

ЛАЗЕРНАЯ МАНИПУЛЯЦИЯ

Субволновая оптическая ловушка в поле стоячей волны на основе фотонной струи

И.В.Минин, О.В.Минин, В.Пачеко Пена, М.Беруэте

Предложен новый принцип построения субволновой оптической ловушки в поле стоячей волны на основе фотонной струи, формируемой в режиме «на отражение». Представлены результаты численных расчетов интенсивности электромагнитного поля сформированной фотонной струи, промодулированной пучностями стоячей волны. В отличие от известных схем, в предлагаемом варианте субволновой оптической ловушки минимальный размер области фокусировки определяется не параметрами фокусирующей линзы, а шириной формируемой фотонной струи. Уменьшение диаметра перетяжки фотонной струи по сравнению с размером перетяжки в фокусе линзы приводит к увеличению плотности энергии в области фокусировки.

Ключевые слова: оптическая ловушка, мезомасштаб, диэлектрическая частица, фотонная струя, стоячая волна.

Методы лазерной манипуляции микроскопическими и наноразмерными объектами представляют большой интерес для биологии, медицины, микромеханических технологий и являются одним из бурно развивающихся направлений фотоники.

Методика оптической ловушки (или оптического пинцета) основана на том, что область фокусировки сильно (остро) сфокусированного излучения может служить потенциальной ловушкой для диэлектрических частиц. В классической схеме оптической ловушки [1] – в схеме классического микроскопа (т. е. излучение направлено сверху вниз) – для получения значительной силы, действующей в направлении, противоположном направлению распространения излучения, необходимо как можно сильнее сфокусировать пучок. При этом осевая сила всегда в несколько раз меньше поперечной, и в этом случае частица легко освобождается из ловушки, т. к. поперечные силы больше оптических [2]. Кроме того, с помощью классических линз и объективов невозможно получить сфокусированный пучок с размером перетяжки (в направлении, поперечном направлению распространения излучения), меньшим дифракционного предела. Существенно, что для классических линз чем острее сфокусирован пучок, тем быстрее он расходится за фокусом. Это означает, что сила, удерживающая частицу, очень быстро уменьшается по мере удаления от зоны захвата, и уже на расстоянии в несколько десятков микрометров от фокуса оказывается недостаточной для повторного захвата частицы. Поэтому однопучковая ловушка реально полезна лишь для захвата одиночной частицы и только в области фокуса, размер которой из-за фундаментальных ограничений больше дифракционного предела.

В оптической ловушке в поле стоячей волны [3] за образом размещается поверхность с большим коэффициентом отражения, поэтому вблизи этой поверхности формируется стоячая волна в результате интерференции падающей и отраженной волн [4–6], и микрочастицы будут локализованы в пучностях такой ловушки, отстоящих друг от друга вдоль оптической оси ловушки на половину длины волны лазерного излучения. Таким образом, плоский отражающий экран создает дополнительную градиентную силу, удерживающую микрочастицу, и реализуется эффект захвата частиц и их локализация вблизи максимумов электрического поля стоячей волны. Эффект захвата оказывает значительное влияние на потенциал оптической ловушки, что приводит к существенному увеличению жесткости ловушки вдоль оптической оси за счет большого градиента электромагнитного поля образующейся стоячей волны [7]. Фактически, такой вариант оптической ловушки представляет собой модификацию квазидвухпучковой ловушки, в которой два пучка направлены навстречу друг другу [8]. Принцип построения оптической ловушки в поле стоячей волны достаточно эффективен не только в оптическом, но и в ультразвуковом диапазоне спектра [9,10].

Превысить дифракционный предел при оптической локализации позволяют методы оптического управления, основанные на применении ближнего электромагнитного поля [11]. Одним из методов фокусировки излучения в ближнем поле является феномен фотонной струи [12], где излучение локализуется в области пространства с субволновыми размерами. В настоящей работе предложена модификация известных принципов построения оптической ловушки в поле стоячей волны, заключающаяся в том, что излучение (не сфокусированное) падает на диэлектрическую частицу со специальными свойствами, позволяющими сформировать фотонную струю в режиме «на отражение» [12–15].

Фотонная струя в режиме на отражение моделировалась с помощью численного решения уравнений Максвелла, описывающих падение плоского волнового фронта излучения с длиной волны 671 нм на диэлектрик (SiO₂)

И.В.Минин, О.В.Минин. Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Россия, 630108 Новосибирск, ул. Плеханова, 10; e-mail: Prof.minin@gmail.com

V.Pacheco-Peña, M.Beruete. Universidad Pública de Navarra, Pamplona, Spain

Поступила в редакцию 19 ноября 2015 г.

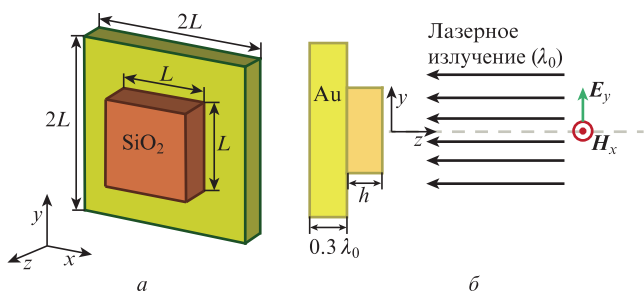


Рис.1. Мишень для формирования оптической ловушки на основе фотонной струи (а) и схема ее облучения (б).

с показателем преломления 1.46. Толщина h диэлектрической пластины, расположенной на металлическом (золотом) экране, составляла 1 мкм, а сторона квадрата $L = 3.17$ мкм (рис.1).

На рис.2 показана фотонная струя, сформированная при отражении плоской (не сфокусированной) волны от плоского экрана с расположенной на нем квадратной диэлектрической пластиной, находящейся в воздухе (длина фотонной струи в данном примере по уровню половины мощности составляет 15 длин волн падающего излучения) и в воде (показатель преломления 1.3337). На рис.3 приведено распределение интенсивности поля вдоль оси фотонной струи. На рис.2 и 3 отчетливо видны осцилляции интенсивности поля вдоль направления распространения излучения, максимумы которых соответствуют пучностям стоячей волны, образованной в результате интерференции падающей и отраженной световых волн. Микрочастица будет локализована в пучностях такой ловушки. Увеличение показателя преломления среды (сни-

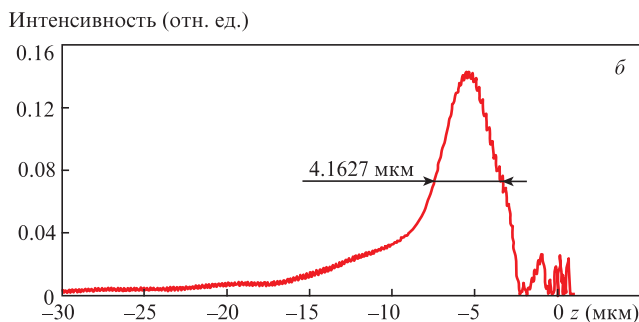
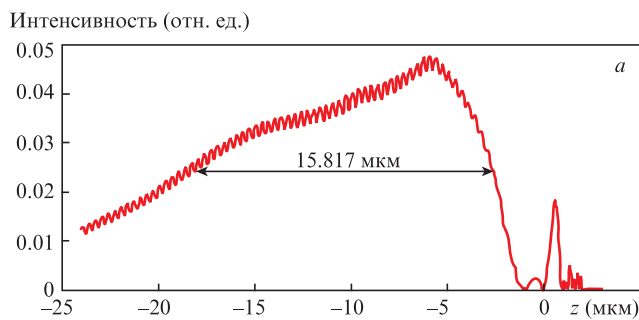


Рис.3. Распределение интенсивности поля вдоль оси фотонной струи в воздухе (а) и в воде (б). Металлический экран находится справа (при $z = 0$), излучение (плоский фронт) падает слева.

жение оптического контраста) приводит к уменьшению длины формируемой фотонной струи при увеличении максимальной интенсивности поля в струе (в данном случае почти в три раза) и к уменьшению пространственного периода осцилляций интенсивности поля вдоль струи.

В отличие от известных схем, в предлагаемом варианте построения субволновой оптической ловушки мини-

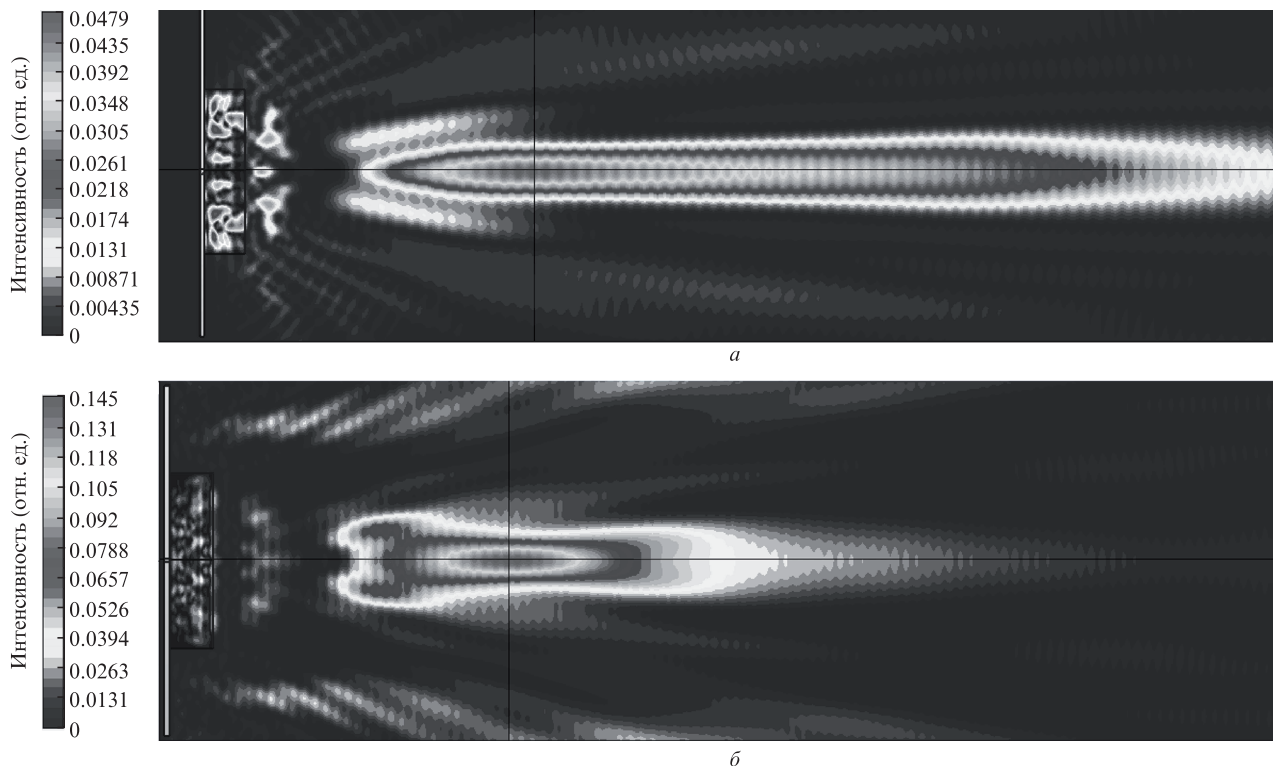


Рис.2. Формирование фотонной струи, промодулированной пучностями стоячей волны, в режиме на отражение в воздухе (а) и в воде (б). Цветной вариант рис.2 дан на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

мальный размер области фокусировки определяется не параметрами линзы (и лазерного пучка), а шириной формируемой фотонной струи. Уменьшение размера перетяжки фотонной струи по сравнению с размером перетяжки сфокусированного линзой лазерного пучка приводит к увеличению плотности энергии в области фокусировки. При этом поворотом отражающего экрана или/и изменением направления падения излучения на него достигается пространственное перемещение частицы. Поскольку функциональные возможности оптических пинцетов во многом определяются пространственной структурой оптических ловушек и степенью фокусировки излучения, методы оптического управления, основанные на применении фотонных струй, позволяют превысить дифракционный предел при оптической локализации и открывают новые возможности в оптической сортировке частиц. Предложенный подход к построению субволновой оптической ловушки позволяет стабилизировать положение микрочастицы на известных расстояниях от поверхности и значительно повысить точность измерений ее локализации.

1. Ashkin A. US Patent No.370279. H01S 3/06, 3/09 (09.01.1973).
2. Ghislain L.P., Webb W.W. *Opt. Lett.*, **18**, 1678 (1993).
3. Zemanek P. et al. *Opt. Commun.*, **151**, 273 (1998).
4. Zemanek P., Jonas A., Sramek L., Liska M. *Opt. Lett.*, **24**, 1448 (1999).
5. Jonás A., Zemánek P., Florin E.-L. *Opt. Lett.*, **26**, 1466 (2001).
6. Neild A., Wah Ng T., Shen Yii W. *Opt. Express*, **17** (7), 5321 (2009).
7. Шилкин Д.А., Любин Е.В., Соболева И.В., Федянин А.А. *Письма в ЖЭТФ*, **98** (10), 720 (2013).
8. Ashkin A., Dziedzic J.M. *Phys. Rev. Lett.*, **54** (12), 1245 (1985).
9. Neild A., Oberti S., Radziwill G., Dual J. *Biotechnol. Bioeng.*, **92**, 8 (2007).
10. Neild A., Oberti S., Dual J. *Sens. Actuators B*, **121**, 452 (2007).
11. Novotny L., Bian R.X., Xie S.X. *Phys. Rev. Lett.*, **79**, 645 (1997).
12. Минин И.В., Минин О.В. *Вестник НГУ. Сер. Информационные технологии*, **12** (4), 59 (2014).
13. Minin I.V., Minin O.V., Geintz Y.E. *Ann. Phys.*, **527** (7-8), 491 (2015).
14. Minin I.V., Minin O.V., Pacheco-Peña V., Beruete M. *Opt. Lett.*, **40** (10), 2329 (2015).
15. Минин И.В., Минин О.В. *Труды V Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике* (М., НИЯУ «МИФИ», 2016, с. 131, 132).