

МОДИФИКАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКОЙ ЛОВУШКИ

Скиданов Р.В.¹, Рыков М.А.^{1,2}, Инначионе Г.С.³, Кривошлыков С.Г.⁴

¹ Институт систем обработки изображений РАН,

² Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет),

³ Worcester Polytechnic Institute,

⁴ ANTEOS, Inc. Shrewsbury, MA

Аннотация

В статье рассматривается модификация оптического пучка, используемого для оптического захвата биологических микрообъектов. Предложено более эффективное распределение интенсивности в виде полумесяца. Для предложенного распределения изготовлен ДОО, экспериментально оценена его дифракционная эффективность. Приводятся теоретические оценки силовых характеристик пучков-полумесяцев, а также результаты экспериментов по оптическому захвату с использованием таких пучков.

Ключевые слова: оптический захват и манипуляции, модификация лазерных пучков, биологические объекты, ДОО.

Введение

Оптический пинцет – весьма тонкий и точный инструмент, действие которого основано на использовании светового давления. Он применяется для широкого спектра исследований, но особое распространение получил в области цитологии и микробиологии, где его способность манипулировать отдельными клетками нашла наиболее широкое применение. Первые исследования на эту тему были выполнены Ашкиным в 1986 году ([1–2]). Особыми преимуществами оптического пинцета является отсутствие контакта при манипулировании, большая точность приложения сил порядка пкН, отличная совместимость с жидкими средами.

Манипулирование отдельными клетками играет важную роль в задачах оплодотворения *in vitro*, междуклеточных взаимодействий, слияния клеток, эмбриологии, микробиологии, исследования стволовых клеток и регенерационной медицины. Исследования поведения отдельных клеток дают информацию о химических внутриклеточных взаимодействиях, механических свойствах клеток, позволяют проводить исследования электромагнитных свойств материала клеток.

Несмотря на огромное количество преимуществ перед контактными техниками, оптический захват, тем не менее, может привести к повреждению захватываемого биоматериала [3], что в ряде случаев является крайне нежелательным эффектом.

Повреждение биологических микрообъектов продолжает оставаться наибольшей трудностью, сдерживающей развитие технологии оптического пинцета. Основная причина повреждений также остаётся не до конца выясненной. В качестве возможных называются мультифотонная абсорбция [4], образование свободных атомов кислорода [5] и поглощение тепла раствором, окружающим фокус лазера [6].

Исследование Мирсаидова и его коллег [7] детально рассматривает проблемы фотоповреждения захватываемого биоматериала на примере бактерий

E. coli. Сравнивая множественные ловушки с разделением по времени и множественные ловушки на основе «holographic optical tweezers» HOT (аналогичные техники применяются достаточно широко, см., например, [8], [9]), авторы приходят к выводу, что в обоих случаях основную роль играет суммарно поглощённая клеткой энергия. Результаты этого исследования показывают, что критическим для клетки *E. coli* является количество энергии в 5 Дж.

Суммируя различные исследования и различные рассмотренные в них факторы повреждения, можно сказать, что минимизировать эти повреждения можно выбирая правильную длину волны лазера – чтобы избежать излишнего поглощения, следя за временем экспозиции биологического материала внутри оптической ловушки и по возможности ограничивая мощность излучения, рассеиваемую на объекте. Кроме того, основная опасность повреждения заключается не столько в разрушении и смерти клетки (обычно мощность и длина волны захватывающего лазера такова, что гибель клетки наступает только через десятки минут), сколько в генетическом повреждении, а также распределении этого излучения внутри самой клетки. Так, например, повреждение ядра клетки будет влиять на её жизнеспособность гораздо сильнее, чем повреждение менее значимых органелл.

Различные модификации лазерного пучка, используемого для захвата, являются предметом неослабевающего интереса со стороны исследователей. Существующую литературу по этой теме можно классифицировать по двум критериям: цели модификации пучка и динамичности используемого ДОО. Основных целевых направлений модификации два: создание систем оптических ловушек, позволяющих захватывать и манипулировать сразу несколькими частицами, и наделение пучка некоторыми специальными свойствами. Используемый при этом ДОО может быть либо динамическим (так называемые HOT), либо статическим – микрорельефом на прозрачной пластинке или оптоволокне (см.,

например, [10]). Разумеется, цель модификации зачастую определяет, должен ли используемый ДОЭ быть динамическим. Динамические ДОЭ обычно управляются с ЭВМ и могут быть легко изменены в режиме реального времени, что является их огромным преимуществом. Процесс изготовления статических ДОЭ, в то же время, весьма сложен и на большинстве своих этапов необратим. С другой стороны, энергетическая эффективность динамических ДОЭ – модуляторов – невелика и составляет порядка 15%, поэтому статические ДОЭ предпочтительнее, если не предполагается динамического изменения профиля пучка.

Ярким представителем серии исследований оптического захвата с использованием оптического модулятора является работа под руководством Морради [11], где показана возможность создания множественных ловушек с помощью динамических ДОЭ с контролем силы захвата в каждой элементарной ловушке. Похожая работа была выполнена несколько ранее Эмилиани и его коллегами [12].

Особые свойства захватывающего пучка тоже имеют различные назначения. Во-первых, подобные модификации вносятся, чтобы добиться более устойчивого захвата или фиксированной ориентации захваченных объектов. В этом случае сечение пучка обычно сравнимо с размером захватываемого объекта. Во-вторых, отличные от гауссова распределения создаются для сортировки или конвейерного перемещения захваченных частиц в пространстве. Это позволяет осуществлять оптические манипуляции при неподвижном пучке.

В качестве модификаций первого из перечисленных типов часто используются различные суперпозиции мод свободного пространства. Так, например, различные порядки мод Гаусса–Лаггера используются для управления ориентацией и вращением захваченных частиц, как это было показано, например, в [13] и [14]. Особенный интерес вызывают так называемые «оптические бутылки» – пучки, поперечное распределение интенсивности которых имеет обширные области с нулевой интенсивностью. В работе [15] представлен новый тип пучков – пустые гиперсинус-гауссовы пучки, образующие в точке перетяжки чётко выраженное кольцо. Олсон и его коллеги разработали метод получения «оптических тоннелей», используя генетические алгоритмы для нахождения коэффициентов при сферических функциях, в суперпозиции дающих необходимое распределение [16].

В [17] были изучены свойства пучка, являющегося суперпозицией двух аксиконов с противоположными порядками. Было отмечено, что пучок может служить для захвата объектов определённого размера, поскольку захват становился возможным лишь начиная с определённого размера, зависящего притом от порядка выбранных аксиконов.

Моды могут совмещаться не только в фокальной плоскости, но и более сложно. Разработанная в [18]

композиция с небольшим смещением гауссова пучка и моды Гаусса–Лаггера (1, 1) образует похожее в продольном сечении на подкову распределение интенсивности.

Иногда уже существующие распределения подвергаются небольшим модификациям при помощи фазовых ДОЭ. К примеру, в работе [19] изучались пучки Лоренцо–Гаусса и оценивалось их возможное применение для оптического захвата. Было показано, что лоренц-гауссовы пучки при захвате объекта перед фокальной плоскостью обеспечивают большую устойчивость захвата.

Наконец, очень важным применением статических ДОЭ являются различные оптические конвейеры – распределения интенсивности, которые перемещают все захваченные частицы в определённом направлении, и фильтры – распределения интенсивности, захватывающие частицы только одного типа (одной формы, одной плотности, одного размера и т.д.). В таких схемах энергетическая эффективность оптических элементов часто играет большую роль. В качестве примера можно привести [20]. Отметим, однако, что в самой работе используются модуляторы – ДОЭ в этом исследовании используются для создания комбинаций оптических ловушек, позволяющих контролировать сбор частиц и их дальнейшее пространственное распределение. Можно также в качестве примера привести использование вихревых световых полей для перемещения микрообъектов по заданным траекториям без перемещения самого пучка [21–23].

Наконец, некоторые модификации пучка не требуют ни сложных модуляторов, ни дорогих в изготовлении ДОЭ. В работе [24] представлено изящное в своей простоте решение, позволяющее менять жёсткость ловушки простым изменением выходного зрачка объектива, проецирующего пучок в предметную плоскость. Показано, что профиль потенциальной ямы вблизи максимума интенсивности пучка сильно зависит от формы апертуры.

Настоящая работа посвящена модификации используемого для захвата оптического пучка таким образом, чтобы снизить входную мощность пучка и одновременно обеспечить такое распределение интенсивности в фокальной плоскости, чтобы большая часть излучения пришлась на периферию захватываемого биологического объекта. Генетическая информация, повреждения которой следует избегать сильнее всего, находится в ядре, которое, в свою очередь, чаще всего располагается вблизи геометрического центра ядра. Для выбранного нами в качестве объекта эксперимента вида дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* это верно в подавляющем большинстве случаев, что видно из исследования [25].

В данной работе для формирования распределения интенсивности в лазерном пучке используется статический микрорельеф на кварцевой пластинке, а для теоретической оценки динамики внутри оптической ловушки – многолучевая геометрическая оптика.

1. Модификация гауссова пучка с целью оптимизации силовых характеристик оптической ловушки

Промоделируем поле сил, действующих на сферический объект радиусом 5 мкм, помещённый в гауссов пучок. Теоретические основы такого расчёта были изложены в работах [26] и [27] и там же подтверждены экспериментом. Для моделирования использовался программный комплекс, описанный в [28], который позволяет рассчитывать силы, действующие в световом пучке на неоднородный эллипсоидальный микро-объект. Моделирование основано на законах геометрической оптики, что, хотя и даёт довольно значительную погрешность при вычислениях, обеспечивает эффективность вычислений, позволяющую быстро оценить продуктивность изучаемого пучка.

В ходе моделирования пучок представляется в виде большого количества лучей, интенсивность и направление которых определяются фазоамплитудными характеристиками пучка. Далее прослеживается путь каждого луча сквозь модель клетки и на разделах сред вычисляется сила воздействия луча согласно (3).

Результаты моделирования показывают, что силы оптического захвата достигают максимума, если объект несколько смещён относительно центра пучка (точки (0, 0) на рис. 1).

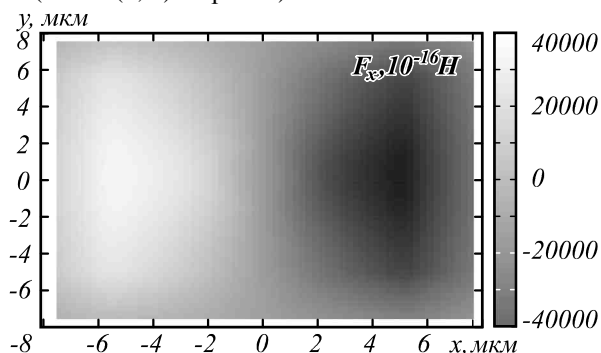


Рис. 1. Поле x-составляющей силы, действующей на сферический объект радиусом 5 мкм со стороны гауссова пучка

Очевидно, что можно найти такую форму светового пучка, которая при той же мощности излучения будет обеспечивать большее значение силы в направлении одной из осей в плоскости сечения пучка (например, вдоль оси x), чем гауссов пучок.

Для этого будем деформировать пучок специальным образом.

Пусть исходный гауссов пучок имеет радиус a . Модифицируем пучок таким образом, чтобы эквивалентными кривыми пучка стали замкнутые кривые, образованные из дуг двух окружностей разного радиуса, расположенных с небольшим смещением (см. рис. 2).

В качестве параметра, определяющего величину изгиба, можно выбрать $d=t_1 \times a$ – координату пересечения дуги с осью y . Саму дугу вспомогательной окружности можно задать уравнением $y=c(x)$. Такое

распределение амплитуды будет иметь форму полумесяца и может быть описано формулами:

$$A(x, y) = \exp\left(\frac{-x^2}{a^2}\right) \times \exp\left(-\frac{(y - c(x) - t_3 \times a)^2}{(t_2 \times a)^2}\right);$$

$$c(x) = \sqrt{r^2 - x^2} - r + d;$$

$$r = \frac{a}{2} \times \left(\frac{1 + t_1^2}{t_1}\right).$$

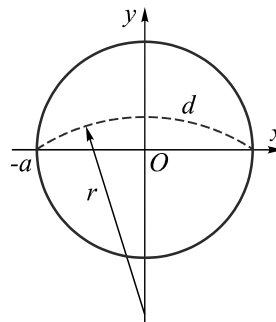


Рис. 2. Модификация гауссова пучка

Параметры t_1 , t_2 и t_3 определяют особенности формы пучка. Параметр t_1 определяет соотношение внутренней и внешней полуокружности, ограничивающей полумесяц. Параметр t_2 определяет, насколько быстро спадает к краям пучка интенсивность светового поля. Параметр t_3 определяет стационарную, не зависящую от x ширину полумесяца.

Полученное распределение теперь используем для расчёта силы, действующей на объект, освещённый пучком такой формы. Используя метод наискорейшего градиентного спуска для оптимизации формы пучка по параметрам t_1 , t_2 и t_3 , получим, что максимум силы достигается при $t_1 \rightarrow 1$, $t_2, t_3 \rightarrow 0$. В этом случае распределение интенсивности схлопывается в точку, т. е. становится дельта-функцией. Таким образом, в плоскости захвата объекта существует особая точка, такая, что для достижения максимальных значений силы в заданном направлении наиболее выгодно направить всю энергию пучка в эту точку. Расположение данной точки определяется формой объекта.

В силу дифракционных ограничений, однако, получить световые пучки с распределением интенсивности в виде дельта-функции невозможно. Чтобы максимально приблизиться к оптимальному распределению, остановим оптимизацию на стадии, когда дифракционный предел ещё не перейдён. При использовании водной среды ($n \sim 1,33$) и лазера с длиной волны $\lambda \sim 500$ нм дифракционный предел будет равен

$$d_{min} = \frac{\lambda}{2n} \sim 0,2 \text{ мкм.} \tag{2}$$

Для удовлетворения дифракционных ограничений наложим ограничение снизу на параметр

$t_2 \geq 0,04$, что будет соответствовать расстоянию $a - d = 0,2$ мкм (характерная ширина полумесяца).

Для оптимизированных параметров распределения в этом случае получим следующие значения: $t_1 = 0,94$, $t_2 = 0,04$, $t_3 = 0,0$. Распределение интенсивности светового пучка с такими параметрами изображено на рис. 3.

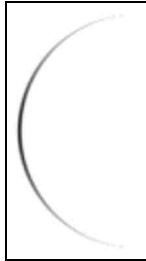


Рис. 3. Оптимизированное распределение интенсивности (негативное изображение)

Моделируя освещение таким пучком эллипсоида и принимая вклад силы каждого луча как

$$F_i = \frac{DP}{Dt} = \frac{-1}{c_0} (-I_r \vec{a}_r - I_d \vec{a}_d + I_e \vec{a}_e), \quad (3)$$

где I_e, I_r, I_d – соответственно интенсивность падающего, отражённого и проходящего лучей, а $\vec{a}_e, \vec{a}_r, \vec{a}_d$ – их направления, получим численную оценку. Подробно метод расчёта изложен в [28].

Расчётные значения сил, действующих на сферический объект радиусом $R = 5$ мкм при освещении его гауссовым пучком, пучком-полумесяцем и пучком-дельта-функцией, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения силы при освещении объекта радиусом $R=5$ мкм световыми пучками мощностью 300 мВт с различными распределениями интенсивности

Тип пучка	Абсолютное значение силы, пкН	Нормированное значение силы
Гауссов пучок	103	0,31
Оптимизированный пучок-полумесяц	293	0,88
Дельта-функция	333	1

Для удобства сравнения все результаты нормированы на максимальное значение, соответствующее дельта-функции.

Из таблицы видно, что оптимизированное распределение в виде полумесяца обеспечивает 0,88 теоретически достижимого максимума, а гауссово – только 0,31.

Для захвата эллипсоидальных частиц пучок-полумесяц был несколько видоизменён: путём простой подстановки $x \rightarrow x_{mod} = kx$ внешняя дуга из круговой превращалась в эллиптическую, где k – отношение большой и малой полуосей эллипса. Для *Saccharomyces cerevisiae* $k \sim 1,5$.

2. Измерения энергетической эффективности ДОЭ, образующих пучки-полумесяцы

Для формирования описанного выше распределения интенсивности был рассчитан по алгоритму, описанному в работе [29], и изготовлен методом фотолитографии бинарный ДОЭ. Разрешение элемента – 1 мкм, глубина травления – 480 ± 50 нм.

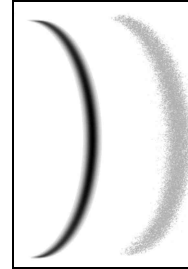


Рис. 4. Теоретическое (слева) и экспериментальное (справа) распределения интенсивности в пучке-полумесяце

На рис. 5 изображена фазовая функция изготовленного ДОЭ, а на рис. 6 – участок его микрорельефа.



Рис. 5. Фазовая функция ДОЭ, формирующего распределение «полумесяц»

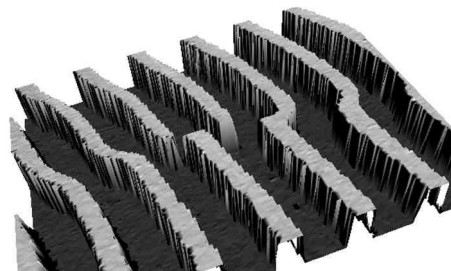


Рис. 6. Микрорельеф изготовленного ДОЭ

Были проведены опыты по измерению эффективности изготовленного ДОЭ. Эти эксперименты служили двум целям. Во-первых, измерялась дифракционная эффективность фазовой пластинки, которая является одним из показателей качества как расчёта фазового распределения, так и качества изготовления ДОЭ. Во-вторых, сравнение с гауссовым пучком, прошедшим тот же Фурье-каскад, позволит в дальнейшем сравнить эффективность распределения интенсивности в виде полумесяца: зная, какая часть входящего излучения дошла до фокуса пучка в случае гауссова пучка и пучка-полумесяца, и из-

мерив максимальную силу захвата, которую может дать каждая из ловушек, можно сделать определённые заключения о силовой эффективности ловушки.

На рис. 7 приведена схема, использованная для измерения энергетической эффективности пучков-полумесяцев.

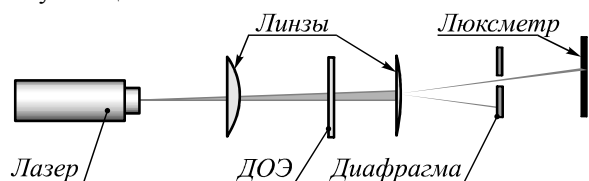


Рис. 7. Оптическая схема для измерения энергетической эффективности пучка-полумесяца

Луч YVO4+GKTP лазера с длиной волны $\lambda = 532$ нм через коллиматор направлялся на ДОЭ, после чего линзой фокусировался на приёмный элемент люксметра. Диафрагмой отсекался зеркальный порядок и более высокие дифракционные порядки изображения. Коллиматором и фокусатором служили две линзы с фокусным расстоянием $f = 400$ мм.

Энергетическая эффективность оценивалась сравнением освещённости, достигаемой пучком-полумесяцем, с освещённостью, достигаемой гауссовым пучком. Для измерения последней использовалась та же схема, но без ДОЭ. Диафрагма была открыта на тот же самый радиус отверстия.

В таблице 2 приведены результаты измерений.

Таблица 2. Результаты измерения энергетической эффективности пучков-полумесяцев

Тип пучка	Освещённость, лкс	Энергетическая эффективность
Гауссов пучок	950 ± 100	1
Пучок-полумесяц	280 ± 50	$0,29 \pm 0,05$

3. Эксперименты по оптическим манипуляциям клетками *Saccharomyces cerevisiae*

Для серии экспериментов культура *Saccharomyces cerevisiae* была выдержана в глюкозном растворе в течение 10 часов. Для опытов по захвату небольшое количество культуры растворялось в дистиллированной воде, чтобы обеспечить удобную для захвата концентрацию частиц.

Оптическая схема экспериментальной установки приведена на рис. 8. В качестве источника лазерного излучения использовался лазер с длиной волны $\lambda = 532$ нм и переменной мощностью (200 – 2000 мВт). Предметная плоскость подсвечивалась белым светом от лампы накаливания. Фиксация изображения в предметной плоскости осуществлялась с помощью CCD-камеры TMDSIPCAM8127J3 (30 кадров/с, 1080 p). Фильтр перед CCD-камерой отсеивал большую часть лазерного излучения, чтобы не засвечивать изображение захваченных частиц.

Луч лазера с помощью поворотного зеркала направлялся на ДОЭ, после чего фокусировался внут-

ри капли взвеси дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* при помощи иммерсионного объектива с 40-кратным увеличением. Затем 8-кратный объектив проецировал изображение происходящего в предметной плоскости, которое при помощи ещё одного поворотного зеркала через фильтр зелёных волн попадало на матрицу CCD-камеры. Изображение с камеры в режиме реального времени отображалось на экране ПК, позволяя управлять процессом захвата с помощью микровинтов предметного столика вручную, осуществляя визуальный контроль.

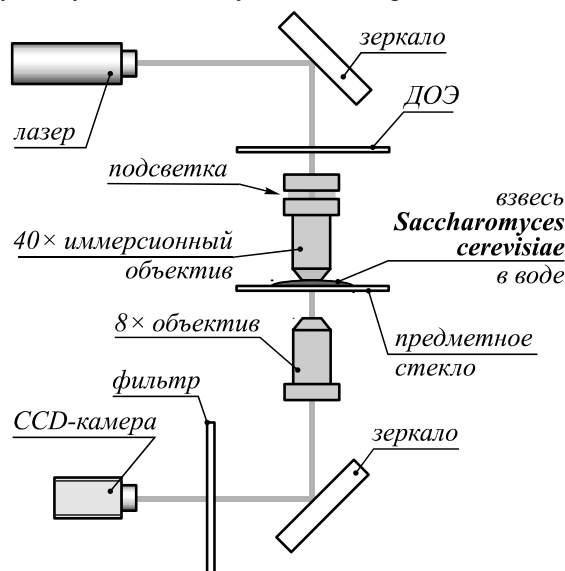


Рис. 8. Оптическая схема эксперимента

Цель серии опытов заключалась в определении критической скорости, при которой происходит вылет захваченного объекта из оптической ловушки, образованной пучком-полумесяцем и, для сравнения, гауссовым пучком. В этом случае, пользуясь близостью формы захватываемых объектов к сферической, с достаточной степенью точности можно оценить максимальную удерживающую силу ловушки, предполагая её линейную зависимость от скорости. В [28] ранее было показано, что равновесие между силой сопротивления среды и силами светового давления наступает практически мгновенно, а коэффициент зависимости силы сопротивления от скорости можно принять равным $6\pi\eta$. Проще говоря, можно не учитывать релаксационный период системы жидкость-клетка и считать силу светового давления в момент отрыва равной силе вязкого трения. Следовательно, из формулы Стокса имеем

$$F_{max} = v_{max} 6\pi r \zeta . \tag{4}$$

Таким образом, для оценки сил используем метод, описанный в [30].

Серия опытов с пучком в форме полумесяца

Попытки захвата клеток дрожжей пучками-полумесяцами оказались весьма успешными.

Первоначальное предположение полностью оправдалось: при захвате и перемещении основная до-

ля облучения приходится на периферию клетки, как это видно на рис. 11. Кроме того, форма пучка обеспечивала дополнительную жёсткость ловушки в поперечном движении направления.

Контрольная серия экспериментов с гауссовым пучком

Для сравнения аналогичные эксперименты были произведены с гауссовым пучком.

При захвате гауссовым пучком клетки временно вылетают из ловушки из-за поперечных движений микропотоков.

Сравнение двух серий экспериментов

Таблица 3. Сравнение численных результатов экспериментов

Тип пучка	Входная мощность лазера, мВт	Эффективность пучка, отн. ед.	Мощность излучения в фокусе пучка	Максимальная сила захвата, пН
Полумесяц	1300	0,29	377	1200
Гауссов	250	1	250	400

Результаты эксперимента показывают, что при сравнимой мощности излучения, попадающей в фокус пучка, сила захвата пучка-полумесяца в несколько раз больше силы, которую можно получить, используя гауссов пучок.

На рис. 9 и 10 приведено по одному эпизоду из серий экспериментов с пучком-полумесяцем и гауссовым пучком, соответственно. Оба эпизода изображают изменение скорости в зависимости от времени – от момента захвата клетки пучком до момента её вылета из пучка.

Неравномерность изменения скорости в эксперименте обусловлена несовершенством экспериментальной установки – предметный столик перемещался при помощи микровинтов, вращаемых вручную.

Тем не менее видно, что вылет из пучка-полумесяца происходит на более высокой скорости и при этом, как видно на рис. 11, в захвате пучком-полумесяцем участвовали одновременно две клетки, что обеспечивало более высокую силу сопротивления среды.

Также можно отметить, что экспериментальные данные хорошо согласуются с данными расчёта, приведёнными в таблице 1: если принять за метрику отношение

$$y = \frac{F}{I}, \tag{5}$$

где F – сила захвата, а I – мощность излучения в фокусе пучка, то для теоретических выкладок имеем

$$\frac{y_{cresc}}{y_{gauss}} = \frac{0,88\sigma_{\Delta}}{0,31\sigma_{\Delta}} = 2,8, \tag{6}$$

где σ_{Δ} – отношение силы захвата пучка с распределением интенсивности, стремящимся к дельта-

функции, к мощности излучения, тогда как эксперимент даёт следующие значения:

$$\frac{y_{cresc}}{y_{gauss}} = \frac{3,18 \cdot 10^{-9} \frac{с}{м}}{1,6 \cdot 10^{-9} \frac{с}{м}} \approx 2. \tag{7}$$

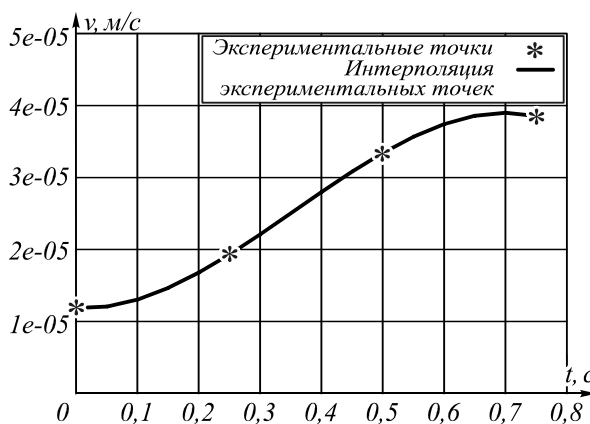


Рис. 9. Зависимость скорости частицы от времени в одном из эпизодов эксперимента с пучком-полумесяцем



Рис. 10. Зависимость скорости от времени в одном из эпизодов эксперимента с гауссовым пучком

Заключение

Гауссов пучок во многих случаях не является оптимальным для техники оптического захвата. Предлагаемый тип лазерного пучка обеспечивает более привлекательные силовые характеристики, что показано в теоретических расчётах и подтверждено экспериментами.

Разработанный тип лазерного пучка-полумесяца способен устойчиво захватывать биологические объекты. Больше того, при захвате и манипуляциях в области наибольшей интенсивности оказывается периферия объекта, что позволяет минимизировать повреждения от поглощения лазерного излучения биологической клеткой и её особенно чувствительными органеллами.

Будучи выполнен на кварцевой пластинке, образующий такой пучок ДООЭ имеет неплохую энергоэффективность (около 30%).

Сила захвата, которую позволяет получить пучок-полумесяц, в несколько раз больше силы, которую даёт гауссов пучок при схожих условиях.



Рис. 11. Захват клеток дрожжей пучком-полумесяцем. Чёрная точка отмечает положение неподвижной относительно предметного столика клетки. Белая стрелка – положение захваченной частицы. Промежуток времени τ между снимками – 0,55 с

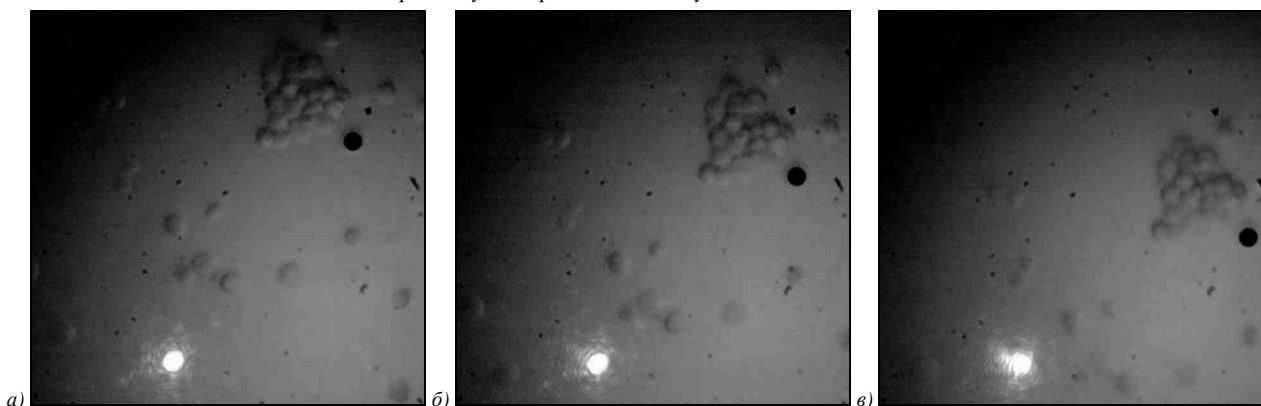


Рис. 12. Захват клеток дрожжей гауссовым пучком. Чёрная точка отмечает положение неподвижной относительно предметного столика клетки. Белая стрелка – положение захваченной частицы. Промежуток времени τ между снимками – 0,55 с

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № НШ-4128.2012.9, грантов РФФИ №№ 10-07-00109, 10-07-00553, 11-07-13164 и 11-07-00153, а также государственного контракта № 02.740.11.0805.

Литература

1. **Ashkin, A.** Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles / A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm, S. Chu // Optics Letters – 1986 – Vol. 11(5) – P. 288–290.
2. **Ashkin, A.** Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria / A. Ashkin, J.M. Dziedzic // Science – 1987 – Vol. 235 – P. 1517–1520.
3. **Leitz, G.** Stress response in *Caenorhabditis elegans* caused by optical tweezers: wavelength, power, and time dependence / G. Leitz, E. Fällman, S. Tuck, O. Axner // Biophys. J. – 2002 – Vol. 82(4) – P. 2224–2231.
4. **König, K.** Cell damage in near-infrared multimode optical traps as a result of multiphoton absorption / K. König, H. Liang, M.W. Berns, B.J. Tromberg // Opt Lett – 1996 – Vol. 21(14) – P. 1090–1092.
5. **Thanh, S.D.** Photogenerated singlet oxygen damages cells in optical traps / S.D. Thanh, N.C. Zakharov // arXiv:0911.4651 – 2009.
6. **Peterman, E.J.G.** Laser-Induced Heating in Optical Traps / E.J.G. Peterman, F. Gittes, C.F. Schmidt // Biophysical Journal – 2003 – Vol. 84(2) – P. 1308–1316.
7. **Mirsaidov, U.** Optical optical trap for bacterial viability / U. Mirsaidov, W. Timp, K. Timp, M. Mir, P. Matsudaira, G. Timp // Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys – 2008 – Vol. 78(2 Pt 1) – P. 021910.
8. **van der Horst, A.** Calibration of dynamic holographic optical tweezers for force measurements on biomaterials / A. van der Horst, N.R. Forde // Opt Express – 2008 – Vol. 16(25) – P. 20987–21003.
9. **Emiliani, V.** Wave front engineering for microscopy of living cells / V. Emiliani, D. Cojoc, E. Ferrari, V. Garbin, C. Durieux, M. Coppey-Moisan, E. Di Fabrizio // Opt Express – 2005 – Vol. 13(5) – P. 1395–1405.
10. **Xin, H.** Targeted delivery and controllable release of nanoparticles using a defect-decorated optical nanofiber / H. Xin, B. Li // Opt Express – 2011 – Vol. 19(14) – P. 13285–13290.
11. **Moradi, A.** Strength control in multiple optical traps generated by means of diffractive optical elements / A. Moradi, E. Ferrari, V. Garbin, E. Di Fabrizio, D. Cojoc // Optoelectronics and Advanced Materials - Rapid Communications – 2007 – Vol. 1(4) – P. 158–161.
12. **Emiliani, V.** Multi force optical tweezers to generate gradients of forces / V. Emiliani, D. Sanvitto, M. Zahid, F. Gerbal, M. Coppey-Moisan // Opt Express – 2004 – Vol. 12(17) – P. 3906–3910.
13. **Dasgupta, R.** Optical orientation and rotation of trapped red blood cells with Laguerre-Gaussian mode / R. Dasgupta, S. Ahlawat, R.S. Verma, P.K. Gupta // Opt Express – 2011 – Vol. 19(8) – P. 7680–7688.
14. **Daria, V.R.** Simultaneous transfer of linear and orbital angular momentum to multiple low-index particles / V.R. Daria, M.A. Go, H.-A. Bachor // Journal of Optics – 2011 – Vol. 13(4) – P. 044004.
15. **Sun, Q.** Hollow sinh-Gaussian beams and their paraxial properties / Q. Sun, K. Zhou, G. Fang, G. Zhang, Z. Liu, S. Liu // Opt Express – 2012 – Vol. 20(9) – P. 9682–9691.
16. **Olson, C.C.** Tailored optical force fields using evolutionary algorithms / C.C. Olson, R.T. Schermer, F. Bucholtz // Opt Express – 2011 – Vol. 19(19) – P. 18543–18557.
17. **Jesacher, A.** Size selective trapping with optical “cog-wheel” tweezers / A. Jesacher, S. Fürhapter, S. Bernet, M. Ritsch-Marte // Opt Express – 2004 – Vol. 12(17) – P. 4129–4135.

18. **Brijesh, P.** "Spatially shaping the longitudinal focal distribution into a horseshoe-shaped profile," in *Quantum Electronics and Laser Science Conference*, – 2007, – QELS '07, P. 1 – 2.
19. **Jiang, Y.** Radiation force of highly focused Lorentz-Gauss beams on a Rayleigh particle / Y. Jiang, K. Huang, X. Lu // *Opt Express* – 2011 – Vol. 19(10) – P. 9708–9713.
20. **Steuernagel, O.** Coherent Transport and Concentration of Particles in Optical Traps using Varying Transverse Beam Profiles / O. Steuernagel // *arXiv:physics/0502023* – 2005.
21. **Волостников, В.Г.** Манипуляция микрообъектами с помощью пучков с ненулевым орбитальным моментом / В.Г. Волостников, С.П. Котова, Н. Н. Лосевский, М.А. Рахматулин // *Квантовая электроника*. – 2002. – Т. 32. – № 7. – С. 565-566.
22. **Абрамочкин, Е.Г.** Формирование световых вихревых полей с заданной формой интенсивности для задач лазерной манипуляции микрообъектами / Е.Г. Абрамочкин, К.Н. Афанасьев, В.Г. Волостников, А.В. Коробцов, С.П. Котова, Н.Н. Лосевский, А.М. Майорова, Е.В. Разуваева // *Известия РАН. Серия физическая* – 2008 - Т. 72 - № 1 - С. 76-79.
23. **Abramochkin, E.** Microobject Manipulations Using Laser Beams with Nonzero Orbital Angular Momentum / E. Abramochkin, S. Kotova, A. Korobtsov, N. Losevsky, M. Rakhmatulin, V. Volostnikov // *Laser Physics*, – 2006, – Vol.16, No.5, – P.842-848.
24. **Bowman, R.** Particle tracking stereomicroscopy in optical tweezers: Control of trap shape / R. Bowman, G. Gibson, M. Padgett // *Opt. Express* – 2010 – Vol. 18(11) – P. 11785–11790.
25. **Saito, T.L.** SCMD: *Saccharomyces cerevisiae* Morphological Database / T.L. Saito, M. Ohtani, H. Sawai, F. Sano, A. Saka, D. Watanabe, M. Yukawa, Y. Ohya, S. Morishita // *Nucleic Acids Res.* – 2004 – Vol. 32(Database issue) – P. D319–322.
26. **Скиданов, Р.В.** Расчет силы взаимодействия светового пучка с микрочастицами произвольной формы / Р.В. Скиданов // *Компьютерная оптика* – 2005 – Т. 28 – С. 18–21.
27. **Simpson, S.H.** Computational study of the optical trapping of ellipsoidal particles / S.H. Simpson, S. Hanna // *Phys. Rev. A* – 2011 – Vol. 84(5) – P. 053808.
28. **Скиданов, Р.В.** Моделирование движения биологических микрообъектов в световых пучках / Р.В. Скиданов, М.А. Рыков // *Компьютерная оптика* – 2010 – Т. 34(3) – С. 308–314.
29. **Котляр, В.В.** Кодирование дифракционных оптических элементов методом локального фазового скачка / В.В. Котляр, С.Н. Хонина, А.С. Мелехин, В.А. Соيفер // *Компьютерная оптика* – 1999 – Т. 19 – С. 54–64.
30. **Svoboda, K.** Biological Applications of Optical Forces / K. Svoboda, S. M. Block // *Annual Review of Biophysics and Biomolecular Structure* - 1994. Vol. 23, P. – 247-285.
5. **Thanh, S.D.** Photogenerated singlet oxygen damages cells in optical traps / S.D. Thanh, N.C. Zakharov // *arXiv:0911.4651* – 2009.
6. **Peterman, E.J.G.** Laser-Induced Heating in Optical Traps / E.J.G. Peterman, F. Gittes, C.F. Schmidt // *Biophysical Journal* – 2003 – Vol. 84(2) – P. 1308–1316.
7. **Mirsaidov, U.** Optimal optical trap for bacterial viability / U. Mirsaidov, W. Timp, K. Timp, M. Mir, P. Mutsaers, G. Timp // *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys* – 2008 – Vol. 78(2 Pt 1) – P. 021910.
8. **van der Horst, A.** Calibration of dynamic holographic optical tweezers for force measurements on biomaterials / A. van der Horst, N.R. Forde // *Opt Express* – 2008 – Vol. 16(25) – P. 20987–21003.
9. **Emiliani, V.** Wave front engineering for microscopy of living cells / V. Emiliani, D. Cojoc, E. Ferrari, V. Garbin, C. Durieux, M. Coppey-Moisan, E. Di Fabrizio // *Opt Express* – 2005 – Vol. 13(5) – P. 1395–1405.
10. **Xin, H.** Targeted delivery and controllable release of nanoparticles using a defect-decorated optical nanofiber / H. Xin, B. Li // *Opt Express* – 2011 – Vol. 19(14) – P. 13285–13290.
11. **Moradi, A.** Strength control in multiple optical traps generated by means of diffractive optical elements / A. Moradi, E. Ferrari, V. Garbin, E. Di Fabrizio, D. Cojoc // *Optoelectronics and Advanced Materials - Rapid Communications* – 2007 – Vol. 1(4) – P. 158–161.
12. **Emiliani, V.** Multi force optical tweezers to generate gradients of forces / V. Emiliani, D. Sanvitto, M. Zahid, F. Gerbal, M. Coppey-Moisan // *Opt Express* – 2004 – Vol. 12(17) – P. 3906–3910.
13. **Dasgupta, R.** Optical orientation and rotation of trapped red blood cells with Laguerre-Gaussian mode / R. Dasgupta, S. Ahlawat, R.S. Verma, P.K. Gupta // *Opt Express* – 2011 – Vol. 19(8) – P. 7680–7688.
14. **Daria, V.R.** Simultaneous transfer of linear and orbital angular momentum to multiple low-index particles / V.R. Daria, M.A. Go, H.-A. Bachor // *Journal of Optics* – 2011 – Vol. 13(4) – P. 044004.
15. **Sun, Q.** Hollow sinh-Gaussian beams and their paraxial properties / Q. Sun, K. Zhou, G. Fang, G. Zhang, Z. Liu, S. Liu // *Opt Express* – 2012 – Vol. 20(9) – P. 9682–9691.
16. **Olson, C.C.** Tailored optical force fields using evolutionary algorithms / C.C. Olson, R.T. Schermer, F. Bucholtz // *Opt Express* – 2011 – Vol. 19(19) – P. 18543–18557.
17. **Jesacher, A.** Size selective trapping with optical “cogwheel” tweezers / A. Jesacher, S. Führlinger, S. Bernet, M. Ritsch-Marte // *Opt Express* – 2004 – Vol. 12(17) – P. 4129–4135.
18. **Brijesh, P.** "Spatially shaping the longitudinal focal distribution into a horseshoe-shaped profile," in *Quantum Electronics and Laser Science Conference*, – 2007. – QELS '07, –P. 1 –2.
19. **Jiang, Y.** Radiation force of highly focused Lorentz-Gauss beams on a Rayleigh particle / Y. Jiang, K. Huang, X. Lu // *Opt Express* – 2011 – Vol. 19(10) – P. 9708–9713.
20. **Steuernagel, O.** Coherent Transport and Concentration of Particles in Optical Traps using Varying Transverse Beam Profiles / O. Steuernagel // *arXiv:physics/0502023* – 2005.
21. **Волостников, В.Г.** Манипуляция микрообъектами с помощью пучков с ненулевым орбитальным моментом / В.Г. Волостников, С.П. Котова, Н. Н. Лосевский, М.А. Рахматулин // *Quantum Electronics*. – 2002. – V.32.N 7. – P. 565-566. – (In Russian).
22. **Abramochkin, E.** Formation of light vortex fields with known problems in laser intensity for manipulating microobjects / E. Abramochkin, K.N. Afanasiev, V.G. Volostnikov, A.V. Korobcov, S.P. Kotova, N.N. Losevsky, A.M. Mayorova, E.V. Razuvaeva // *Izvestiya RAS. Physics Series* – 2008 - V. 72.N 1 – P. 76-79. – (In Russian).

References

1. **Ashkin, A.** Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles / A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm, S. Chu // *Optics Letters* – 1986 – Vol. 11(5) – P. 288–290.
2. **Ashkin, A.** Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria / A. Ashkin, J.M. Dziedzic // *Science* – 1987 – Vol. 235 – P. 1517–1520.
3. **Leitz, G.** Stress response in *Caenorhabditis elegans* caused by optical tweezers: wavelength, power, and time dependence / G. Leitz, E. Fällman, S. Tuck, O. Axner // *Biophys. J.* – 2002 – Vol. 82(4) – P. 2224–2231.
4. **König, K.** Cell damage in near-infrared multimode optical traps as a result of multiphoton absorption / K. König, H. Liang, M.W. Berns, B.J. Tromberg // *Opt Lett* – 1996 – Vol. 21(14) – P. 1090–1092.

23. **Abramochkin, E.** Microobject Manipulations Using Laser Beams with Nonzero Orbital Angular Momentum / E. Abramochkin, S. Kotova, A. Korobtsov, N. Losevsky, M. Rakhmatulin, V. Volostnikov // *Laser Physics*. – 2006. – Vol. 16, No. 5, – P. 842-848.
24. **Bowman, R.** Particle tracking stereomicroscopy in optical tweezers: Control of trap shape / R. Bowman, G. Gibson, M. Padgett // *Opt. Express* – 2010 – Vol. 18(11) – P. 11785–11790.
25. **Saito, T.L.** SCMD: Saccharomyces cerevisiae Morphological Database / T.L. Saito, M. Ohtani, H. Sawai, F. Sano, A. Saka, D. Watanabe, M. Yukawa, Y. Ohya, S. Morishita // *Nucleic Acids Res.* – 2004 – Vol. 32(Database issue) – P. D319–322.
26. **Skidanov, R.V.** The computation of power between light beam and particles of an arbitrary shape / R.V. Skidanov // *Computer Optics* – 2005 – Vol. 28 – P. 18–21. – (in Russian).
27. **Simpson, S.H.** Computational study of the optical trapping of ellipsoidal particles / S.H. Simpson, S. Hanna // *Phys. Rev. A* – 2011 – Vol. 84(5) – P. 053808.
28. **Skidanov, R.V.** Modeling of movement of biological microobjects in light beams / R.V. Skidanov, M.A. Rykov // *Computer Optics* – 2010 – Vol. 34(3) – P. 308–314. – (in Russian)
29. **Kotlyar, V.V.** Encoding of diffractive optical elements by local phase jump method / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, A.S. Melekhin, V.A. Soifer // *Computer optics*. – 1999. – V. 19. – P. 54-64. – (in Russian).
30. **Svoboda, K.** Biological Applications of Optical Forces / K. Svoboda, S. M. Block // *Annual Review of Biophysics and Biomolecular Structure* – 1994. – Vol. 23, – P. – 247-285.

THE MODIFICATION OF LASER BEAM FOR OPTIMIZATION OF OPTICAL TRAP FORCE CHARACTERISTICS

R.V. Skidanov¹, M.A. Rykov^{1,2}, G.S. Iannacchione³, S.G. Krivoslykov⁴

¹ Image Processing Systems Institute of the RAS,

² S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University),

³ Worcester Polytechnic Institute,

⁴ ANTEOS, Inc. Shrewsbury, MA

Abstract

The article deals with the modification of the optical beam used for optical trapping of biological microobject. Proposed a more efficient distribution of intensity in a crescent. For the proposed distribution is made DOE experimentally evaluated its diffraction efficiency. Theoretical estimates of power characteristics of beams half-moon, and the results of experiments on the optical trapping with such beams.

Key words: optical capture and manipulation, laser beam modification, biological microobject, DOE.

Сведения об авторах

Сведения об авторе Скиданов Роман Васильевич – см. стр. 376 этого номера.

Рыков Михаил Александрович 1987 года рождения, в 2010 получил степень магистра в СГАУ по специальности «Прикладная математика». Область научных интересов: дифракционная оптика.

Mikhail Aleksandrovich Rykov (b. 1987) He received his master in Applied mathematics (2010) in SSAU. His research interests are currently diffractive optics.



Инначионе Германо С.

2006–настоящее время – руководитель, департамента физики, политехнического института Ворчестера, США.

2004–настоящее время – доцент кафедры физики политехнического института Ворчестера.

1998–2004 – доцент кафедры физики политехнического института Ворчестера.

1999–2000 – консультант Planar Systems / Standish Inc, Madison WI.

1998–1999 – исследователь Центра материаловедения и инженерии Массачусетского технологического института.

1996–1998 – Докторантура, научный сотрудник кафедры химии и Центра материаловедения и инженерии, Массачусетский технологический институт.

1994–1996 – научный сотрудник отдела физики, Kent State University.

1989–1993 – научный сотрудник, кафедра физики, Kent State University.

1987–1989 – Мортон-Thiokol, научный сотрудник и ассистент кафедры физики, Университет Акрона.

Эксперт в физике конденсированных сред (полимеры, жидкие кристаллы, самосборка биоматериалов, белков), физической химии и экспериментальных методов теплофизики (калориметрии, диэлектрической спектроскопии, оптической микроскопии, эллипсометрии, ЯМР, рассеяния света).



Germano S. Iannacchione,

2006–now Head, Department of Physics, Worcester Polytechnic Institute, USA. 2004–now – Associate Professor, Department of Physics, Worcester Polytechnic Institute. 1998–2004 – Assistant Professor, Department of Physics, Worcester Polytechnic Institute. 1999–2000 – Consultant, Planar Systems / Standish Inc., Madison WI. 1998–1999 – Research Affiliate, Center for Materials Science and Engineering, M.I.T. 1996–1998 – Postdoctoral Research Associate, Department of Chemistry and Center for Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

1994–1996 – Postdoctoral Research Fellow, Department of Physics, Kent State University. 1989–1993 – Research Assistant, Department of Physics, Kent State University. 1987–1989 – Morton-Thiokol Research Associate and Graduate Assistant, Department of Physics, University of Akron.

Expertise in soft-condensed matter physics (polymers, liquid crystals, self-assembly of biomaterials, proteins), physical chemistry, and thermo-physical experimental techniques (calorimetry, dielectric spectroscopy, optical microscopy, ellipsometry, NMR, light scattering).

Кривошлыков Сергей Гелиевич

2006–по настоящее время – президент и главный научный сотрудник, ANTEOS, Inc Шрусбери, штат Массачусетс, США. 1998 – настоящее время – президент и главный научный сотрудник Центра ALTAIR, LLC. Шрусбери, штат Массачусетс. 1999–2003 – профессор прикладной физики физического факультета и старший научный сотрудник Advanced Technology и производственного центра (ATMC) в Университете штата Массачусетс, Dartmouth. 1996–1998 – менеджер оптики и оптоэлектроники отдела в Aspen Systems, Inc, Мальборо, штат Массачусетс. 1995–1996 – главный научный сотрудник в CeramOptec Industries, Inc Востоке Longmeadow, штат Массачусетс. 1994 – приглашённый профессор, Dipartimento di Energetica, Universita-di-Roma, Италия. 1993 – приглашённый профессор, MESA научно-исследовательский институт, Университет Твенте, Энсхеде, Нидерланды.



Специалист в нанофотонике, лазерной физике и дифракционной оптике, интегрированной и волоконной оптике, теории волноводов и квантовой физике, коммерциализации технологий.

Sergei Gelievich Krivoshlykov

2006–now – President and Chief Scientist, ANTEOS, Inc. Shrewsbury, MA, USA. 1998–now – President and Chief Scientist, ALTAIR Center, LLC. Shrewsbury, MA. 1999–2003 – Applied Physics Professor at Physics Department and Senior Fellow at the Advanced Technology and Manufacturing Center (ATMC), the University of Massachusetts, Dartmouth. 1996–1998 – Manager of Optics and Optoelectronics Division at Aspen Systems, Inc., Marlborough, MA. 1995–1996 – Principal Scientist at CeramOptec Industries, Inc. East Longmeadow, MA. 1994 – Guest Professor, Dipartimento di Energetica, Universita di Roma, Italy. 1993 – Guest Professor, MESA Research Institute, University of Twente, Enschede, The Netherlands.

35 years of academic and industrial experience. Expertise in nanophotonics, laser physics and diffractive optics, integrated and fiber optics, waveguide theory and quantum physics, implementation of new physical effects in commercially viable.

Поступила в редакцию 3 июня 2012 г.