

УДК 535.3+535.8:535.214

С. В. СОЛОНЕВИЧ, В. Е. ЛЕПАРСКИЙ, А. Г. МАЩЕНКО, А. А. РЫЖЕВИЧ

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ СВЕТОВОЙ БИЛОВУШКИ*Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси**(Поступила в редакцию 27.02.2015)*

Введение. Изначально лазерные пинцеты (твизеры) использовались в качестве инструментов для манипуляции одиночными частицами с помощью градиентных сил [1]. По мере совершенствования научного подхода и усложнения технических средств стало возможным оперировать комплексами (ансамблями) микрочастиц [2]. Одной из актуальных задач является обеспечение возможности одновременного позиционирования двух частиц относительно друг друга с целью поворота, соединения или, наоборот, разъединения, разделения. Нами предложен метод формирования оптической ловушки, позволяющей производить одновременное манипулирование парой микрочастиц путем их вращения относительно точки на соединяющем их отрезке, а также изменения расстояния между ними.

1. Разработка и экспериментальная реализация метода формирования оптической ловушки для одновременной манипуляции двумя микрочастицами. В контексте поставленной задачи одновременной манипуляции двумя частицами и имеющихся ресурсов был признан оптимальным метод формирования световой ловушки с двумя пиками интенсивности из лазерного бипучка. Известно, что Фурье-образом идеального бипучка являются две точки. На практике это означает, что бинарный световой пучок, состоящий из парциальных компонент (которые распространяются под некоторым углом друг к другу) и прошедший через положительную линзу, в фокусной плоскости этой линзы будет представлять собой световое поле с двумя пиками интенсивности.

Для одновременной манипуляции двумя микрочастицами нами была разработана и смонтирована экспериментальная установка в горизонтально-вертикальной компоновке, схема которой показана на рис. 1. Установка состоит из источника лазерного излучения 1: собирающих сферических линз 2 и 3, образующих телескопическую систему; равноугольной бипризмы Френеля 4 в качестве рефрактивного оптического элемента; механического узла 5, обеспечивающего возможность ее плавного контролируемого вращения вокруг оси симметрии падающего на нее светового пучка и закрепленного на механическом узле 6, с помощью которого осуществляется плавное контролируемое перемещение бипризмы Френеля 4 вдоль оси симметрии лазерного пучка; собирающей линзы 7; первого поворотного зеркала 8; кюветы 9 с прозрачным для используемого лазерного излучения дном, содержащей суспензию микрочастиц; микроскопа 10; второго поворотного зеркала 11; системы наблюдения 12 и механического узла 13 для смещения линии пересечения наклонных граней закрепленной в этот узел бипризмы Френеля 4, который установлен на механическом узле 5.

Световая билловушка работает следующим образом. Источник лазерного излучения 1 формирует слаборасходящийся когерентный световой пучок с аксиально симметричным распределением интенсивности, который направляют на телескопическую систему. Она состоит из линз 2 и 3, между которыми располагают равноугольную бипризму Френеля 4 в качестве рефрактивного оптического элемента (на рис. 1 f_1 и f_2 – фокусные расстояния линз 2 и 3 соответственно). При необходимости управления одинаковыми по размеру и поляризуемости микрочастицами ось симметрии светового пучка должна проходить через линию пересечения наклонных граней бипризмы

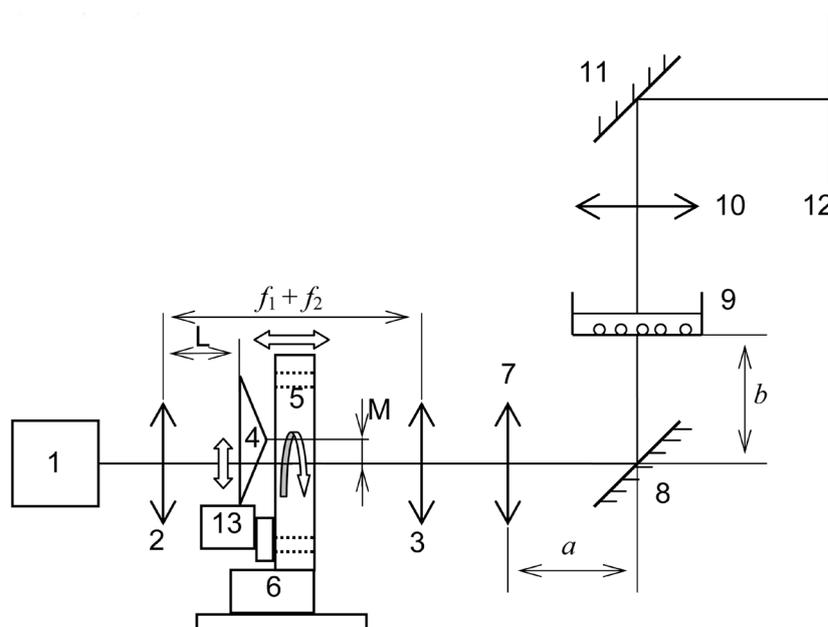


Рис. 1. Оптическая схема экспериментальной установки для одновременного манипулирования парой микрочастиц с помощью перестраиваемого двухпикового лазерного поля

Френеля 4. Посредством пропускания светового пучка через телескопическую систему, внутри которой находится бипризма Френеля 4, формируют бинарный (т. е. двухкомпонентный) световой пучок (БП) с углом расхождения компонент, зависящим от положения бипризмы Френеля 4 относительно системы линз 2 и 3. В случае, если телескоп расширяющий (фокусное расстояние у линзы 2 меньше, чем у линзы 3), при смещении бипризмы Френеля 4 от линзы 2 к линзе 3 с помощью механического узла 6 угол расхождения формируемого БП увеличивается и, соответственно, наоборот. Линза 7 в своей фокусной плоскости (на рис. 1: a – расстояние от линзы 7 до зеркала 8; b – расстояние от зеркала 8 до кюветы 9; $a + b = F$, F – фокусное расстояние линзы 7) формирует из перестраиваемого по углу расхождения БП Фурье-образ в виде двух световых пятен-пичков (в идеале точек), расстояние между центрами которых зависит от угла расхождения БП. С помощью поворотного зеркала 8 сфокусированный БП в виде двухпикового поля направляют вертикально вверх на суспензию микрочастиц, находящуюся в кювете 9 с прозрачным дном. При уменьшении угла расхождения БП пички сближаются, двигаясь к вертикальной части оптической оси устройства, при увеличении – раздвигаются по направлению от оси. При повороте элемента 4 вокруг горизонтальной части оптической оси устройства с помощью узла 5, световые максимумы интенсивности в виде двух пичков тоже поворачиваются на такой же угол вокруг вертикальной части оптической оси устройства. Изменяя взаимную ориентацию пичков и расстояние между ними в фокусной плоскости линзы 7, выбирают такое положение пичков, при котором их центры совпадают с центрами двух микрочастиц, предназначенных для манипулирования. При перемещении пичков они за счет градиентных сил увлекают втянутые в них частицы за собой. Таким образом, при раздвигании пичков от центра частицы одновременно перемещаются от оптической оси устройства; при сдвигании пичков от периферии к центру – частицы перемещаются к оптической оси вплоть до совмещения, если это необходимо; при вращении бипризмы 4 пички и захваченные в них частицы изменяют взаимную ориентацию.

Проходящее сквозь кювету 9 с суспензией микрочастиц излучение пропускают через микроскоп 10 для формирования изображения микрочастиц, которое затем с помощью поворотного зеркала 11 направляют на систему наблюдения 12. В качестве последней выступает экран либо иное визуализирующее, регистрирующее или транслирующее изображение устройство, например CCD-, видео- или фотокамера. В случае, если частицы различаются по размерам и/или поляризуемости, из-за чего одинаковые пички интенсивности обеспечивают частицам различные максимальные скорости перемещения, с помощью механического узла 13 производят смещение

линии пересечения наклонных граней бипризмы Френеля 4 от оси симметрии светового пучка, изменяя максимальные значения интенсивности в пиках двухпикового светового поля и добиваясь тем самым выравнивания максимальных скоростей движения частиц под действием градиента интенсивности в пичке. При необходимости манипулирования только одной частицей с помощью механического узла 13 производят полное перераспределение световой энергии в один световой пичок, захватывают им частицу и перемещают ее в нужном направлении.

Материальная база экспериментальной установки была скомплектована для преобразования лазерного излучения с длинами волн 0,633 мкм, однако она годится и для излучения других длин волн при наличии на входных и выходных поверхностях оптических элементов соответствующих просветляющих покрытий.

2. Особенности электрического поля перестраиваемой световой биловушки. Нами исследовано световое поле, являющееся биловушкой, и подтверждена возможность изменения ориентации его световых максимумов и расстояния между ними. Изменение ориентации пиков интенсивности производится путем поворота бипризмы вокруг оси, совпадающей с осью симметрии падающего на нее светового пучка, а изменение расстояния между пиками – путем перемещения держателя с бипризмой вдоль оси симметрии светового пучка. Поворот бипризмы и продольное перемещение держателя с бипризмой выполнялись посредством вращения рукояток держателей вручную. Однако эти операции могут быть автоматизированы с применением соответствующих моторизованных кареток и держателей, что позволит избежать нежелательных механических искажений схемы в результате прикосаний к рукояткам держателей. Тем не менее даже вручную и поворот, и изменение расстояния между пиками световой биловушки могут производиться очень плавно и с большой точностью. Применявшиеся нами держатели обеспечивали точность поворота 10 угловых минут и изменение расстояний между пиками с точностью порядка 0,1 мкм.

Нами были измерены распределения интенсивности в поперечных сечениях двухпикового поля, зарегистрированные при различных положениях бипризмы относительно системы линз 2 и 3. При выбранных нами параметрах оптических элементов расстояние между пиками может достигать нескольких миллиметров. Это означает, что можно одновременно изменять взаимное положение частиц, находящихся даже на таком сравнительно большом расстоянии. При увеличении смещения L расстояние между пиками интенсивности света монотонно и равномерно увеличивается. На рис. 2 показаны сечения двухпикового поля, зарегистрированные с микроскопом. Пики интенсивности в сечении имеют округлую форму и слабо изменяются при изменении расстояния между ними.

Важно знать, как изменяется максимальное значение интенсивности в пике при увеличении его диаметра. При большем увеличении видно, что распределение интенсивности в обоих пичках близко к гауссову, но имеется еще слабый побочный максимум интенсивности в форме кольца, окружающего основной пик.

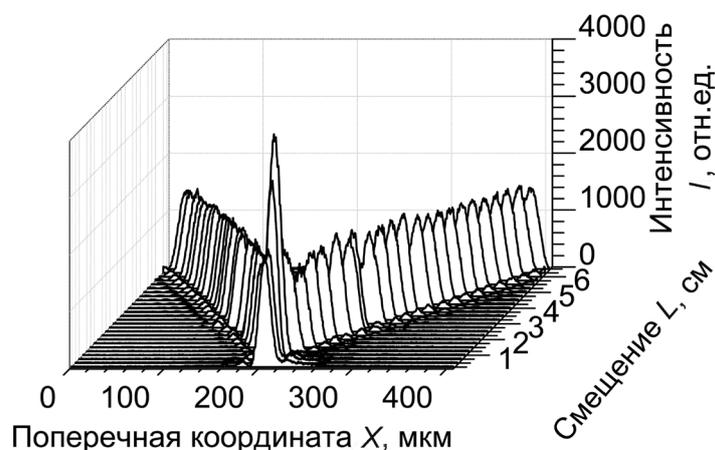


Рис. 2. Зависимость распределения интенсивности на отрезке, соединяющем пики интенсивности двухпикового светового поля от смещения бипризмы

Из распределения на рис. 2 хорошо видно, что при изменении расстояния между пиками максимальное значение интенсивности практически не изменяется за исключением того момента, когда два пика сходятся в один. Расстояние между пиками интенсивности растет линейно с увеличением смещения L при очень слабом изменении максимального значения интенсивности в пиках. Смещение бипризмы на 1 мм приводит к изменению расстояния между пиками примерно на 60 мкм. Поскольку смещать бипризму даже в пределах одного миллиметра технически возможно очень плавно, то и варьировать расстояние между пиками интенсивности двухпикового светового поля можно с большой точностью. Так, при точности смещения бипризмы 10 мкм изменение расстояния между пиками достигается с точностью 0,6 мкм. Можно увеличить точность перемещения пиков, применяя бипризму с меньшим углом между наклонной плоскостью и ее основанием. При этом пропорционально уменьшится максимальное расстояние, на которое будет возможно расставить пики.

Нами были построены инвертированные зависимости интенсивности в плоскости, проходящей через оптическую ось установки и пики интенсивности биловушки, от продольной координаты при трех различных расстояниях между пиками (рис. 3, *a*). При любом расстоянии между пиками при увеличении продольной координаты вначале происходит плавный рост, а затем уменьшение пикового значения интенсивности в обоих пиках биловушки (продольная координата Z соответствует расстоянию от линзы 7, показанной на рис. 1, по оптической оси схемы до места регистрации светового поля). Данное распределение использовано для построения карты градиентов интенсивности в локальных максимумах биловушки. Независимо от расстояния между пиками, карты градиентов имеют одинаковый вид. На рис. 3, *б* приведена карта проекций градиентов на секущую плоскость для случая $L = 2$ мм. Область распределения, по которому строились масштабированное распределение и карта градиентов интенсивности при $L = 2$ мм, выделена рамкой на рис. 3, *a*. Вследствие масштабирования с целью лучшей визуализации проекции градиентов

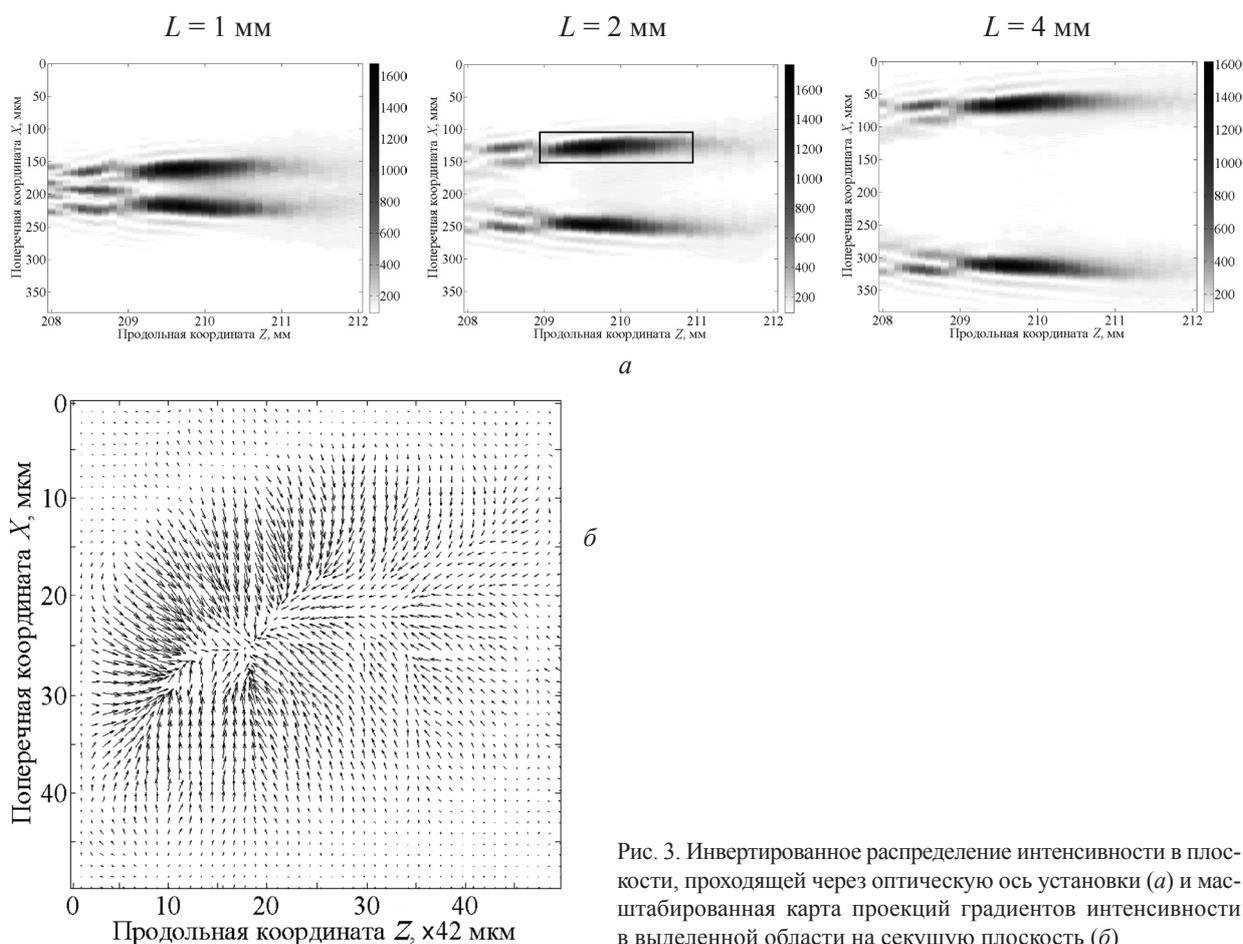


Рис. 3. Инвертированное распределение интенсивности в плоскости, проходящей через оптическую ось установки (*a*) и масштабированная карта проекций градиентов интенсивности в выделенной области на секущую плоскость (*б*)

интенсивности в направлении продольной оси Z увеличены в 42 раза относительно проекций градиентов в направлении горизонтальной оси X .

Из рис. 3, б следует, что продольный градиент существует наряду с поперечным, хотя и слабее в десятки раз. Однако само его наличие можно использовать для отрыва микрочастиц от дна кюветы либо наоборот – для их прижимания во избежание ухода из плоскости наблюдения. При необходимости продольный градиент может быть усилен путем применения в качестве фокусирующей линзы 5 объектива с более коротким фокусным расстоянием. При этом дно кюветы может быть смещено относительно фокусной плоскости объектива с целью уменьшения поперечного градиента.

Поскольку иногда необходимо одновременно манипулировать частицами с отличающимися параметрами, актуальной является задача формирования пиков с различными градиентами интенсивности в билувушке. В связи с этим нами исследована возможность контролируемого перераспределения световой энергии между пичками билувушки.

Для перераспределения энергии между пичками бипризмы 4 устанавливается на механический узел 13, обеспечивающий контролируемое смещение бипризмы относительно оси падающего на нее пучка в пределах видимого диаметра пучка с точностью 5 мкм.

На рис. 4 показаны инвертированные распределения интенсивности в плоскости, проходящей через пики билувушки, при различных смещениях M бипризмы 4 в направлении, перпендикулярном ее ребру, в плоскости, перпендикулярной оси начального пучка, в диапазоне 0,00–0,50 мм и различных смещениях L бипризмы от фокуса линзы 2. Смещение M отсчитывается от оптической оси схемы (см. рис. 1), т. е. $M = 0$ мм при совмещении ребра бипризмы с осью. Из рис. 4 видно, что чем ближе находятся пики, тем быстрее осуществляется перераспределение энергии между ними при смещении L , поэтому точное распределение энергии между пиками удобнее

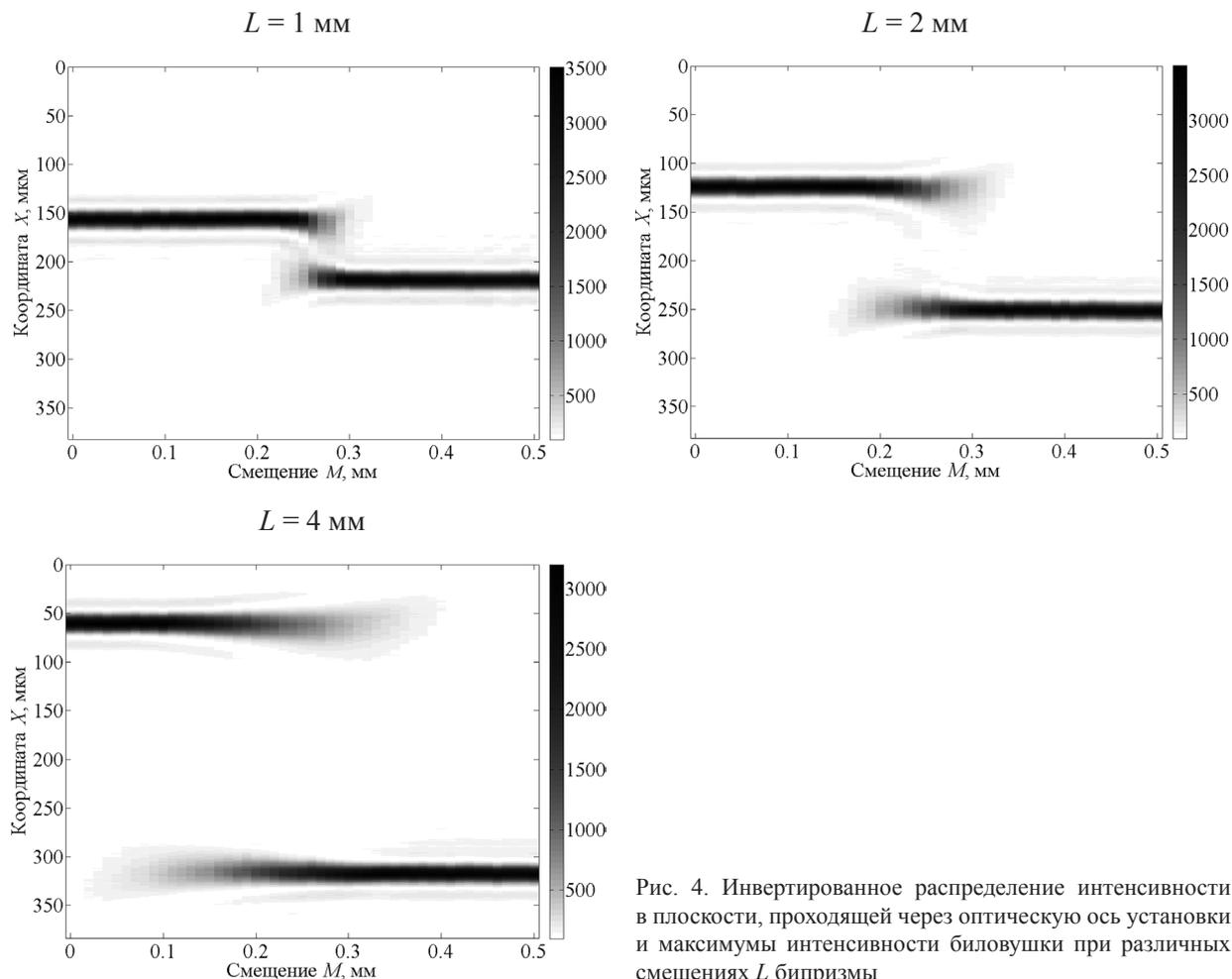


Рис. 4. Инвертированное распределение интенсивности в плоскости, проходящей через оптическую ось установки и максимумы интенсивности билувушки при различных смещениях L бипризмы

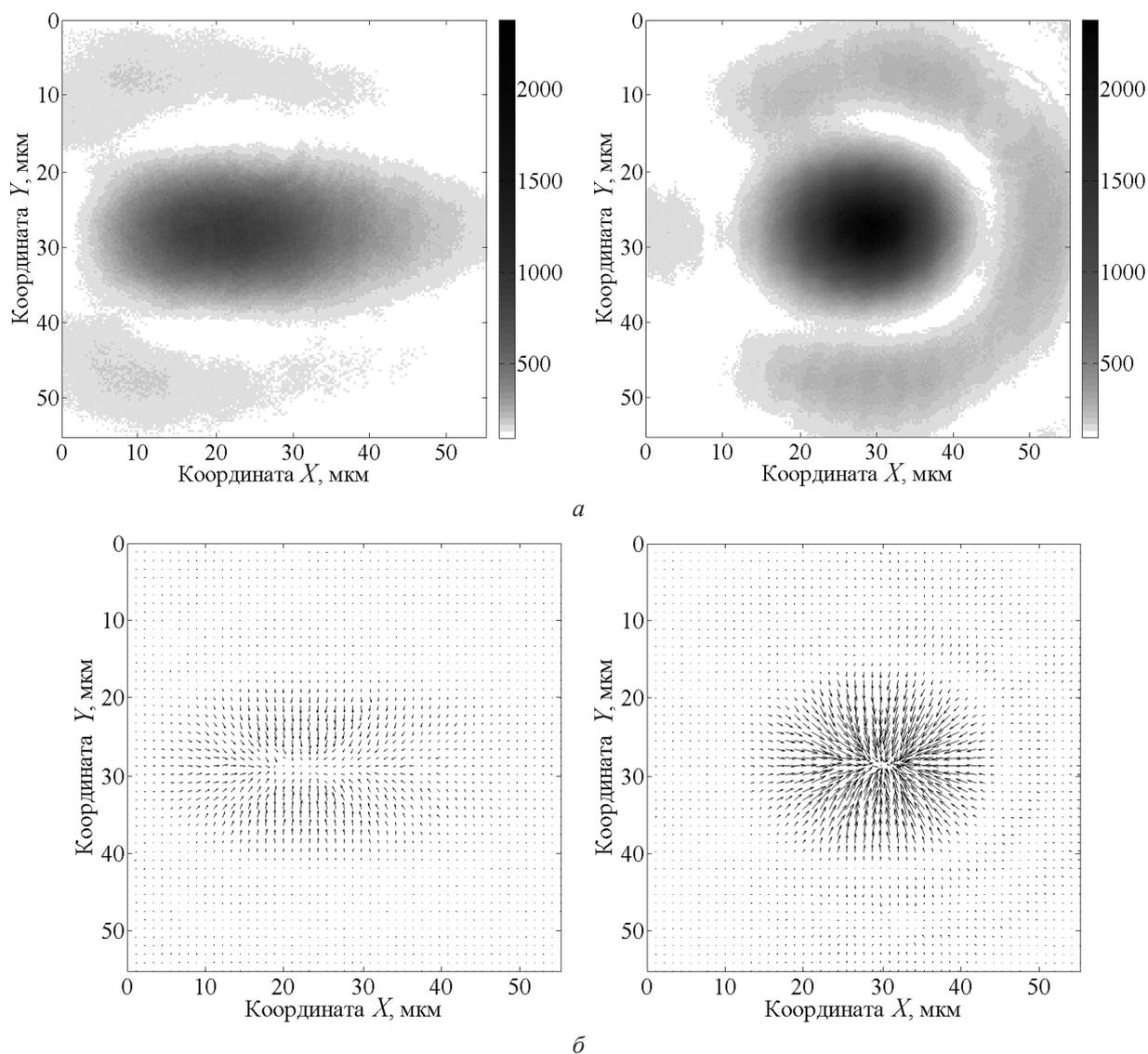


Рис. 5. Инvertированные распределения интенсивности в пиках билувушки (а) и карты поперечных градиентов интенсивности для них (б)

производить при больших расстояниях между пичками. Кроме того, из рис. 4 видно, что независимо от расстояния между пичками поперечный размер максимума интенсивности тем меньше, чем больше он содержит энергии, и, соответственно, наоборот.

Поскольку при перераспределении энергии между пичками билувушки изменяется и их поперечный размер, смещение M бипризмы оказывает сильное влияние на поперечные градиенты интенсивности. На рис. 5 приведены для сравнения карты поперечных градиентов интенсивности (рис. 5, б) для пиков билувушки (рис. 5, а), существенно отличающихся друг от друга по интенсивности (при $L = 2$ мм, $M = 0,27$ мм). Рамками показаны области поперечного сечения, по которым строились сравнительные карты градиентов.

Из рис. 5 следует, что при перераспределении интенсивности в областях вблизи максимумов интенсивности градиенты интенсивности в более высоких пиках могут превышать в 3–4 раза градиенты интенсивности менее высоких пиков. При этом на периферии пиков градиенты интенсивности примерно одинаковы. Этот факт говорит о том, что перераспределяя энергию между пичками, можно добиться более эффективного использования оптической билувушки для манипулирования частицами с отличающимися параметрами, например большей по размерам и меньшей, с большим показателем преломления и с меньшим. Так, для захвата меньших частиц лучше применять более узкие и интенсивные пики, а для крупных – менее интенсивные и более широкие.

Заключение. Все оптические элементы, использованные в предложенной схеме для формирования двухпикового светового пучка, пригодны для преобразования мощного лазерного излучения, особенно при наличии на входных и выходных поверхностях просветляющего покрытия. Благодаря этим фактам вполне реализуема выдвинутая нами идея одновременной транспортировки двух микрочастиц с помощью бипучка с переменным расстоянием между максимумами интенсивности.

Предложенный и реализованный экспериментально метод формирования перестраиваемой световой билловушки позволит манипулировать одновременно двумя микрочастицами с достаточно высокой точностью. Метод является очень высокоэффективным, поскольку при преобразовании оптического излучения его энергия практически не теряется, если рабочие поверхности оптических элементов просветлены на применяемой длине волны. Поскольку световые максимумы формируемого двухпикового светового поля имеют микроскопические размеры, оно может использоваться не только для управления микро- и наночастицами, но и в высокоразрешающей микроскопии, а также для неразрушающего оптического контроля толщины покрытий и для прецизионной лазерной обработки материалов, в том числе металлов.

Проведенные исследования показали, что при изменении расстояния между пичками оптической билловушки распределение интенсивности в них практически не изменяется. Максимумы интенсивности в билловушке являются трехмерными, т. е. поле имеет не только поперечный, но и продольный градиент интенсивности. Вблизи фокусной плоскости фокусирующей линзы продольный градиент интенсивности в десятки раз меньше, чем поперечный, однако при использовании фокусирующего оптического элемента с меньшим фокусным расстоянием и размещении рабочей области кюветы на некотором расстоянии от фокусной плоскости можно изменить соотношение градиентов в пользу продольного. Возможно использовать продольные градиенты билловушки с целью отрыва микрочастиц от дна кюветы либо наоборот для прижимания их ко дну, с целью фиксации частиц в определенной плоскости наблюдения. Путем контролируемого смещения би-призмы относительно оси падающего на нее света в пределах видимого диаметра этого пучка можно плавно и контролируемо перераспределять энергию между пичками формируемого двухпикового светового поля билловушки. При увеличении интенсивности пичка происходит также уменьшение его поперечного размера, что сказывается на распределении поперечных градиентов интенсивности. Перераспределяя энергию между пичками, можно более эффективно управлять парой микрочастиц, имеющих различные показатели преломления и размеры. Полученные результаты подтвердили хорошие эксплуатационные качества разработанного метода формирования оптической билловушки.

Литература

1. *Ashkin A.* // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. Physics. 1997. Vol. 94. P. 4853–4860.
2. *Рубинов А. Н., Катаркевич В. М., Эфендиев Т. Ш.* // Журн. прикладной спектроскопии. 2003. Т. 70, № 5. С. 663–666.

S. V. SOLONEVICH, V. E. LEPARSKII, A. G. MASHCHENKO, A. A. RYZHEVICH

METHOD FOR TUNABLE LIGHT BITRAP SHAPING

Summary

We developed a method for tunable light bitrap shaping meant for a simultaneous manipulation of two particles. The method is based on the light bibeam with a tunable angle between propagation directions of its components. We proposed, assembled, and tested experimentally an optical scheme for realization of the method. The method is suitable for the transformation of powerful laser radiation because all optical elements in the scheme have high light beam strength. The method is very effective since light energy losses occur only during reflections on input and output sides of optical elements. These losses can be reduced to a fraction of a percent by an anti-reflecting coating for the used wavelength on the sides of optical elements. The possibility of an energy redistribution between trap peaks permits one to conduct effectively with a pair of microparticles having different refraction indices and sizes. Light intensity maxima of the shaped bipeak light field are microscopic in size, since it can be used not only for manipulation of micron and submicron particles, but for high-resolution microscopy, for nondestructive testing of a coating thickness, and for precision laser processing of materials, including metals.