

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (грант по проекту Ф18М-026).

Литература

1. Толкачѳв, А.И. Генерация второй гармоники от тонкого сферического слоя при наличии двух источников / А.И. Толкачѳв, В.Н. Капшай // Актуальные вопросы физики и техники: Материалы VII Респ. научной конф. студентов, магистрантов и аспирантов. – 2018. – Ч. 1. – С. 287–290.

2. Капшай, В.Н. Генерация второй гармоники от тонкого сферического слоя и условия отсутствия генерации / В.Н. Капшай, А.А. Шамына // Оптика и спектроскопия. – 2017. – Т. 123, № 3. – С. 416–429.

С.В. Чугунов¹, А.С. Чугунов¹, Э.В. Чугунова²

¹УО «Брестский государственный технический университет»,
Брест, Беларусь

²ГУО «Гимназия №4» города Бреста, Беларусь

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОННЫХ НАНОПУЧКОВ В СИСТЕМЕ СВЯЗАННЫХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ

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 пер-

спективы 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 свойствами 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 рисунке 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.

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 рисунке 2 приведена зависимость относительной интенсивности излучения, выходящего из системы трех соприкасающихся микроцилиндров диаметром 15 мкм, от длины волны при различных показателях преломления материала микроцилиндров.

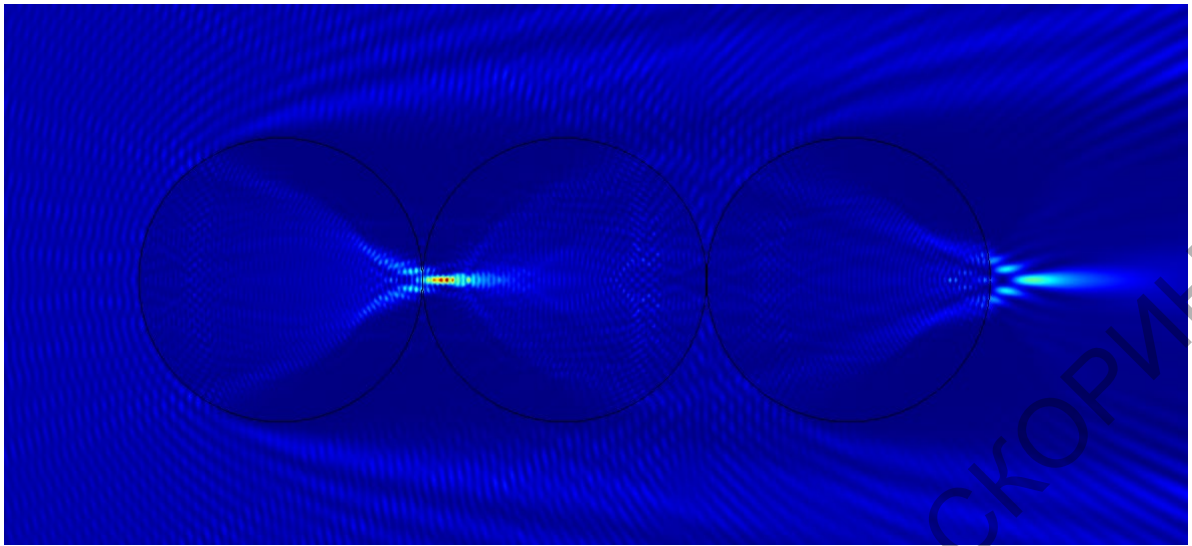


Рисунок 1 – Фотонный нанопучок, сформированный системой трех соприкасающихся микроцилиндров диаметром 5 мкм, изготовленных из материала с показателем преломления 1,7; длина падающей волны равна 700 нм

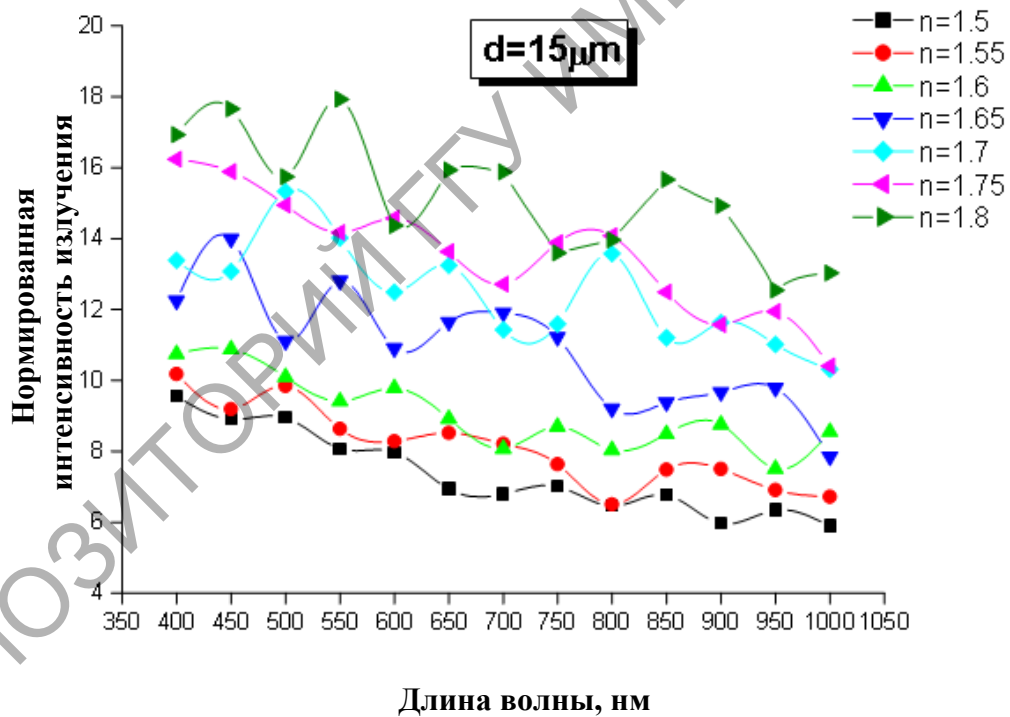


Рисунок 2 – Зависимость нормированной интенсивности излучения, выходящего из системы трех микроцилиндров диаметром 15 мкм, от длины волны при различных показателях преломления материала микроцилиндров

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 методов и теоретических моделей [7-12].

Заключение

С учётом 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.