

С.В. Чугунов, Э.В. Чугунова, А.С. Чугунов
(Брест, Беларусь)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОННЫХ НАНОПУЧКОВ В ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУРАХ

В настоящей работе проведено моделирование фотонного нанопучка для волноводной системы, состоящей из трех соприкасающихся диэлектрических микроцилиндров с диаметрами, равными 5, 10 и 15 мкм. Значения показателей преломления материала микроцилиндров изменялись от 1,5 до 1,8. Такая структура облучалась плоской линейно поляризованной волной; длина волны изменялась в пределах от 400 до 1000 нм. В результате моделирования были определены зависимости относительной интенсивности излучения в нанопучке от размеров микроцилиндров, их показателя преломления и длины волны.

Ключевые слова: фотонный нанопучок, волновод, микрорезонатор.

In this work, we simulated a photonic nanojet for a waveguide system consisting of three contacting dielectric microcylinders with diameters of 5, 10 and 15 μm . The values of the refractive indices of the material of the microcylinders varied from 1.5 to 1.8.

Such a structure was irradiated with a plane linearly polarized wave; the wavelength varied from 400 to 1000 nm. As a result of the simulation, the dependences of the relative intensity of radiation in a nanojet on the sizes of microcylinders, their refractive index and wavelength were determined.

Keywords: photonic nanojet, waveguide, microresonator.

Введение

В настоящее время не снижается интерес к фокусирующим свойствам диэлектрических микросфер и микроцилиндров. В работах теоретического [1–2] и экспериментального характера [3–4] было показано, что диэлектрические сферы и цилиндры, диаметры которых сравнимы с длиной волны видимого света, могут фокусировать пучок света в световое пятно очень малого размера (микролинзовый эффект). В результате фокусировки в ближней зоне теневой области микросферы или микроцилиндра образуется фотонная структура с углом расхождения в несколько раз меньшим, чем в пучке, полученном при фокусировке гауссова пучка классическим методом [5]. Этот расходящийся пучок напоминает струю реактивного двигателя, поэтому излучение, сформированное таким образом, назвали «фотонными нанопучками» или «фотонными нанореактивными пучками».

Во многих публикациях [1–12] рассматриваются различные свойства фотонных пучков, основные условия их существования и перспективы потенциального применения. Исследователями показано, что такие узкие, высокоинтенсивные электромагнитные пучки образуются в результате интерференции между падающей плоской световой волной и полем, рассеянным сферой или цилиндром.

1. Теория и основные свойства нанопучков

Начальная методика описания фотонного нанопучка для диэлектрической сферы была разработана в [12] на основе теории Ми. Основная идея метода, предложенного этими авторами, заключалась в строгом решении уравнений Максвелла в сферических координатах относительно их собственных функций в целях определения ближнего внешнего поля диэлектрической сферы, облученной плоской волной. В рамках этой теории были определены важнейшие характеристики нанопучка, такие как продольный и поперечный размеры нанопучка, его интенсивность, полуширина, расстояние от микросферы (микроцилиндра) до точки, в которой интенсивность максимальна, и многие другие.

В результате экспериментальных и теоретических исследований были установлены следующие основные свойства фотонных нанопучков. Во-

первых, пучок может распространяться практически без затухания на расстояние порядка диаметра микролинзы, а поперечная ширина пучка вне диэлектрического цилиндра или сферы как правило не превышает $\sim 2\lambda$. Во-вторых, минимальная полуширина пучка может быть меньше классического дифракционного предела (для микросфер – на уровне $\sim \lambda/3$). В-третьих, образование фотонного нанопучка – нерезонансное явление, которое может наблюдаться при варьировании диаметров d микролинз в широком диапазоне (от $\sim 2\lambda$ до более чем 40λ) при условии, что показатель преломления микролинзы относительно окружающей среды менее 2,0. В-четвертых, фотонный нанопучок имеет высокую интенсивность, которая может на несколько порядков превышать интенсивность световой волны, падающей на микролинзу.

Уникальное сочетание вышеперечисленных свойств обуславливает поиски возможных потенциальных применений фотонных пучков. В частности фотонные нанопучки могли бы быть использованы для обнаружения объектов, размеры которых значительно ниже классического дифракционного предела, и оптического манипулирования ими [4]. Таким образом, применительно к объектам, исследуемым во многих важных областях биологии, химии и нанотехнологии, в видимом диапазоне длин волн можно было бы контролировать процессы агрегации, а также решать задачи по обнаружению протеинов, вирусов и даже отдельных молекул. Кроме того, фотонные нанопучки могут быть использованы в качестве волноводных структур с малыми потерями, в целях нанолитографии субдифракционного разрешения и для сверхплотной оптической записи в устройствах для хранения информации.

2. Моделирование рассеяния света диэлектрическими микрорезонаторами

В настоящей работе проведено моделирование фотонного нанопучка для волноводной системы, состоящей из трех соприкасающихся диэлектрических микроцилиндров с диаметрами равными 5, 10 и 15 мкм. Значения показателей преломления материала микроцилиндров изменялись от 1,5 до 1,8. Такая структура облучалась плоской линейно поляризованной волной; длина волны изменялась в пределах от 400 до 1000 нм.

Так как аналитические расчеты в соответствии с методом Ми в вычислительном отношении очень громоздки, при моделировании фотонного нанопучка мы применяли численный метод – метод конечных элементов, который успешно реализован в программной среде ComsolMultiphysics, в которой обеспечена возможность варьирования размеров элементов сетки и их количества в целях оптимизации моделирования.

В качестве примера на рис. 1 представлен результат численного моделирования волновода, состоящего из трех цилиндров диаметром 5 мкм с показателем преломления 1,7, находящегося в вакууме и облучаемого плоской волной с длиной волны 700 нм. На рисунке явно видна система дифракционных максимумов в теневой зоне цилиндра, сформированных вследствие интерференции падающей волны с полем, рассеянным цилиндром.

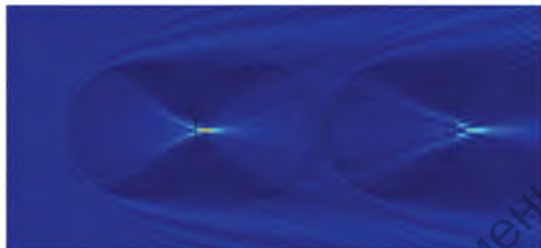


Рис. 1. Фотонный нанопучок, сформированный системой трех соприкасающихся микроцилиндров диаметром 5 мкм, изготовленных из материала с показателем преломления 1,7; длина падающей волны равна 700 нм

В результате моделирования были определены зависимости относительной интенсивности (отношение максимальной интенсивности в нанопучке к интенсивности падающей волны) излучения в нанопучке от размеров микроцилиндров, их показателя преломления и длины волны. На рис. 2 приведена зависимость относительной интенсивности излучения, выходящего из системы трех соприкасающихся микроцилиндров диаметром 15 мкм, от длины волны при различных показателях преломления материала микроцилиндров.

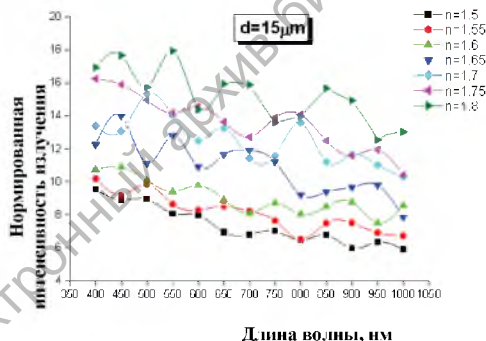


Рис. 2. Зависимость нормированной интенсивности излучения, выходящего из системы трех микроцилиндров диаметром 15 мкм, от длины волны при различных показателях преломления материала микроцилиндров

В результате моделирования были установлены следующие закономерности, характерные для нанопучка в таких волноводах: 1) с увеличением показателя преломления материала микроцилиндра область с

максимальным значением интенсивности излучения приближается к поверхности микроцилиндра и уменьшается продольный размер нанопучка; 2) значения относительной интенсивности выходящего излучения уменьшаются с увеличением длины волны падающего света; 3) наблюдается увеличение относительной интенсивности для волноводов с большим показателем преломления: при увеличении показателя преломления от 1,5 до 1,8 максимальные значения относительной интенсивности излучения, выходящего из системы одинаковых микроцилиндров с диаметрами 5, 10 и 15 мкм, увеличиваются соответственно в 2,81; 1,91 и 1,88 раза; 4) в системе одинаковых микроцилиндров с диаметрами 15 и 10 мкм по отношению к волноводу, составленному из микроцилиндров диаметром 5 мкм, максимальное значение относительной интенсивности излучения увеличивается соответственно от 1,18 до 1,76 и от 1,01 до 1,47 – при изменении показателя преломления материала микроцилиндров от 1,5 до 1,8.

Результаты моделирования нанопучков соответствуют результатам, полученным с использованием других экспериментальных методик и теоретических моделей [7–12].

Заключение

С учетом выявленных зависимостей можно, не выполняя громоздких аналитических расчетов и не проводя дорогостоящих экспериментов, подобрать такие диаметры преломляющих цилиндров или сфер, их показатели преломления и длины падающего излучения, при которых можно получить нанопучки требуемого дизайна с характеристиками, необходимыми для решения конкретных задач.

Волноводные структуры из оптически связанных микрорезонаторов с фотонными нанопучками перспективны для использования в качестве компактных систем фокусировки в сверхточной лазерной хирургии, при создании новых устройств оптоэлектроники и фотоники на базе микрорезонаторов, а также для продолжения фундаментального исследования систем оптических микрорезонаторов.

Литература:

1. Itagi, A.V. Optics of photonic nanojets / A.V. Itagi, W.A. Challener // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2005. – Vol. 22, № 12. – P. 2847–2858.
2. Lecler, S. Properties of a three-dimensional photonic jet / S. Lecler, Y. Takakura, P. Meyrueis // *Opt. Lett.* – 2005. – Vol. 30, № 19. – P. 2641–2643.
3. Gerlach, M. Nanojets and directional emission in symmetric photonic molecules / M. Gerlach, Y.P. Rakovich, J.F. Donegan // *Opt. Express.* – 2007. – Vol. 15, № 25. – P. 17343–17350.

4. Devilez, A. Spectral analysis of three-dimensional photonic jets / A. Devilez et al. // *Opt. Express*. – 2008. – Vol. 16. – P. 14200–14212.
5. Gérard, D. Strong electromagnetic confinement near dielectric microspheres to enhance single-molecule fluorescence / D. Gérard [et al.] // *Opt. Express*. – 2008. – Vol. 16. – P. 15297–15303.
6. Heifetz, A. Experimental confirmation of backscattering enhancement induced by a photonic jet / A. Heifetz, K. Huang, A. V. Sahakian, X. Li, A. Taflove, V. Backman // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – Vol. 89. – P. 1118–1123.
7. Li, X. Optical analysis of nanoparticles via enhanced backscattering facilitated by 3-D photonic nanojets / X. Li, Z. Chen, A. Taflove, V. Backman // *Optics Express*. – 2005. – Vol. 13. – P. 526–533.
8. Chen, Z.G. Superenhanced backscattering of light by nanoparticles / Z.G. Chen, X. Li, A. Taflove, V. Backman // *Optics Letters*. – 2006. – Vol. 31. – P. 196–198.
9. Kong, S.-C. Robust detection of deeply subwavelength pits in simulated optical data-storage disks using photonic jets / S.-C. Kong, A.V. Sahakian, A. Heifetz, A. Taflove, V. Backman // *Appl. Phys. Lett.* – 2008. – Vol. 92. – P. 211102–211110.
10. Van de Hulst, H.C. *Light Scattering by Small Particles* / H.C. Van de Hulst. – New York : Dover Publications. – New York, 1981. – P. 470.
11. Itagi, A.V. Optics of photonic nanojets / A.V. Itagi, W.A. Challener // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2005. – Vol. 22, № 12. – P. 2847–2858.
12. Lecler, S. Properties of a three-dimensional photonic jet / S. Lecler, Y. Takakura, P. Meyrueis // *Opt. Lett.* – 2005. – Vol. 30, № 19. – P. 2641–2643.