

СИЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПОВРЕЖДАЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ ПУЧКОВ-ПОЛУМЕСЯЦЕВ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Рыков М.А.

Институт систем обработки изображений РАН,
Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Аннотация

В работе рассматривается модификация оптического пучка, используемого для оптического захвата. Предложено формировать распределение интенсивности в виде полумесяца. Для полученного распределения изготовлен бинарный ДООЭ. Приводятся теоретические оценки силовых характеристик пучков-полумесяцев, оценка повреждающего действия таких пучков, а также результаты экспериментов с использованием таких пучков.

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

Манипулирование отдельными клетками при помощи оптического пинцета играет важную роль в задачах микробиологии и цитологии. Первые исследования на эту тему были выполнены Ашкиным в 1986 году [1–2].

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.

Промоделируем поле сил, действующих на сферический объект радиусом 5 мкм, помещённый в гауссов пучок. Теоретические основы такого расчёта были изложены в работах [3] и [4], и там же подтверждены экспериментом. Для моделирования использовался программный комплекс, описанный в [5].

Результаты моделирования показывают, что силы оптического захвата достигают максимума, если объект несколько смещён относительно центра 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 $a = 5$ мкм. Модифицируем пучок таким образом, чтобы эквиосвещёнными кривыми пучка стали замкнутые кривые, образованные из дуг двух окружностей разного радиуса, расположенных с небольшим смещением (рис. 1).

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:

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

$$c(x) = \sqrt{r^2 - x^2} - r + d; \quad (1)$$

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

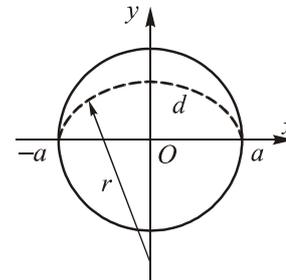


Рис. 1. Модификация гауссова пучка

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 и учитывая дифракционные ограничения на ширину элементов распределения, 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. 2.

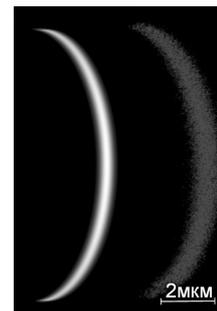


Рис. 2. Теоретическое (слева) и экспериментальное (справа) распределение интенсивности в пучке-полумесяце

Моделирование показывает, что оптимизированное распределение в виде полумесяца обеспечивает 0,88 теоретически достижимого максимума (когда распределение стремится к дельта-функции), а гауссов – только 0,31.

Для захвата эллипсоидальных частиц пучок-полумесяц был несколько видоизменён: путём про-

стой подстановки $x \rightarrow x_{mod} = kx$ внешняя дуга из круговой превращалась в эллиптическую, где k – отношение большой и малой полуосей эллипса. Для дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* $k \sim 1,5$.

Кроме того, было промоделировано, как будут отличаться повреждения от поглощения клеткой лазерного излучения в случае обычного гауссова пучка и рассматриваемой в данной работе модификации.

В качестве модели была выбрана композиция из эллипсоида $R_1 \times R_2 \times R_1 = 3 \times 2 \times 3$ мкм и сферы $r^3 = 1 \times 1 \times 1$ мкм с общим центром (рис. 3).

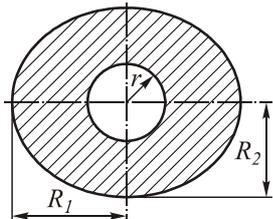


Рис. 3. Схематическое изображение модели клетки с ядром (в разрезе)

Для измерения фотоповреждения программным комплексом [5] введём следующую величину:

$$Q = \sum l_i \times I_i, \tag{2}$$

где l_i – длина пути отрезка элементарного луча с интенсивностью I_i внутри клетки или органеллы от одной точки преломления или отражения до другой. Таким образом, можно оценить суммарную интенсивность прошедшего через клетку или органеллу излучения. Часть из него будет поглощена, поэтому очевидна зависимость между повреждающим воздействием и введённой величиной Q .

Результаты моделирования приведены на рис. 4, 5.

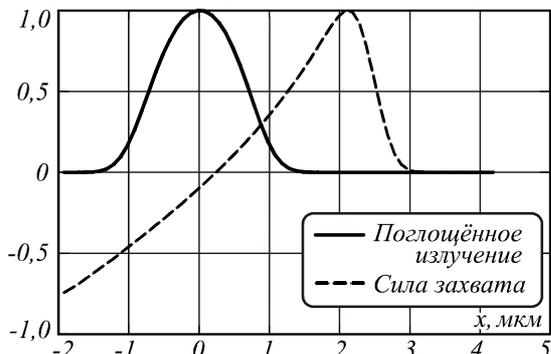


Рис. 4. Нормированный график изменения силы, действующей на клетку, и фотоповреждений в её ядре при освещении её пучком-полумесяцем в зависимости от расстояния между осью клетки и максимумом пучка

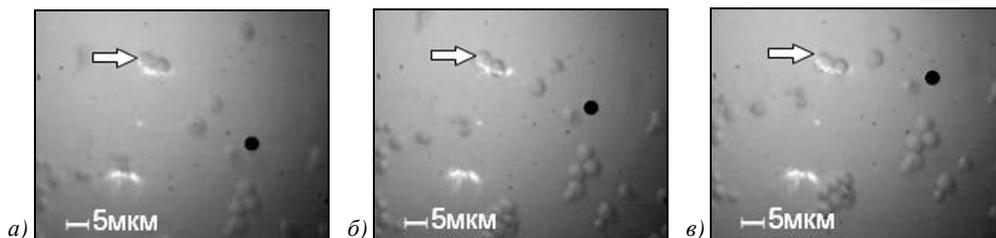


Рис. 7. Захват клеток дрожжей пучком-полумесяцем (а–в). Чёрная точка отмечает положение неподвижной относительно предметного столика клетки. Промежуток времени τ между снимками – 0,55с

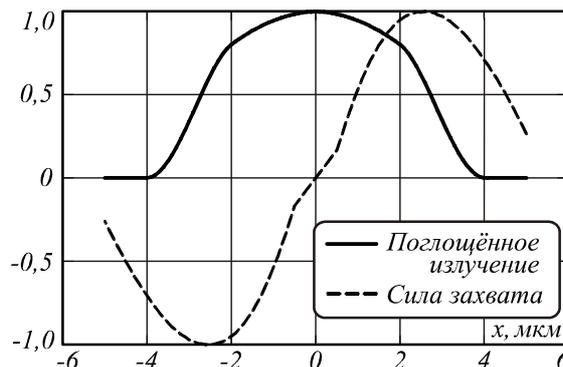


Рис. 5. Нормированный график изменения силы, действующей на клетку, и фотоповреждений в её ядре при освещении её гауссовым пучком в зависимости от расстояния между осью клетки и максимумом пучка

Сплошной линией изображена величина Q для ядра клетки, а пунктирной – сила оптического захвата. Для наглядности обе величины нормированы на собственный максимум.

Сравнивая полученные графики, можно заметить, что при максимуме силы захвата гауссов пучок всё ещё оказывает заметное влияние на ядро клетки, тогда как для пучка-полумесяца эта величина быстро спадает и в максимуме силы близка к нулю.

Была проведена серия экспериментов с целью измерения силы захвата при применении пучков-полумесяцев. Пучок формировался ДООЭ, фазовое изображение которого приведено на рис. 6. Сила захвата находилась из равновесия оптических сил и сил вязкости в момент окончательного потери контроля над объектом со стороны ловушки.

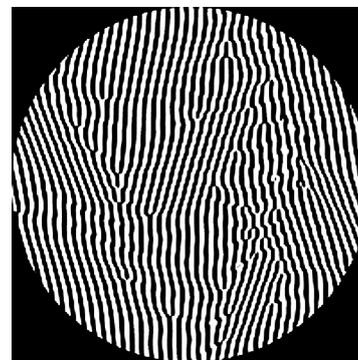


Рис. 6. Бинарный фазовый элемент, создающий распределение интенсивности «полумесяца»

Первоначальное предположение полностью подтвердилось: при захвате и перемещении основная доля облучения приходится на периферию клетки, как это видно на рис. 7.

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.

Если принять за метрику отношение

$$\sigma = \frac{F}{I}, \quad (3)$$

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

$$\frac{\sigma_{cresc}}{\sigma_{gauss}} = \frac{0,88\sigma_{\Delta}}{0,31\sigma_{\Delta}} = 2,8, \quad (4)$$

где σ_{Δ} – отношение силы захвата пучка с распределением интенсивности, стремящимся к дельта-функции, к мощности излучения, тогда как эксперимент даёт следующие значения:

$$\frac{\sigma_{cresc}}{\sigma_{gauss}} = \frac{3,18 \cdot 10^{-9} \frac{c}{m}}{1,6 \cdot 10^{-9} \frac{c}{m}} \approx 2. \quad (5)$$

Предлагаемый тип лазерного пучка обеспечивает более привлекательные силловые характеристики, что показано в теоретических расчётах и подтверждено экспериментами. Кроме того, теоретическое моделирование показывает, что пучки-полумесяцы оказывают меньшее влияние на органеллы захватываемых клеток.

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. **Скиданов, Р.В.** Расчёт силы взаимодействия светового пучка с микрочастицами произвольной формы / Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. – 2005. – Т. 28. – С. 18-21.
4. **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.
5. **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.

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. **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).
4. **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.
5. **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).

POWER PROFILE AND DAMAGING ABILITY OF THE CRESCENT-SHAPED LASER BEAMS: THEORY AND EXPERIMENT

M.A. Rykov

Image Processing Systems Institute of the RAS

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

Abstract

The modification of the laser beams used for the optical trapping of biological microobjects is presented in this work. The crescent-shaped intensity distribution is proposed. To form such a distribution DOE is created. There are also theoretical estimations given for the force characteristics and damaging ability of the intensity distribution, as well as experimental study of those parameters undertaken.

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

Сведения об авторе:



Рыков Михаил Александрович, 1987 года рождения, в 2008 получил степень бакалавра в СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». В 2010 получил степень магистра в СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». В списке научных работ М.А. Рыкова 1 статья. Область научных интересов: дифракционная оптика, оптический захват.

E-mail: michael.rykov@gmail.com.

Mikhail Alexandrovich Rykov (b. 1987) He received his bachelor of applied mathematics and physics (2008) in SSAU. He received his master of applied mathematics and physics (2010) in SSAU. He is a co-author of 1 scientific paper. His research interests are currently diffractive optics and optical tweezers.