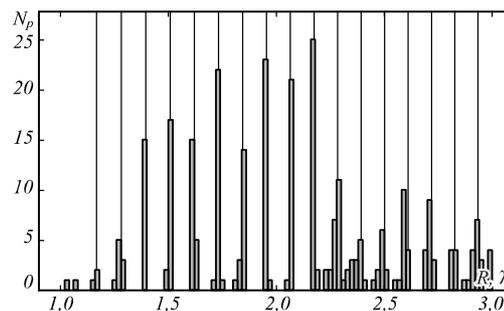


Рис. 2. Гистограмма распределения гармоник в модели кругового цилиндра

Высота столбца на гистограмме соответствует количеству точек (N_p) вблизи границы цилиндра, в которых была зарегистрирована гармоника, соответствующая радиусу. Вертикальными линиями обозначены взятые из статьи [8] точные значения радиусов, которые обуславливают возникновение резонанса при облучении монохроматическим светом с относительной длиной волны λ . Гистограмма строилась с шагом в $0,02\lambda$.

Можно отметить, что метод даёт хорошее согласование с результатами, рассчитанными аналитически – более восьми резонансных мод получилось воспроизвести с высокой точностью. Сравнение результатов представлено в табл. 1.

Табл. 1. Оценки для значений резонансных радиусов

Точное значение радиуса r, λ	Нижняя граница по диаграмме r_{\min}, λ	Верхняя граница по диаграмме r_{\max}, λ	Ширина интервала, λ
1,1672	1,1546	1,1680	0,0124
1,2814	1,2599	1,2986	0,0387
1,3951	1,3804	1,3997	0,0193
1,5082	1,4930	1,5142	0,0212
1,6206	1,6166	1,6247	0,0081
1,7325	1,7198	1,7407	0,0209
1,8439	1,8003	1,8456	0,0453
1,9547	1,9488	1,9617	0,0129
2,0651	2,0599	2,0713	0,0114
2,1749	2,1450	2,1950	0,0500

Резонансные моды цилиндра с квадратным сечением

Изложенный в предыдущем параграфе метод позволяет определять долгоживущие моды в любой дву-

мерной и даже трёхмерной структуре с произвольной геометрией. С его помощью были рассчитаны моды диэлектрического цилиндра с квадратным сечением.

Для моделирования FDTD-методом использовались те же параметры, что и в предыдущем разделе. В качестве показателя преломления цилиндра с квадратным сечением также был выбран $n = 1,59$, сторона сечения цилиндра – $1,5\lambda$.

Распространение импульса в цилиндре было промоделировано несколько раз при различных положениях источника импульса, чтобы исключить моды, которые получены вследствие особенностей положения источника и отсутствия осевой симметрии в элементе. Значения размеров стороны сечения цилиндра собраны в гистограмму на рис. 3 с помощью процедуры, описанной в предыдущем параграфе. Вертикальными линиями на гистограмме обозначены значения стороны цилиндра, при которых возникающие в цилиндре моды являются хорошо воспроизводимыми, так как были зарегистрированы четыре и более раз.

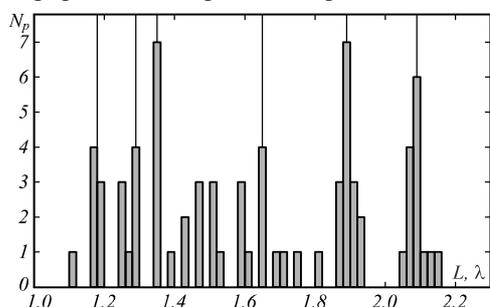


Рис. 3. Гистограмма распределения гармоник в модели прямоугольного цилиндра

С целью определения поперечных и продольных размеров области максимальной интенсивности в фокусе I (рассчитанной как $|E_z|^2$) при варьировании стороны цилиндра с помощью FEM, реализованном в пакете COMSOL Multiphysics, было промоделировано распространение монохроматической волны через квадратный цилиндр. Соответствующие зависимости представлены на рис. 4–6. Вертикальными линиями обозначены резонансные параметры из рис. 3. В рассматриваемом интервале значений длины стороны сечения цилиндра ($1,20–2,09\lambda$) во всех случаях при фокусировке света преодолевается дифракционный предел ($0,44\lambda$), который отмечен горизонтальной прямой на рис. 4б, в.

Рис. 4 демонстрирует, что четыре из шести рассматриваемых мод представляют интерес для исследования: $1,42\lambda$, $1,65\lambda$, $1,89\lambda$ и $2,09\lambda$. Однако в предыдущем параграфе для цилиндра со стороной $1,42\lambda$ не был обнаружен резонансный эффект, поэтому анализу подвергнутся только три последних случая. Во всех трёх случаях наблюдается уменьшение поперечных и продольных размеров области максимальной интенсивности, а также увеличение максимальной интенсивности в фокусе. При стороне сечения $L = 1,65\lambda$ поперечные размеры фокусного пятна были минимальными: поперечный размер $FWHM = 0,275\lambda$ и продольный $DOF = 0,289\lambda$.

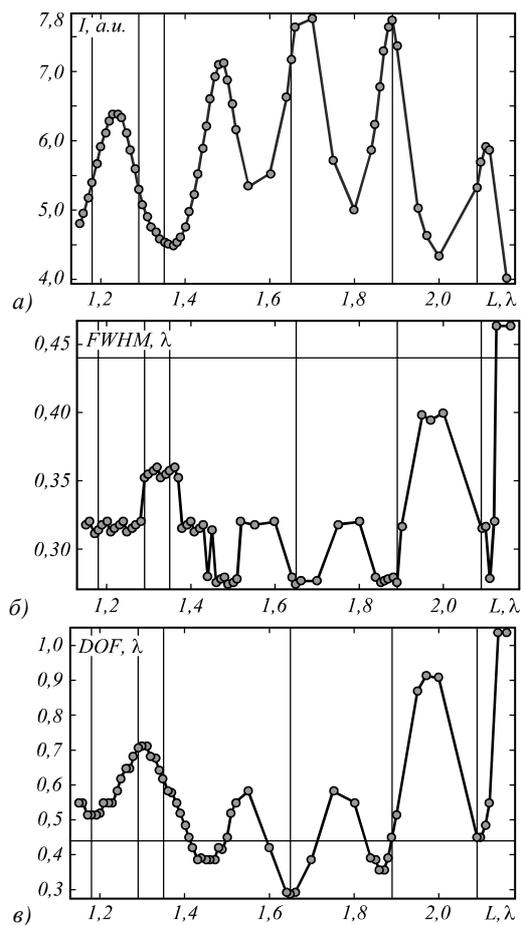


Рис. 4. Зависимость параметров фокусного пятна: максимальной интенсивности (а), ширины (б) и глубины (в) от полуширины интенсивности, от размера стороны цилиндра

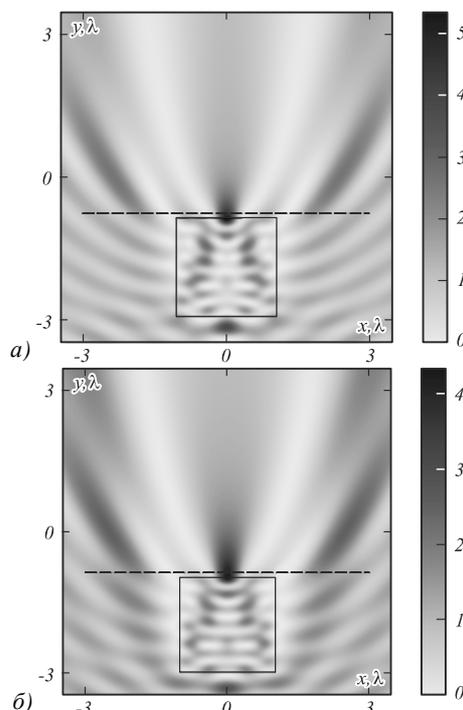


Рис. 5. Двумерное распределение интенсивности света (негатив) в поперечном сечении цилиндра с длиной стороны $L = 2,09\lambda$ (резонанс) (а) и $L = 2,00\lambda$ (резонанса нет) (б)

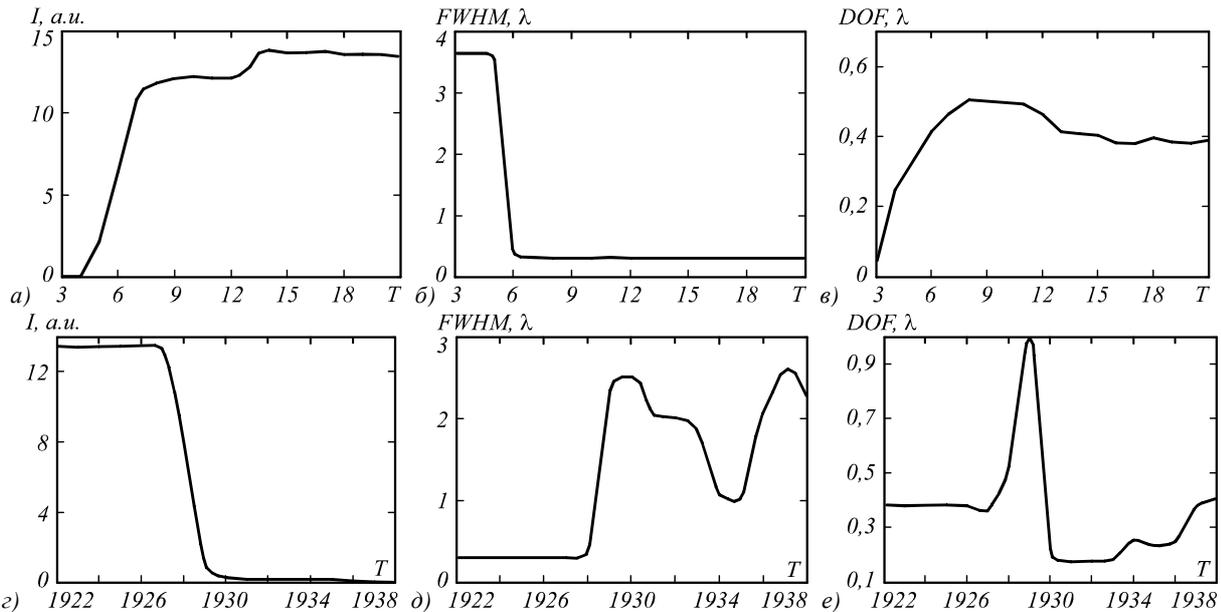


Рис. 6. Динамика изменения характеристик фокусного пятна: максимальной интенсивности (а, г), ширины (б, д) и глубины (в, е) по полуспаду интенсивности, при входе (а–в) и выходе (г–е) излучения из микроцилиндра

При стороне сечения $L = 1,6\lambda$ (тоже резонанс, но с меньшей добротностью, рис. 3) размеры фокуса были на 15 % больше: $FWHM = 0,32\lambda$ и $DOF = 0,42\lambda$.

На рис. 5 представлен пример двумерного распределения интенсивности (негатив) в случае наличия и отсутствия резонанса. Параметры фокусных пятен на рис. 5 следующие: при $L = 2,09\lambda$ (резонанс) интенсивность в фокусе равна $I_{\max} = 5,34$ а.е., $DOF = 0,45\lambda$, $FWHM = 0,32\lambda$, а при $L = 2,00\lambda$ (нет резонанса) – $I_{\max} = 4,33$ а.е., $DOF = 0,91\lambda$, $FWHM = 0,40\lambda$. В случае выбора резонансного радиуса уменьшение ширины фокусного пятна происходит на 23 %. Видно, что размер фокуса в случае резонанса меньше, чем в случае его отсутствия. Но разница невелика, так как резонансные моды, возникающие в цилиндре с квадратным сечением, имеют невысокую добротность (как это будет показано в следующем разделе). Горизонтальная пунктирная линия на рис. 5 демонстрирует расстояние, на котором располагалась плоскость наблюдения. Свет с ТЕ-поляризацией на рис. 5 падает снизу вверх.

Динамика формирования резонанса в цилиндре с квадратным сечением

Проведем моделирование распространения ТЕ-поляризованного импульса длительностью 1925 периодов (3,42 пс) и длиной волны $\lambda = 532$ нм через микроцилиндр из полиэстера ($n = 1,59$) квадратного сечения с длиной стороны $L = 1,65\lambda$ (резонанс) с помощью FDTD-метода, реализованного в пакете FullWAVE. На рис. 6 показана динамика изменения характеристик фокусного пятна. Стационарные характеристики фокусного пятна по полуспаду интенсивности составили $FWHM = 0,30\lambda$ (рис. 6б, д), $DOF = 0,38\lambda$ (рис. 6, е), а интенсивность в 13 раз превысила интенсивность падающего излучения (рис. 6а, г). Результаты, полученные с помощью FDTD-метода, согласо-

уются с результатами, полученными с помощью пакета COMSOL Multiphysics и приведёнными выше.

Из рис. 6 видно, что резонанс в цилиндре устанавливается достаточно быстро (примерно за $\Delta t = 20$ фс), то есть резонанс имеет невысокую добротность ($Q = \omega \cdot \Delta t < 100$). Поэтому для проверки наличия резонанса можно использовать более короткий импульс. Проведем моделирование распространения ТЕ-поляризованного импульса длительностью 100 периодов (0,18 пс) и центральной длиной волны $\lambda = 532$ нм через микроцилиндр из полиэстера ($n = 1,59$) квадратного сечения с длиной стороны $L = 1,6\lambda$ (тоже резонансная длина стороны, но с меньшей добротностью, чем $L = 1,65\lambda$). Стационарные пространственные характеристики фокусного пятна по полуспаду интенсивности составили $FWHM = 0,34\lambda$, $DOF = 0,51\lambda$, а интенсивность в 9 раз превысила интенсивность падающего излучения. На рис. 7 можно наблюдать процесс выхода моды из цилиндра с длиной стороны $L = 1,6\lambda$ (излучение падает снизу вверх).

Из полученных результатов можно сделать вывод, что резонансный режим в квадратном волноводе устанавливается очень быстро (за 10–20 фс). Однако вместе с этим резонанс является низкодобротным и поэтому мало влияет на характеристики фокусного пятна: уменьшает ширину фокуса на 15–20 %.

Резонансные моды куба

В предыдущем параграфе было продемонстрировано, что эффект, аналогичный WGM-резонансам, может быть воспроизведён в двумерных структурах, отличных от кругового цилиндра. WGM воспроизводятся и в трёхмерных элементах, таких как сферы [7]. Результат моделирования цилиндра с квадратным сечением демонстрирует, что по аналогии можно получить подобный резонанс и в трёхмерном случае.

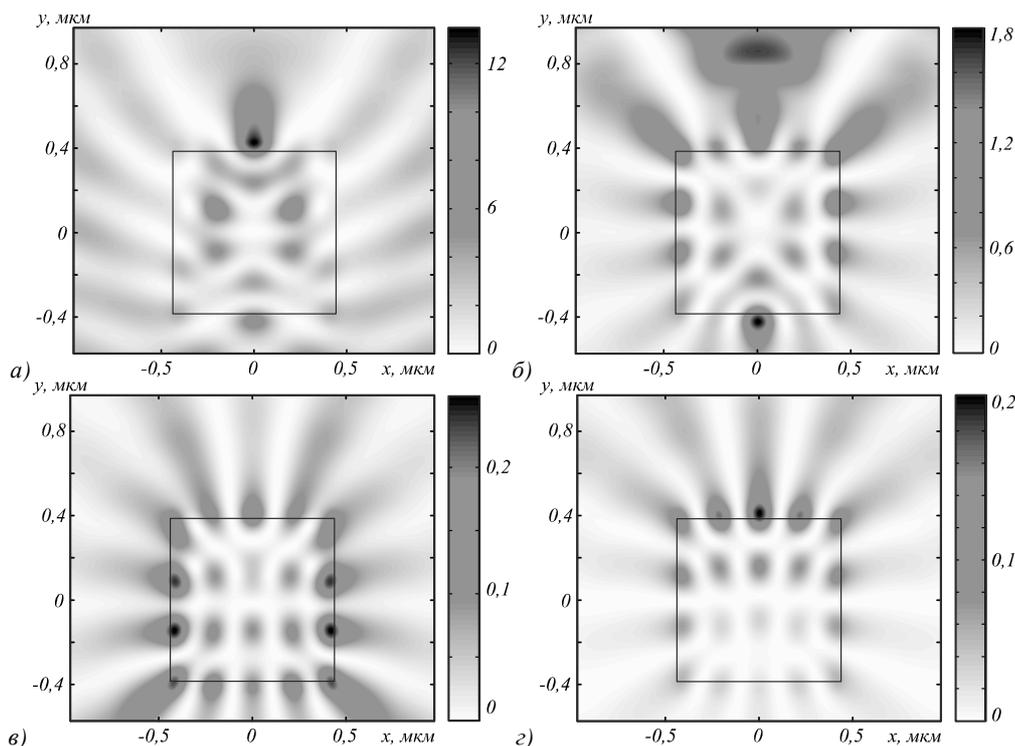


Рис. 7. Распределение интенсивности в процессе выхода моды из микроцилиндра с длиной стороны $L = 1,6\lambda$ через 1850 (а), 1928 (б), 1932 (в) и 1934 (г) периодов

Для проверки распространение света в диэлектрическом кубе на подложке из диэлектрика с таким же показателем преломления ($n = 1,59$) было промоделировано с помощью FEM реализованного в COMSOL. Шаги дискретизации метода составили $\lambda/10$, а ширина PML-слоёв $\lambda/3$. На куб со стороной $L = 2,09\lambda$ падает линейно поляризованное монохроматическое излучение, распространяющееся из подложки вдоль оси Oz , вектор напряжённости которого направлен вдоль оси Ox . Размеры получившейся области максимальной интенсивности по полуспаду составили $FWHM_x = 0,81\lambda$ и $FWHM_y = 0,45\lambda$. Продольный размер области по полуспаду составил $DOF = 0,53\lambda$. Интенсивность света вблизи поверхности куба в 16 раз выше, чем интенсивность падающего света.

Значение $L = 2,09\lambda$ было взято из результатов расчётов в предыдущем разделе для 2D-случая. Однако чтобы убедиться в том, что в данном случае наблюдается резонансный эффект, необходимо провести сравнение. При тех же параметрах сетки была промоделирована фокусировка монохроматического света на кубе со стороной $L = 2,00\lambda$. Область максимальной интенсивности, образовавшаяся в результате фокусировки, имеет следующие параметры: $FWHM_x = 0,73\lambda$, $FWHM_y = 0,42\lambda$, $DOF = 0,30\lambda$. Интенсивность света на границе куба превосходит интенсивность падающего света приблизительно в 389 раз, а на расстоянии $0,1\lambda$ от границы – в 18 раз. На рис. 8 представлено двумерное негативное распределение интенсивности, полученное на расстоянии $0,1\lambda$ от поверхности куба со стороной $L = 2,00\lambda$ (на рис. 8 размер кадра как раз равен стороне куба). На рис. 9 изображены графики

поперечных сечений интенсивности. Из рис. 8–9 видно, что получившееся пятно вытянуто вдоль оси поляризации. Увеличение интенсивности на границе куба свидетельствует о резонансе.

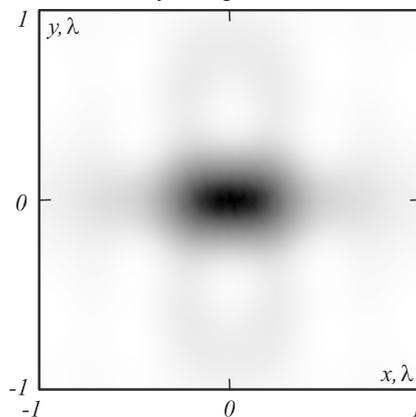


Рис. 8. Двумерное распределение интенсивности света (негатив) на расстоянии $0,1\lambda$ от поверхности куба

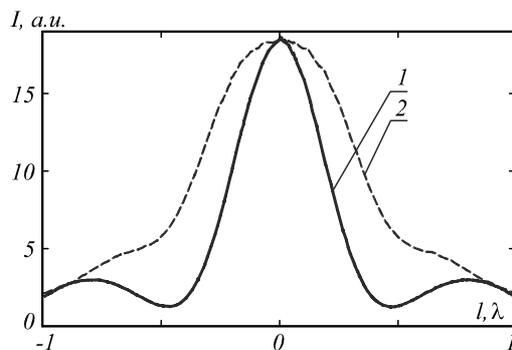


Рис. 9. Интенсивность света вдоль осей Ox (линия 1) и Oy (линия 2) двумерного распределения

Заключение

Полученные результаты позволяют говорить о геометрических резонансах, возникающих в диэлектрическом кубе на подложке и в цилиндре с квадратным сечением. Частоты резонансных мод куба, однако, не совпадают с аналогичными частотами в цилиндре с квадратным сечением. Резонанс в трёхмерном случае так же характеризуется большим усилением интенсивности на границе: интенсивность света оказалась в 389 раз выше. В то же время при фокусировке цилиндром с квадратным сечением с длиной стороны в диапазоне $L = (1,2 - 2,0)\lambda$ наибольшее соотношение между интенсивностью света в максимуме и интенсивностью падающего света меньше 8.

При стороне сечения квадратного цилиндра $L = 1,65\lambda$ поперечный размер фокусного пятна был минимальным и равен $\text{FWHM} = 0,275\lambda$, что почти в два раза меньше дифракционного предела в двумерном случае $\text{FWHM} = 0,44\lambda$.

С помощью FDTD-метода показана динамика формирования мод в квадратном цилиндре, аналогичная модам ШГ. Показано, что данные моды обладают низкой добротностью и поэтому мало влияют на характеристики фокусного пятна (уменьшают его на 15–20 %).

В трёхмерном случае фокусировка кубом не показала значительного уменьшения размеров фокусного пятна. Поперечные размеры фокусного пятна по полуспаду интенсивности составили $\text{FWHM}_x = 0,73\lambda$ и $\text{FWHM}_y = 0,42\lambda$, что на 10 % меньше, чем поперечные размеры, полученные без резонанса.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-9498.2016.9), а также грантов РФФИ 14-29-07133, 15-07-01174, 15-37-20723, 15-47-02492, 16-29-11698.

Литература

1. **Foreman, M.R.** Whispering gallery mode sensors / M.R. Foreman, J.D. Swaim, F. Vollmer // *Advances in Optics and Photonics*. – 2015. – Vol. 7(2). – P. 168-240. – DOI: 10.1364/AOP.7.000168.

2. **Quan, H.** Simulation of whispering-gallery-mode resonance for optical miniature biosensor / H. Quan, Z. Guo // *Fourth International Symposium of Radiative Transfer, Istanbul, Turkey*, June, 2004. – DOI: 10.1615/ICHMT.2004.RAD-4.290.
3. **François, A.** Whispering gallery mode devices for sensing and biosensing / A. François, Y. Zhi, A. Meldrum // *Photonic materials for sensing, biosensing and display devices*. – 2015. – Vol. 229. – P. 237-288. – DOI: 10.1007/978-3-319-24990-2_9.
4. **Городецкий, М.Л.** Высокочастотные оптические микрорезонаторы с модами типа шепчущей галереи и их применение в прецизионных измерениях / М.Л. Городецкий, Ю.А. Демченко, Д.Ф. Зайцев, В.Н. Крутиков, Ю.М. Золотаревский, В.Л. Ляковский // *Метрология*. – 2014. – Т. 12. – С. 22-40.
5. **Righini, G.C.** Whispering gallery mode microresonators: fundamentals and applications / G.C. Righini, Y. Dumeige, P. Ferron, M. Ferrari, G. Nunzi Conti, D. Ristic, S. Soria // *La Rivista del Nuovo Cimento*. – 2011. – Vol. 34(7). – P. 435-490. – DOI: 10.1393/ncr/i2011-10067-2.
6. **Gorodetsky, M.L.** Ultimate Q of optical microsphere resonators / M.L. Gorodetsky, A.A. Savchenkov, V.S. Ilchenko // *Optics Letters*. – 1996. – Vol. 21(7). – P. 453-455.
7. **Geints, Y.E.** Photonic jets from resonantly exited transparent dielectric microspheres / Y.E. Geints, A.A. Zemlyanov, E.K. Panina // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2012. – Vol. 29(4). – P. 758-762. – DOI: 10.1364/JOSAB.29.000758.
8. **Козлов, Д.А.** Резонансная фокусировка лазерного света однородным диэлектрическим цилиндром / Д.А. Козлов, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 393-396.
9. **Chiasera, A.** Spherical whispering-gallery-mode microresonators / A. Chiasera, Y. Dumeige, P. Féron, M. Ferrari, Y. Jestin, G. Nunzi Conti, S. Pelli, S. Soria, G.C. Righini // *Laser and Photonics Reviews*. – 2010. – Vol. 4(3). – P. 457-482.
10. **Armani, D.K.** Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip / D.K. Armani, T.J. Kippenberg, S.M. Spillane, K.J. Vahala // *Nature*. – 2003. – Vol. 421. – P. 925-928.
11. **Kotlyar, V.V.** Calculating the resonance radius of a dielectric cylinder under illumination by a plane TE-wave / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, D.A. Kozlov // *Optik*. – 2016. – Vol. 127(8). – P. 3803-3808. – DOI: 10.1016/j.ijleo.2016.01.058.
12. **Mandelshtam V.A.** Harmonic inversion of time signals / V.A. Mandelshtam, H.S. Taylor // *Journal of Chemical Physics*. – 1997. – Vol. 107(17). – P. 6756-6769.
13. **Joannopoulos, J.D.** Photonic crystals: molding the flow of light / J.D. Joannopoulos, S.G. Johnson, J.N. Winn, R.D. Meade. – Princeton: Princeton University Press, 2008.

Сведения об авторах

Козлов Дмитрий Андреевич, 1992 года рождения, в 2014 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет по специальности «Прикладные математика и физика», работает инженером лаборатории лазерных измерений ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, компьютерная оптика. E-mail: kozlov.dmitry.a@gmail.com.

Козлова Елена Сергеевна, 1989 года рождения. В 2011 году окончила Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладные математика и информатика». Кандидат физико-математических наук с 2014 года. Научный сотрудник лаборатории лазерных измерений ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и по совместительству ассистент кафедры технической кибернетики Самарского университета. Область научных интересов: дифракционная оптика, численные методы. E-mail: kozlova.elena.s@gmail.com.

Котляр Виктор Викторович, 1957 года рождения, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией лазерных измерений ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

и по совместительству профессор кафедры технической кибернетики Самарского университета. 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.

ГРПТИ: 29.31.27

Поступила в редакцию 7 июня 2016 г. Окончательный вариант – 29 августа 2016 г.

SHARP RESONANT FOCUSING OF LIGHT BY A DIELECTRIC CYLINDER WITH SQUARE CROSS-SECTION AND CUBE

D.A. Kozlov^{1,2}, E.S. Kozlova^{1,2}, V.V. Kotlyar^{1,2}

¹ Image Processing Systems Institute of the RAS –
Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia,
² Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract

In this paper a research on conditions for resonance excitation in a homogeneous dielectric cylinder with square cross-section is conducted using a FDTD-method. It is shown that in a cylinder with square cross-section resonant modes similar to whispering gallery modes can be excited, which allows one to reduce the transverse dimensions of the focal spot. FDTD method demonstrates an acceptable accuracy of the resonant mode detection. A similar result is obtained for a cube on a dielectric substrate: it is possible to achieve the reduction of the transverse dimensions of the focal spot by changing the corresponding cube size.

Keywords: dielectric cylinder, resonance, light focusing.

Citation: Kozlov DA, Kozlova ES, Kotlyar VV. Sharp resonant focusing of light by a dielectric cylinder with square cross-section and cube. *Computer Optics* 2016; 40(4): 431-438. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-431-438.

Acknowledgements: The work was partially funded by the Russian Federation Ministry of Education and Science, Russian Science Foundation (RSF), grant No. 14-31-00014, RF Presidential grants for support of leading scientific schools and the Russian Foundation for Basic Research Grants.

References

- [1] Foreman MR, Swaim JD, Vollmer F. Whispering gallery mode sensors. *Advances in Optics and Photonics* 2015; 7(2): 168-240. DOI: 10.1364/AOP.7.000168.
- [2] Quan H, Guo Z. Simulation of whispering-gallery-mode resonance for optical miniature biosensor. Fourth International Symposium of Radiative Transfer, Istanbul, Turkey. DOI: 10.1615/ICHMT.2004.RAD-4.290.
- [3] François A, Zhi Y, Meldrum A. Whispering gallery mode devices for sensing and biosensing. *Photonic materials for sensing, biosensing, and display devices* 2015; 299: 237-288. DOI: 10.1007/978-3-319-24990-2_9.
- [4] Gorodetskii ML, Demchenko YA, Zaitsev DF, Krutikov VN, Zolotarevskii YM, Lyaskovskii VL. High-Q factor optical whispering-gallery mode microresonators and their use in precision measurements. *Measurement Techniques* 2015; 57(12): 1386-1395. DOI: 10.1007/s11018-015-0639-9.
- [5] Righini GC, Dumeige Y, Feron P, Ferrari M, Nunzi Conti G, Ristic D, Soria S. Whispering gallery mode microresonators: fundamentals and applications. *La Rivista del Nuovo Cimento* 2011; 34(7): 435-490. DOI: 10.1393/ncr/i2011-10067-2.
- [6] Gorodetsky ML, Savchenkov AA, Ilchenko VS. Ultimate Q of optical microsphere resonators. *Optics Letters* 1996; 21(7): 453-455.
- [7] Geints YE, Zemlyanov AA, Panina EK. Photonic jets from resonantly excited transparent dielectric microspheres. *Journal of the Optical Society of America B* 2012; 29(4): 758-762. DOI: 10.1364/JOSAB.29.000758.
- [8] Kozlov DA, Kotlyar VV. Resonant laser focus light by uniformity dielectric microcylinder. *Computer Optics* 2014; 38(3): 393-396.
- [9] Chiasera A, Dumeige Y, Féron P, Ferrari M, Jestin Y, Nunzi Conti G, Pelli S, Soria S, Righini GC. Spherical whispering-gallery-mode microresonators. *Laser and Photonics Reviews* 2010; 4(3): 457-482.
- [10] Armani DK, Kippenberg TJ, Spillane SM, Vahala KJ. Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip. *Nature* 2003; 421: 925-928.
- [11] Kotlyar VV, Kovalev AA, Kozlov DA. Calculating the resonance radius of a dielectric cylinder under illumination by a plane TE-wave. *Optik* 2016; 127(8): 3803-3808. DOI: 10.1016/j.ijleo.2016.01.058.
- [12] Mandelstam VA, Taylor HS. Harmonic inversion of time signals and its applications. *Journal of Chemical Physics* 1997; 107(17): 6756-6769. DOI: 10.1063/1.475324.
- [13] Joannopoulos JD, Johnson SG, Winn JN, Meade RD. *Photonic crystals: molding the flow of light*. Princeton: Princeton University Press; 2008.

Authors' information

Dmitry Andreevich Kozlov (b. 1992) graduated from Samara State Aerospace University in 2014, Computer Science department. He works engineer at the Laser Measurements laboratory in the Image Processing Systems Institute - Branch of the Federal Scientific Research Centre “Crystallography and Photonics” of Russian Academy of Sciences. His research interests are currently focused on diffraction optics and computer optics. E-mail: kozlov.dmitry.a@gmail.com.

Elena Sergeevna Kozlova, (b. 1989) received Master's degree in Applied Mathematics and Informatics in Samara State Aerospace University (2011). She received her PhD in 2014. She is researcher of Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute - Branch of the Federal Scientific Research Centre “Crystallography and Photonics” of Russian Academy of Sciences and assistant of Computer Science department at Samara National Research University. Scientific interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics. E-mail: kozlova.elena.s@gmail.com.

Victor Victorovich Kotlyar is the head of a laboratory at IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS and a professor of Computer Science department at Samara National Research University. He graduated from Kuibyshev State University (1979), received his Candidate's and Doctor's Degrees in Physics & Mathematics from Saratov State University (1988) and Moscow Central Design Institute of Unique Instrumentation of the RAS (1992). He is a co-author of 300 scientific papers, 5 books and 7 inventions. His current research interests include diffractive optics, gradient optics, nanophotonics, and optical vortices. E-mail: kotlyar@smr.ru.

Received June 7, 2016. The final version – August 29, 2016.
