

07

Исследование пространственно-инвариантных пучков, полученных от полупроводниковых лазеров с широким полоском с торцевым выводом излучения

© Г.С. Соколовский, В.В. Дюделев, С.Н. Лосев, А.Г. Дерягин,
Д.А. Винокуров, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко,
И.С. Тарасов, С.А. Золотовская, Э.У. Рафаилов,
В.И. Кучинский, В. Сиббет

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Carnegie Laboratory of Physics, Division of Electronic Engineering
and Physics, University of Dundee, Nethergate, Dundee, DD1 4HN, UK
School of Physics and Astronomy, University of St. Andrews, North Haugh,
St. Andrews, KY169SS, UK
E-mail:gs@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 13 августа 2009 г.

При помощи широкополосковых полупроводниковых лазеров с торцевым выводом излучения получены пространственно-инвариантные пучки света с мощностями и диаметрами центрального луча, пригодными для применения в устройствах типа оптического пинцета. На основании исследования распространения бесселевых пучков, полученных при помощи широкополосковых лазеров со спектрально-селективным резонатором, показано, что пространственная однородность излучения оказывает гораздо большее влияние на формирование бесселевых пучков, чем его временная когерентность, при этом основным фактором, ограничивающим длину распространения пространственно-инвариантных пучков без искажения центрального луча, является астигматизм и многомодовый состав излучения.

В последнее время бесселевы световые пучки привлекают внимание исследователей из-за их удивительного свойства — сохранять пространственную инвариантность, т.е. распространяться на значительное расстояние без расходимости [1]. Это свойство открывает перспективы для их использования в устройствах для манипулирования микро- и нано-

объектами, так называемых оптических пинцетах, а также для управления микромашинами и других применений. Следует отметить, что преобразование гауссовых пучков газовых лазеров аксиконом (конической линзой) обсуждалось ранее еще в работах Зельдовича и коллег [2–4]. Позднее в работах [5,6] сообщалось о генерации пространственно-инвариантных пучков от различных полупроводниковых источников света: светоизлучающих диодов, поверхностно-излучающих лазеров, торцевых лазеров, торцевых лазеров с широким полоском.

Настоящая работа посвящена более детальному исследованию формирования пространственно-инвариантных пучков от полупроводниковых лазеров с широким полоском с торцевым выводом излучения, в том числе с внешним резонатором [7], а также широкополосковых лазеров с искривленными штрихами распределенного брэгговского зеркала (и-РБЗ) [8,9]. Представляется, что использование таких лазеров обеспечит формирование бесселевых пучков от полупроводниковых источников излучения с уровнем мощности в центральном пятне, достаточным для большинства практических применений.

Для получения бесселевых пучков в наших экспериментах использовался аксикон с углом при вершине 170° , обеспечивающий формирование центрального пятна бесселева пучка размером $10\ \mu\text{m}$. Перед прохождением через аксикон излучение полупроводникового лазера коллимировалось оптической системой, включающей в себя цилиндрическую микролинзу для фокусировки излучения в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу.

На основании результатов наших недавних исследований [6] было сделано предположение о том, что пространственная когерентность излучения полупроводниковых источников оказывает гораздо большее влияние на формирование бесселевых пучков, чем его временная когерентность. Для подтверждения этого положения нами был проведен эксперимент по исследованию формирования бесселевых пучков от широкополоскового полупроводникового лазера с внешним резонатором с дифракционной решеткой, работающей в схеме Литрова (схема эксперимента аналогична описанной в работе [7]). Такая конструкция позволяет при небольшой расстройке резонатора значительно изменять ширину спектра выходного излучения (т.е. изменять его временную когерентность), не изменяя пространственных параметров выходного пучка. На рис. 1, *a* и *b* приведены картины распределения интенсивности в поперечном сечении бесселева пучка, полученного при помощи

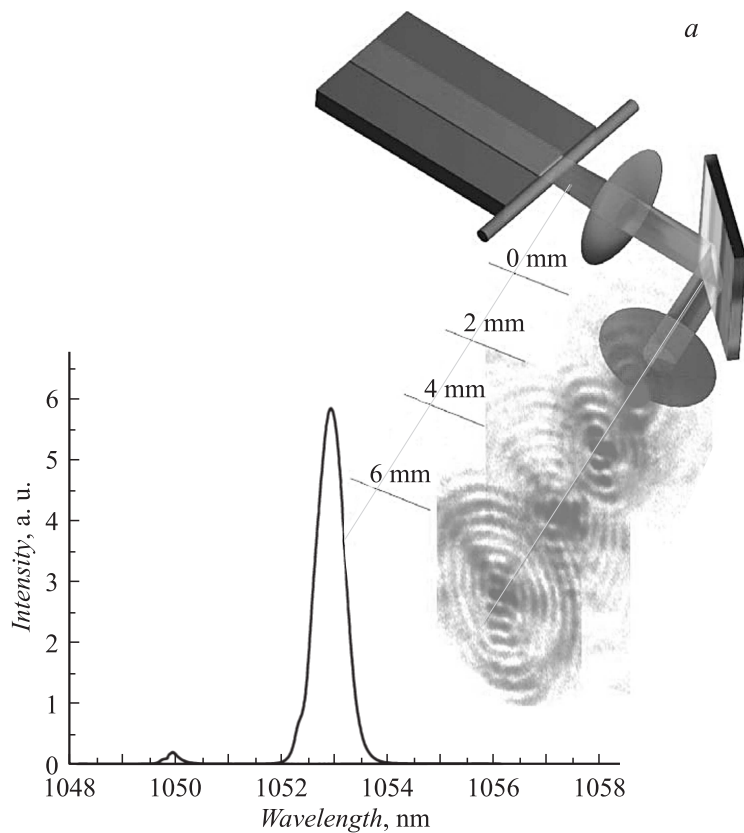


Рис. 1. Картины распределения интенсивности в поперечном сечении бесселева пучка, полученного при помощи широкополосового лазера с внешним резонатором, на различном расстоянии от начальной точки его формирования. На вставках показаны соответствующие спектры генерации с полушириной ~ 0.6 nm (a) и ~ 1.2 nm (b).

широкополосового лазера с внешним резонатором, на различном расстоянии от начальной точки его формирования. Ширина спектра в первом случае равнялась ~ 0.6 nm, а во втором ~ 1.2 nm. Мощность излучения в центральном пятне бесселева пучка составляла 7

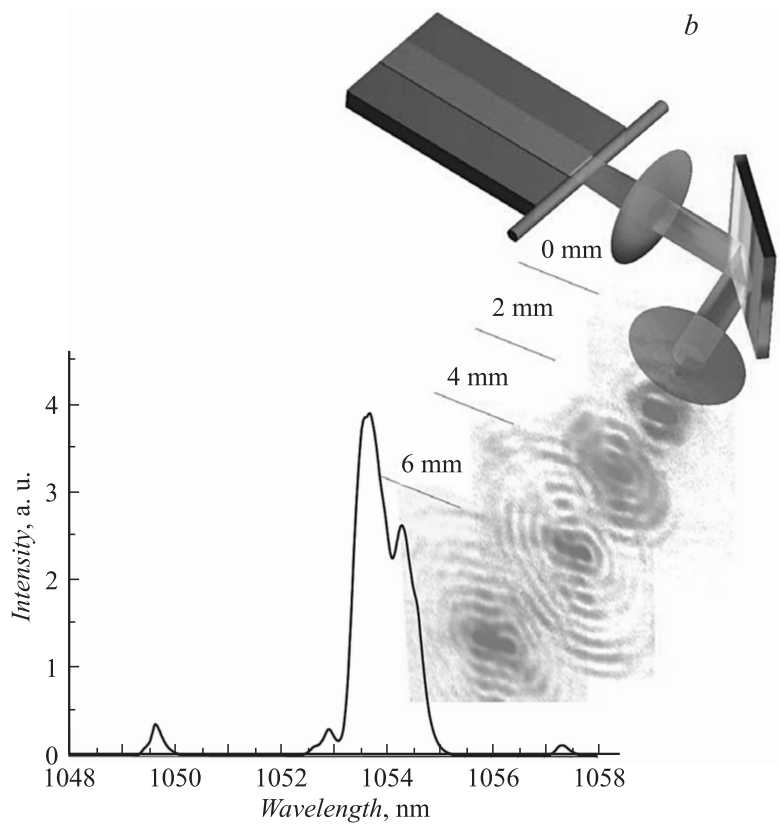


Рис. 1 (продолжение).

и 5.5 mW соответственно, при общей мощности излучения 450 mW и апертуре гауссова луча 2 mm. Как видно из рис. 1, *a* и *b*, длина распространения бесселевых пучков без заметных искажений в обоих случаях примерно одинакова (3–4 mm). Отметим, что эта величина существенно меньше предельной длины распространения (23 mm), соответствующей облучению аксикона плоской монохроматической волной. Это объясняется плохой пространственной когерентностью

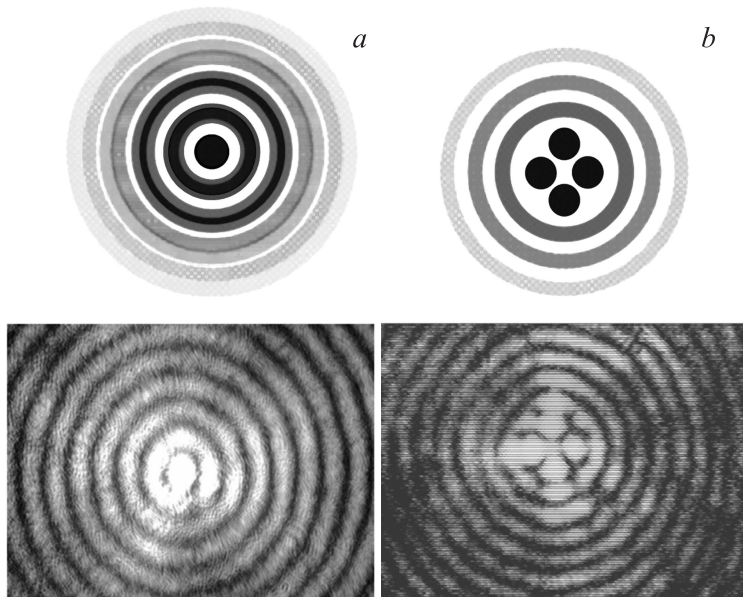


Рис. 2. Схематические изображения бesselевых пучков, образованных много-модовым излучением полупроводникового лазера (*a*), шпотованным излучением (*b*), при облучении аксикона под углом, а также соответствующие типичные экспериментальные распределения интенсивности (*c*).

(т.е. неоднородностью) излучения полупроводниковых лазеров, обусловленной его многомодовым характером, астигматизмом, шпотованием и т.д.

Возникающие при получении бesselевых пучков трудности, связанные с пространственной неоднородностью излучения полупроводниковых лазеров с широким полоском, могут быть разделены на три основные группы.

1) Многомодовый характер излучения лазеров с широким полоском. При многомодовом излучении одновременная коллимация всех мод оказывается невозможной из-за разницы их расходимости, что приводит к „размытию“ колец бesselева пучка. Важно отметить, что при этом

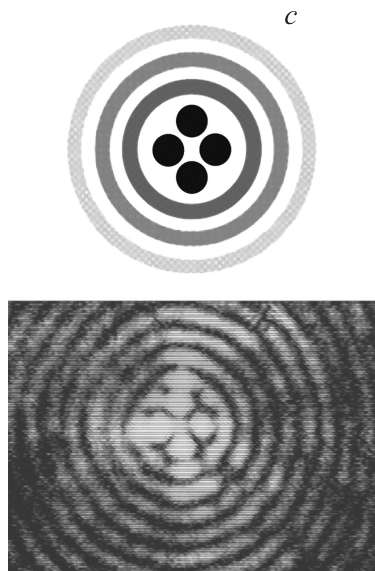


Рис. 2 (продолжение).

размер центрального луча практически не изменяется, как схематически показано на рис. 2, *a*.

2) Астигматизм, а также шпотование излучения лазера с широким полоском приводит к тому, что при распространении бесселева пучка, полученного от такого лазера, его центральный луч постепенно искажается, приобретая неправильную продолговатую форму (или в случае шпотования, превращаясь в линию, состоящую из ярких точек), как показано на рис. 2, *b*.

3) Облучение аксикона под углом. При разъюстировке оптической схемы центральная часть бесселева пучка искажается, образуя ромбовидную каустику (рис. 2, *c*). Размер возникающей каустики пропорционален расстоянию от точки наблюдения до вершины аксикона и углу, под которым облучается аксикон. Этот эффект описан в работах [10,11] для газовых и твердотельных лазеров и, на наш взгляд, не нуждается в подробном дополнительном рассмотрении. Следует лишь отметить,

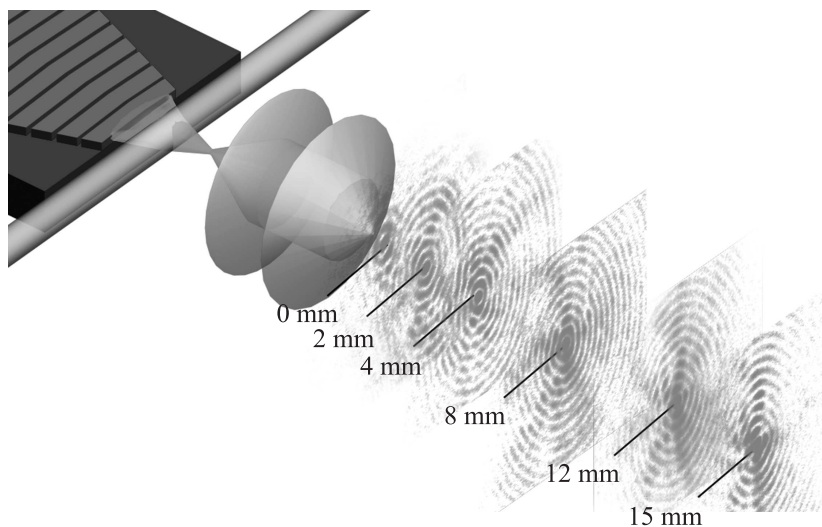


Рис. 3. Картины распределения интенсивности в поперечном сечении бесселева пучка, полученного при помощи и-РБЗ лазера, на различном расстоянии от начальной точки его формирования.

что высокий астигматизм излучения может приводить к тому, что излучение из боковых частей широкого полоска падает на аксикон под значительным углом, вызывая образование каустики даже при идеальной юстировке оптической схемы.

Для проверки этих положений нами были проведены эксперименты по генерации бесселевых лучей при помощи широкополоскового полупроводникового лазера с искривленными штрихами решетки обратной связи [8,9]. Штрихи решетки и-РБЗ лазера представляют собой дуги концентрических окружностей, обеспечивая цилиндрическую симметрию резонатора, за счет чего все моды приобретают общий „геометрический источник“ [12], что, очевидно, должно снизить негативное влияние астигматизма и многомодового состава излучения за счет обеспечения лучшей пространственной однородности при коллимации расходящегося лазерного излучения перед формированием бесселева пучка.

Действительно, при помощи широкополоскового и-РБЗ лазера нами был сформирован бесселев пучок с наибольшей длиной распростра-

нения, в котором искажение центрального луча начинается только на расстоянии 15 mm от начальной точки формирования (рис. 3). Сравнение характера распространения пространственно-инвариантных световых пучков от полупроводниковых лазеров с широким полоском в случае линейной (рис. 1) и цилиндрической (рис. 3) симметрии резонатора наглядно показывают, что именно астигматизм и многомодовый характер излучения в полупроводниковых лазерах с широким полоском оказывают наиболее негативное влияние на формирование бесселевых пучков. Значительного снижения указанного влияния можно добиться, используя в полупроводниковых лазерах с широким полоском не линейную, а цилиндрическую симметрию резонатора, в частности за счет применения и-РБЗ.

Таким образом, в настоящей работе при помощи широкополосковых полупроводниковых лазеров с торцевым выводом излучения получены пространственно-инвариантные пучки света с мощностями и диаметрами центрального пятна, пригодными для применения в устройствах типа оптического пинцета. На основании анализа распространения бесселевых пучков, полученных при помощи широкополосковых лазеров со спектрально-селективным резонатором, показано, что пространственная однородность излучения оказывает гораздо большее влияние на формирование бесселевых пучков, чем его временная когерентность, при этом основным фактором, ограничивающим длину распространения пространственно-инвариантных пучков без искажения центрального луча, является астигматизм и многомодовый состав излучения.

Настоящая работа поддержана программами президиума РАН „Квантовые наноструктуры“ и ОФН РАН „Когерентное оптическое излучение полупроводниковых соединений и структур“, грантами правительства Санкт-Петербурга, а также Лондонского и Эдинбургского королевских обществ Великобритании.

Список литературы

- [1] *Durnin J.* // J. Opt. Soc. Am. 1987. A4. P. 651–654.
- [2] *Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф.* // Известия вузов. Радиофизика. 1966. Т. 9. В. 1. С. 95–101.
- [3] *Зельдович Б.Я., Мульченко Б.Ф., Пилипецкий Н.Ф.* // ЖЭТФ. 1970. Т. 58. В. 3. С. 794–795.

- [4] Бункин Ф.В., Коробкин В.В., Куринный Ю.А., Полонский Л.Я., Пятницкий Л.Н. // Квантовая электроника. 1983. Т. 10. В. 2. С. 443–444.
- [5] Fischer P., Brown C., Morris J., López-Mariscal C., Wright E., Sibbett W., Dholakia K. // Opt. Express. 2005. V. 13. N 17. P. 6657–6666.
- [6] Соколовский Г.С., Дюделев В.В., Лосев С.Н., Золотовская С.А., Дерягин А.Г., Кучинский В.И., Рафаилов Э.У., Сиббетт В. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 24. С. 75–82.
- [7] Винокуров Д.А., Дерягин А.Г., Дюбелев В.В., Кучинский В.И., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Соколовский Г.С., Станкевич А.Л., Тарасов И.С. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 5. С. 15–21.
- [8] Sokolovskii G.S., Rafailov E.U., Birkin D.J.L., Sibbett W. // IEEE Quant. El. 2000. V. 36. N 12. P. 1412–1420.
- [9] Yanson D.A., Rafailov E.U., Sokolovskii G.S., Kuchinskii V.I., Bryce A.C., Marsh J.H., Sibbett W. // J. Appl. Phys. 2004. V. 95. N 3. P. 1502–1509.
- [10] Zh. Bin, Li Zhu // Appl. Opt. 1998. V. 37. N 13. P. 2563–2568.
- [11] Thaning A., Jaroszewicz Z., Friberg A.T. // Appl. Opt. 2003. V. 42. N 1. P. 9–17.
- [12] Sokolovskii G.S., Gadjiev I.M., Deryagin A.G., Dudelev V.V., Losev S.N., Kuchinskii V.I., Rafailov E.U., Sibbett W. // Advanced Solid-State Photonics 2005 (ASSP2005). TOPS V. 98 / I. Sorokina and C. Denman eds. P. 282–287.