

09

Манипулирование микрочастицами при помощи бесселевых пучков, полученных от полупроводниковых лазеров

© Г.С. Соколовский, С.Н. Лосев, К.К. Соболева, В.В. Дюделев,
А.Г. Дерягин, В. Сиббет, В.И. Кучинский, Э.У. Рафаилов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия,
E-mail: gs@mail.ioffe.ru

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Россия

School of Physics and Astronomy, University of St Andrews, St Andrews, UK

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
„ЛЭТИ“, Россия

Aston Institute of Photonic Technologies, Aston University, Birmingham, UK

Поступило в Редакцию 7 февраля 2014 г.

Впервые продемонстрировано оптическое манипулирование микроскопическими объектами, в том числе живыми клетками, при помощи бесселевых пучков, полученных от полупроводниковых лазеров. Кроме того, в процессе экспериментов было обнаружено, что бесселев пучок, полученный от полупроводникового лазера, при достаточной мощности позволяет манипулировать сразу несколькими микроскопическими объектами, захваченными в его центральное пятно и первое кольцо.

В последнее время бесселевы световые пучки привлекают внимание ученых из-за их способности распространяться на значительное расстояние без расходимости [1]. Это открывает широкие перспективы для их использования в устройствах для манипулирования микроскопическими и наноразмерными объектами (так называемых оптических пинцетах [2,3]), а также для управления микромашинами [4] и других применений. Они могут быть созданы в результате преобразования гауссовых пучков при прохождении последних через аксикон (коническую линзу) [5,6]. При прохождении через аксикон световая волна преломляется и интерферирует таким образом, что радиальное распределение ее интенсивности описывается функцией

Бесселя первого рода нулевого порядка [5]. Проекция бесселевых пучков на экран выглядит как яркое пятно, окруженное системой концентрических колец. Количество колец и длина распространения нерасходящегося луча определяются апертурой и углом при вершине аксикона. При распространении в пространстве центральный максимум интерференционной картины сохраняет неизменной свою ширину при незначительных осцилляциях интенсивности, обеспечивая таким образом передачу энергии на большие расстояния.

Долгое время считалось, что для получения бесселевых пучков необходимы источники света с высокой когерентностью и поэтому их генерация возможна только при использовании газовых и твердотельных лазеров, что делает оптический пинцет на основе бесселевых пучков весьма громоздким и дорогостоящим инструментом. Однако несколько лет назад в работе [7] было показано, что при сильном диафрагмировании возможно получение инвариантных пучков света даже от галогенной лампочки, дающей некогерентное излучение. Несмотря на то что диафрагмирование приводит к значительным оптическим потерям, снижая мощность излучения в центральном пятне получаемого таким образом бесселева пучка до неприемлемо низкого уровня, работа [7] послужила триггером для начала широких исследований в этом направлении. В частности, в недавних работах были продемонстрированы бесселевы пучки, полученные от светодиодов [8] и широкополосковых полупроводниковых лазеров [9]. Следующим важным шагом на пути к практическому применению бесселевых пучков, полученных от полупроводниковых источников излучения, стало утверждение важности пространственной, а не временной когерентности источника излучения для получения бесселевых пучков [10], изучение влияния параметра распространения луча M^2 (являющегося отношением расходимости данного луча к расходимости идеального гауссова луча, определяемой дифракционным пределом [11]) на распространение бесселевых пучков, полученных от полупроводниковых лазеров [12], и демонстрация бесселевых пучков мощностью до нескольких ватт [13], достаточной для подавляющего большинства практических применений.

В данной статье мы впервые, насколько нам известно, демонстрируем использование бесселевых пучков, полученных от полупроводниковых лазеров, для оптического захвата и манипулирования микроскопическими частицами, включая живые клетки. Схематическое изображение экспериментальной установки приведено на рис. 1. Для

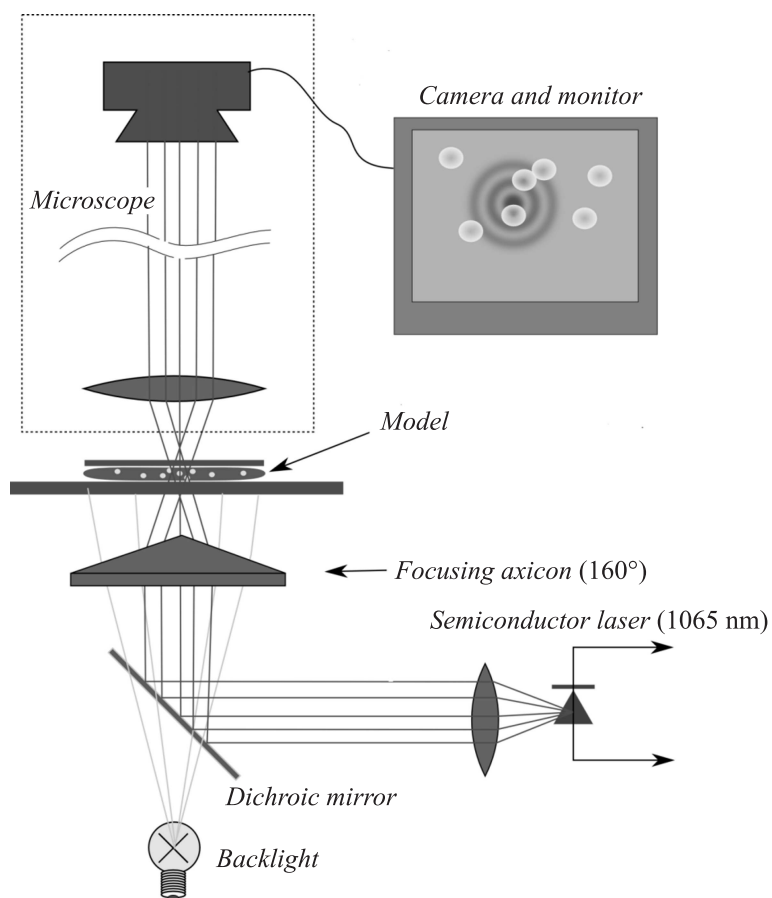


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки для оптической манипуляции микроскопическими объектами при помощи бесселевых пучков, полученных от полупроводниковых лазеров.

генерации бесселевых пучков использовалось излучение полупроводникового лазера с резонатором Фабри–Перо и волоконным выводом с длиной волны излучения 1065 nm. Волоконный вывод обеспечивал получение симметричной диаграммы направленности излучения. Мощность

на выходе волокна при этом составляла до 600 mW. Лазерный пучок коллимировался и фокусировался оптической системой, состоящей из ряда чередующихся микролинз с увеличением от $\times 8$ до $\times 40$, закрепленных на микропозиционерах. Бесселев пучок создавался аксиконом с углом при вершине 160° , что определило величину поперечного размера центрального луча бесселева пучка $\sim 7 \mu\text{m}$. Размер бесселева пучка измерялся с помощью прозрачной градуированной сетки (так называемая гратикюла, от лат. *graticule*) с масштабными делениями $10 \mu\text{m}$ и общей длиной градуированной шкалы 1 mm. Гратикюл устанавливался в фокальной плоскости линзы микроскопа таким образом, что оказывалось возможным наблюдать бесселев пучок, проходящий через этот масштабированный район. Оптическая мощность в центральном луче бесселева пучка с учетом потерь в оптической системе, принятых в расчет, достигала 20 mW.

Управление оптическим захватом осуществлялось высокоточными микропозиционерами, введенными в оптическую схему, и контролировалось через микроскоп видеокамерой с ПЗС-матрицей. Микрообъектами для исследований были выбраны полистирольные микросферы диаметром $10 \mu\text{m}$ в водном растворе в качестве объектов с большим коэффициентом преломления и водяные пузыри в масле как частицы с низким коэффициентом преломления. Раствор, содержащий микрообъекты, размещался между двумя предметными стеклами. Перемещение предметного стекла с микрочастицами осуществлялось трехкоординатным микропозиционером. Оптическая схема установки юстировалась таким образом, чтобы оптические оси модуля наблюдения и модуля манипулирования совпадали. Дихроическое зеркало обеспечивало подсветку (рис. 1).

В работе также исследовался оптический захват живых красных кровяных телец крысиной крови. Крысиная кровь растворялась в воде с добавлением гепарина для предотвращения свертывания. Средний размер клеток составлял приблизительно $5 \mu\text{m}$ (измерения размеров проводились с помощью гратикюла подобно измерениям размеров бесселева пучка, описанным выше). На рис. 2 представлен ряд экспериментальных изображений, демонстрирующий двухкоординатный оптический захват и манипулирование живыми красными клетками крысиной крови в центральном луче бесселева пучка, полученного от полупроводникового лазера (стрелки на рисунке показывают движение незахваченного объекта). При этом не наблюдалось оптически индуци-

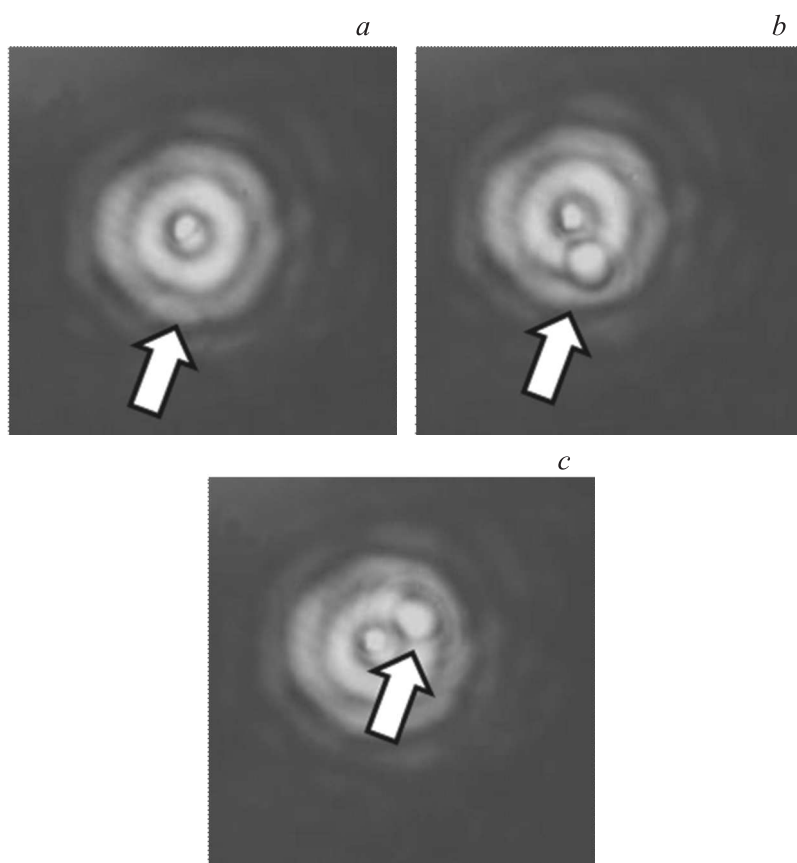


Рис. 2. Этапы захвата и манипуляции эритроцитом крысиной крови при помощи бесселева пучка. Стрелками показано движение незахваченного объекта.

рованных повреждений живых клеток в используемом в экспериментах диапазоне оптической мощности.

Наши оценки на сегодняшний день показали, что имеется достаточно хороший потенциал для бесселевых пучков, получаемых от полупроводниковых лазеров для замены их газовых и твердотельных аналогов, в частности, в приложениях, связанных с оптическим за-

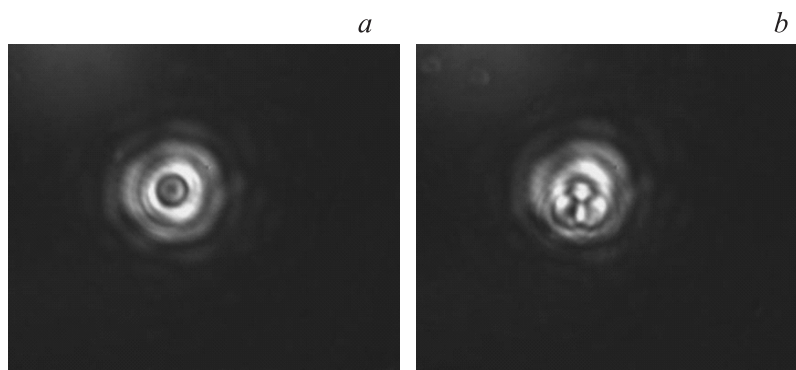


Рис. 3. Этапы захвата и манипуляции несколькими эритроцитами крысиной крови одновременно при помощи бесселева пучка: *a* — захвачена 1 частица, *b* — захвачено 3 частицы.

хватом и манипулированием микрообъектами, в том числе живыми клетками. Наиболее привлекательными для такой замены являются приложения, связанные с технологиями „лаборатория на чипе“ (lab-on-a-chip — англ.). Дополнительным стимулом на этом пути является недавно продемонстрированная возможность сверхфокусировки излучения с высоким параметром M^2 за счет генерации бесселевых лучей [14]. Сочетание компактности и высокой эффективности полупроводниковых лазеров с возможностью сверхфокусировки при сохранении значительной длины распространения получаемого таким образом бесселева пучка без расходимости излучения открывает широчайшие перспективы для их использования в устройствах „лаборатория на чипе“.

В наших экспериментах была также продемонстрирована возможность одновременного захвата и манипулирования сразу несколькими микроскопическими объектами одним бесселевым пучком при условии достижения достаточной оптической мощности. В отличие от известных экспериментов по одновременному оптическому манипулированию несколькими частицами [3], в данной работе дополнительные частицы захватывались в первое кольцо бесселева луча, как показано на рис. 3.

Таким образом, впервые продемонстрировано оптическое манипулирование микроскопическими объектами, в том числе живыми клетками, при помощи бесселевых пучков, полученных от полупроводниковых

лазеров. Кроме того, в процессе экспериментов было обнаружено, что бесселев пучок, полученный от полупроводникового лазера, при достаточной мощности позволяет манипулировать сразу несколькими микроскопическими объектами, захваченными в его центральное пятно и первое кольцо.

Список литературы

- [1] *Durnin J.* // J. Opt. Soc. Am. A. 1987. V. 4. P. 651–654.
- [2] *Ashkin A., Dziedzic J.M.* // Science. 1987. V. 235. P. 1517–1520.
- [3] *Garces-Chavez V., McGloin D., Melville H., Sibbett W., Dholakia K.* // Nature. 2002. V. 419. P. 45–47.
- [4] *Friese M.E.J., Rubinsztein-Dunlop H., Gold J., Hagberg P., Hanstorp D.* // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. P. 547–549.
- [5] *Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф.* // Известия вузов. Радиофизика. 1966. Т. 9. В. 1. С. 95–101.
- [6] *McLeod J.H.* // J. Opt. Soc. Am. 1954. V. 44. P. 592–597.
- [7] *Fisher P., Brown C., Morris J., López-Marisca C., Wright E., Sibbett W., Dholakia K.* // Opt. Express. 2005. V. 13. N 17. P. 6657–6666.
- [8] *Sokolovskii G.S., Dyudelev V.V., Losev S.N., Zolotovskaya S.A., Deryagin A.G., Kuchinskii V.I., Rafailov E.U., Sibbett W.* // Tech. Phys. Lett. 2008. V. 34. P. 1075–1077.
- [9] *Sokolovskii G.S., Dudelev V.V., Losev S.N., Deryagin A.G., Vinokurov D.A., Lyutetskii A.V., Pikhtin N.A., Slipchenko S.O., Tarasov I.S., Zolotovskaya S.A., Rafailov E.U., Kuchinskii V.I., Sibbett W.* // Tech. Phys. Lett. 2010. V. 36. P. 9–12.
- [10] *Sokolovskii G.S., Zolotovskaya S.A., Losev S.N., Dudelev V.V., Deryagin A.G., Kuchinskii V.I., Sibbett W., Rafailov E.U.* // Proc. SPIE. 2011. V. 7919. P. 791 90J. DOI:10.1117/12.877066.
- [11] *Siegman A.E.* How to (Maybe) Measure Laser Beam Quality. OSA Annual Meeting, 1998.
- [12] *Sokolovskii G.S., Dudelev V.V., Losev S.N., Butkus M., Soboleva K.K., Sobolev A.I., Deryagin A.G., Kuchinskii V.I., Sibbett W., Rafailov E.U.* // Quantum Electron. 2013. V. 43. P. 423–427.
- [13] *Sokolovskii G.S., Butkus M., Losev S.N., Dudelev V.V., Deryagin A.G., Kuchinskii V.I., Sibbett W., Rafailov E.U.* // Proc. SPIE. 2012. V. 8242. P. 82420T.
- [14] *Sokolovskii G.S., Dudelev V.V., Losev S.N., Deryagin A.G., Kuchinskii V.I., Sibbett W., Rafailov E.U.* // Tech. Phys. Lett. 2012. V. 38. P. 402–404.