

09

Генерация капельных бесселевых пучков при помощи полупроводникового лазера

© С.Н. Лосев¹, С.Х. Абдулразак², Д.В. Чистяков²,
В.Ю. Мыльников¹, Е.А. Когновицкая³, И.В. Беркутов²,
Ю.М. Задиранов¹, Н.Г. Дерягин¹, В.В. Дюделев¹,
В.И. Кучинский¹, Г.С. Соколовский¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: losev.sn@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 28 апреля 2018 г.

Изучены бесселевы пучки, полученные при помощи аксикона с существенно скругленной вершиной. Исследование интерференции двух волновых фронтов, возникающих при преломлении образующего пучка на несовершенном аксиконе, показало, что скругление его вершины приводит к возникновению в результирующем квазибесселевом пучке периодических пульсаций интенсивности, визуально напоминающих „капли“ света. Предложенная математическая модель демонстрирует прекрасное согласие с экспериментом.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.19.46685.17361

Полупроводниковые лазеры по праву считаются наиболее эффективными источниками излучения, что делает их незаменимыми для множества практических приложений, требующих высокой оптической мощности. К сожалению, получение необходимой во многих областях науки и техники высокой плотности мощности излучения полупроводниковых лазеров затруднено из-за многомодовой генерации и „шпотования“ излучения. В общем случае качество лазерного луча принято описывать при помощи параметра распространения M^2 [1], зачастую называемого параметром качества луча. Параметр M^2 определяет, во сколько раз размер фокусного пятна данного луча больше

пятна, достижимого при фокусировке идеального гауссова луча той же оптической системой. Для мощных полупроводниковых лазеров значение M^2 , как правило, варьируется в диапазоне от 20 до 50, что наглядно показывает трудность повышения их плотности мощности. Поэтому особый интерес представляет „интерференционная“ фокусировка за счет генерации так называемых бесселевых пучков [2,3], что позволяет сформировать протяженный фокус со значительно меньшими поперечными размерами, нежели при традиционной фокусировке [4].

Протяженный нерасходящийся центральный луч бесселева пучка, самовосстанавливающийся после встречи с препятствием, особенно привлекателен для использования в оптических пинцетах [5], для бесконтактного исследования и манипулирования биологическими объектами на микроскопическом уровне, сортировки смешанных коллоидных частиц [6], управления микромашинами и других приложений. Однако при формировании таких пучков при помощи конической линзы (аксикона) возникают нежелательные эффекты из-за технологически неизбежного скругления вершины аксикона: увеличивается поперечный размер центрального луча и уменьшается длина его распространения [7,8]. Поэтому настоящая работа посвящена изучению квазибесселевых пучков, полученных при помощи аксикона с существенно скругленной вершиной, что позволило обнаружить их важные особенности, имеющие большое практическое значение.

Упрощенная схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Она состоит из полупроводникового лазера с волоконным выводом излучения с длиной волны 1064 нм, аксикона с углом при вершине 160° и фотокамеры, укрепленной на микропозиционере, обеспечивающем ее продольное перемещение. Лазерное излучение, проходя через аксикон, формирует квазибесселев пучок, картины поперечного распределения интенсивности которого фиксируются фотокамерой через равные интервалы ($\sim 10 \mu\text{m}$). Из полученного набора снимков при помощи программы ImageJ [9] создается продольное распределение интенсивности исследуемого пучка.

Как видно из типичного распределения интенсивности квазибесселева пучка, представленного на рис. 2, а, при фокусировке лазерного излучения аксиконом со скругленной вершиной наблюдаются пульсации интенсивности центрального луча, визуально напоминающие „капли“ света. Возникновение наблюдаемого „капельного“ квазибесселева пучка объясняется тем, что образующий волновой фронт, проходя через аксикон вне сферической области, преломляется конически, что приводит к

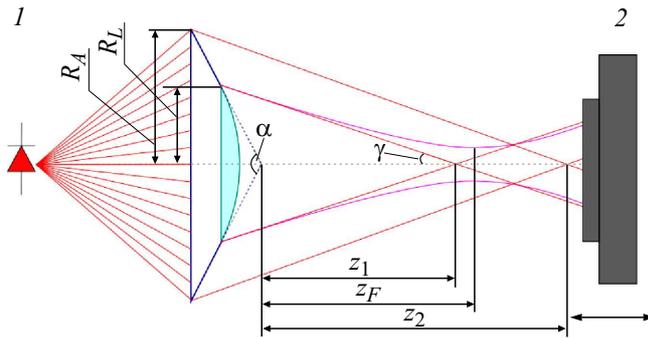


Рис. 1. Упрощенная схема эксперимента. 1 — полупроводниковый лазер с волоконным выводом излучения, 2 — цифровая фотокамера, укрепленная на микропозиционере, обеспечивающем ее продольное перемещение. R_A — радиус аксикона, R_L — радиус скругленной области, $z_{1(2)}$ — расстояние от вершины аксикона до начала (конца) геометрической области формирования бесселева пучка, z_F — расстояние от кончика аксикона до фокусного пятна, α — угол при вершине аксикона.

уменьшению проекции его волнового вектора на ось распространения. В то же время его преломление на сферической поверхности в области скругленной вершины аксикона не приводит к уменьшению проекции волнового вектора на оптическую ось. Поэтому на оптической оси (совпадающей с центральным лучом квазибесселева пучка) появляются осцилляции интенсивности излучения, вызванные интерференцией „сферической“ и „конической“ компонент. Наблюдаемые в эксперименте осцилляции интенсивности боковых колец квазибесселева пучка объясняются подобным образом.

Из отмеченного выше следует, что для численного моделирования „капельного“ бесселева пучка необходимо представить аксикон в виде комбинации усеченной конической линзы и „добавочной“ плосковыпуклой сферической линзы [7], как схематически показано на рис. 1. Ранее в работе [8] была предложена математическая модель, в которой аксикон со скругленной вершиной представляется как гиперboloид вращения. Несмотря на математическую строгость предложенной в [8] модели, ее использование не обеспечивает простоту и наглядность физической интерпретации наблюдаемых явлений, предлагаемую подходом, развиваемым в настоящей работе.

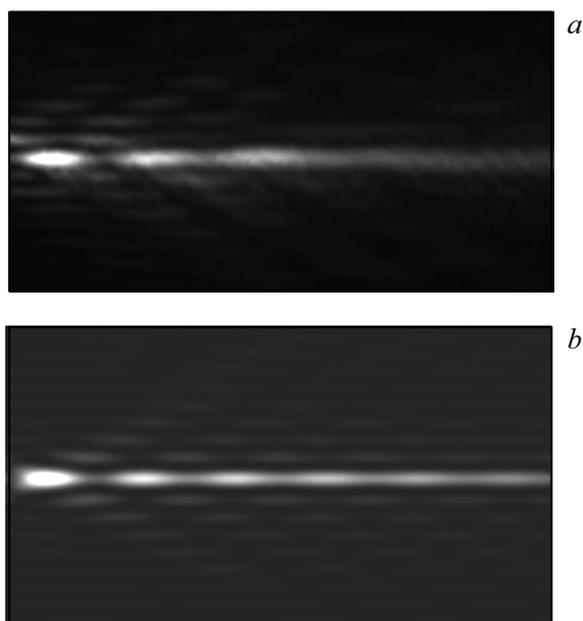


Рис. 2. Распределение интенсивности капельного луча, полученное в эксперименте (*a*) и в результате численного моделирования (*b*).

Исследование вершины использовавшегося в эксперименте аксикона на профилометре Sloan DECTAC 3030 и последующая обработка полученного профиля (рис. 3) показали, что поперечный размер скругленной области составляет $\sim 470 \mu\text{m}$, а радиус скругления $\sim 1.5 \text{ mm}$. При показателе преломления ~ 1.5 фокусное расстояние „добавочной линзы“ составляет $\sim 3 \text{ mm}$.

Как показано на рис. 1, расстояния от вершины аксикона до начала (конца) геометрической области распространения бесселева пучка $z_{1(2)}$ зависят от углов α и γ следующим образом:

$$z_{1(2)} = R_{L(A)} (\text{ctg } \gamma - \text{ctg}(\alpha/2)), \quad (1)$$

где R_A — поперечный размер аксикона, R_L — поперечный размер скругленной области. При этом углы α и γ связаны друг с другом

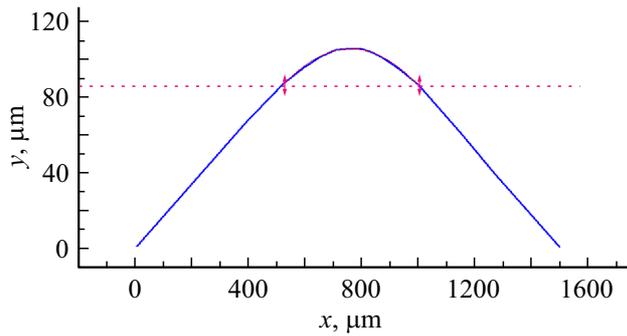


Рис. 3. Профиль вершины аксикона с углом 160° . Пунктирная линия визуально отделяет сферическую часть аксикона от конической. Поперечный размер скругленной области $\sim 470 \mu\text{m}$, радиус скругления $\sim 1.5 \text{ mm}$. Для показателя преломления ~ 1.5 фокусное расстояние „добавочной линзы“ составляет $\sim 3 \text{ mm}$.

формулой

$$y = \arcsin[n \cos(\alpha/2)] - \frac{\pi}{2} + \frac{\alpha}{2}, \quad (2)$$

где n — показатель преломления материала. Если считать, что добавочная линза в области сшивания с аксиконом имеет такой же радиус кривизны, то фокусное расстояние такой линзы легко определить по формуле

$$f = \frac{R_L}{(n-1) \sin \beta}, \quad (3)$$

где $\beta = (\pi - \alpha)/2$ — дополнительный угол при вершине аксикона. В результате $z_F = f - R_L \text{ctg}(\alpha/2)$. Введем числовую апертуру линзы $NA = R_L/f = (n-1) \sin \beta$. Предполагаем, что на аксикон падает гауссов пучок с длиной волны λ и амплитудой поля в плоскости аксикона

$$E_0(r) = A \exp\left(-\frac{r^2}{R_L^2}\right). \quad (4)$$

В этом случае амплитуда поля бesselева пучка будет иметь вид [10]:

$$E_B(r, z) = A \theta(z - z_1) \sqrt{\frac{8\pi\gamma R_A}{\lambda} \frac{z}{z_2}} E^{-(z/z_2)^2} J_0(k_r r) E^{-ik_z z}, \quad (5)$$

где $k_r = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \gamma)$ и $k_z = \sqrt{(2\pi/2)^2 - k^2}$ — поперечный и продольный волновой вектор света, преломленного аксиконом. Функция Хэвисайда $\theta(z - z_1)$ появляется здесь из-за того, что не вся поверхность участвует в формировании бесселева пучка ввиду скругленной вершины аксикона.

Амплитуда электромагнитного поля гауссова пучка, получаемая посредством фокусировки добавочной линзы, имеет вид

$$E_G(r, z) = \frac{A E_G}{\sqrt{1 + \left(\frac{z - z_F}{z_r}\right)^2}} \exp \left[- \frac{r^2}{w_0^2 \left(1 - i \left(\frac{z - z_F}{z_r}\right)\right)} - i k_0 (z - z_F) \right], \quad (6)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda$ — волновой вектор света в вакууме, $w_0 = \frac{\pi}{\lambda \cdot NA}$ — ширина пучка, $z_r = \frac{\pi}{\lambda} w_0^2$ — рэлеевская длина, $E_G = H_L \frac{\pi}{\lambda} NA$. Интенсивность будет равна

$$I = |E_G(r, z) + E_B(r, z)|^2. \quad (7)$$

Результат численного моделирования продольного распределения интенсивности капельного бесселева пучка представлен на рис. 2, *b* и демонстрирует прекрасное согласие с экспериментом.

Полученные результаты представляют интерес одновременно с двух точек зрения. Во-первых, следует учитывать, что в силу технологических ограничений создать идеальный аксикон не представляется возможным: его вершина неизбежно скругляется в результате полировки. Поэтому проявление описанных эффектов свойственно всем аксиконом в большей или меньшей степени. В частности, наблюдаемое во многих экспериментах периодическое уменьшение интенсивности колец бесселевых пучков [5, 11–13] получает наглядное объяснение. Во-вторых, продемонстрированный простой способ генерации капельных бесселевых пучков может быть использован для создания так называемых „бутылочных“ пучков, генерируемых с помощью оптической схемы из двух аксиконов с разными углами при вершине [14], а также при помощи пространственных модуляторов света (spatial light modulators, SLM) [15, 16]. Важной представляется также возможность применения капельных бесселевых пучков в сверхразрешающей микроскопии [17].

Таким образом, исследованные в работе бесселевы пучки, полученные при помощи аксикона со скругленной вершиной, могут найти важное практическое применение.

Список литературы

- [1] Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios. ISO 11146-2. BSI, 2015. 26 p.
- [2] Зельдович Б.Я., Пилипецкий Т.А. // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 9. № 1. С. 95–101.
- [3] Durnin J. // J. Opt. Soc. Am. A. 1987. V. 4. N 4. P. 651–654.
- [4] Соколовский Г.С., Дюделев В.В., Лосев С.Н., Дерягин А.Г., Кучинский В.И., Сиббет В., Рафаилов Э.У. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 9. P. 8–15. [Sokolovskii G.S., Dudelev V.V., Losev S.N., Deryagin A.G. // Tech. Phys. Lett. 2012. V. 38. N 5. P. 402–404.].
- [5] Garcés-Chávez V., Mc Gloin D., Melville H., Sibbett W., Dholakia K. // Nature. 2002. V. 419. N 6903. P. 145–147.
- [6] Mac Donald M.P., Spalding G.C., Dholakia K. // Nature. 2003. V. 426. N 6965. P. 421–424.
- [7] 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 N 5. P. 423–427.
- [8] Brzobohatý O., Čížmár T., Zemánek P. // Opt. Express. 2008. V. 16. N 17. P. 12688–12700.
- [9] ImageJ [Electronic resource]. URL: <https://imagej.nih.gov/ij/>
- [10] Пятницкий Л.Н. Волновые бесселевы пучки. М.: Физматлит, 2012. 408 с.
- [11] Dudutis J., Gečys P., Račiukaitis G. // Opt. Express. 2016. V. 24. N 25. P. 28433–28443.
- [12] 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 (1–7).
- [13] Соколовский Г.С., Дюделев В.В., Лосев С.Н., Дерягин А.Г., Винокуров Д.А., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Тарасов И.С., Золотовская С.А., Рафаилов Э.У., Кучинский В.И., Сиббет В. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 1. P. 22–30. [Sokolovskii G.S., Dudelev V.V., Losev S.N., Deryagin A.G., Vinokurov D.A., Lyutetskii A.V., Pikhitin N.A., Slipchenko S.O., Tarasov I.S., Zolotovskaya S.A., Rafailov E.U., Kuchinskii V.I. // Tech. Phys. Lett. 2010. V. 36. N 1. P. 9–12.].
- [14] Du T., Wang T., Wu F. // Opt. Commun. 2014. V. 317. P. 24–28.
- [15] Mc Gloin D., Spalding G.C., Melville H., Sibbett W., Dholakia K. // Opt. Commun. 2003. V. 225. N 4-6. P. 215–222.
- [16] Li L., Lee W.M., Xie X., Krolkowski W., Rode A.V., Zhou J. // Opt. Lett. 2014. V. 39. N 8. P. 2278–2281.
- [17] Rogers E.T.F., Lindberg J., Roy T., Savo S., Chad J.E., Dennis M.R., Zheludev N.I. // Nature Mater. 2012. V. 11. N 5. P. 432–435.