

06;07

## Получение пространственно-инвариантных световых пучков при помощи полупроводниковых источников излучения

© Г.С. Соколовский, В.В. Дюделев, С.Н. Лосев, С.А. Золотовская,  
А.Г. Дерягин, В.И. Кучинский, Э.У. Рафаилов, В. Сиббетт

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: gs@mail.ioffe.ru  
Carnegie Laboratory of Physics, Division of Electronic Engineering  
and Physics, University of Dundee, Nethergate, Dundee, DDI 4HN, UK  
School of Physics and Astronomy, University of St. Andrews, North Haugh,  
St. Andrews, KY16 9SS, UK

Поступило в Редакцию 26 марта 2008 г.

Исследована возможность получения пространственно-инвариантных пучков света при использовании в качестве источника излучения различных полупроводниковых излучателей. Для получения пространственно-инвариантных (Бесселевых) пучков использовались аксиконы с углами  $178$  и  $170^\circ$ , что обеспечивало диаметр центрального пятна  $100$  и  $10 \mu\text{m}$  соответственно. В качестве источника излучения применялись различные типы светоизлучающих диодов, квазиодномодовые поверхностно-излучающие полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором и торцевые лазерные диоды с широким полоском ( $100 \mu\text{m}$ ). Показано, что полупроводниковые излучатели являются перспективными источниками для получения пространственно-инвариантных пучков света для применения в различных устройствах манипулирования микроскопическими и наноразмерными объектами, в том числе в так называемых „оптических пинцетах“.

PACS: 42.55.Px

Пространственно-инвариантные пучки света, распространяющиеся без изменения интенсивности, описаны Дурниным (J. Durnin) [1,2] в 1987 г. и были названы Бесселевыми пучками, так как их профиль описывается функцией Бесселя первого рода нулевого порядка. В проек-

ции на плоскость, перпендикулярную к оси распространения, подобные пучки выглядят как яркое пятно, окруженное системой концентрических колец. На практике Бесселевы пучки получаются в результате интерференции сходящихся лучей, возникающей при прохождении сколлимированного Гауссова пучка через коническую линзу — аксикон. Диаметр центрального пятна определяется углом аксикона и может быть порядка длины волны излучения. Практически получаемые Бесселевы пучки имеют конечную длину распространения, которая зависит от диаметра поперечного сечения исходного сколлимированного пучка. При этом длина распространения Бесселева пучка может достигать нескольких метров. Еще одним замечательным свойством Бесселевых пучков является то, что их центральный луч „самовосстанавливается“ после встречи с препятствием [3]. Практическое применение инвариантные пучки света нашли в устройствах для манипулирования микроскопическими объектами, так называемых оптических пинцетах, принцип действия которых основан на законе сохранения импульса при преломлении света на захватываемой частице хорошо сфокусированным пучком лазерного излучения [4]. Именно применение в оптических пинцетах пространственно-инвариантных пучков света позволило существенно улучшить их характеристики. В частности, оптическим пинцетом на основе Бесселевых пучков света возможно производить манипуляции не с одним, а одновременно с несколькими микроскопическими объектами [5]. Применение Бесселевых пучков значительно увеличивает рабочую дистанцию между объектом манипуляций и фокусирующей оптикой и не требует тонкой юстировки, что делает такие системы более гибкими и привлекательными в контексте практических применений.

Выбор источника излучения для оптических пинцетов обоснован тем, что для получения Бесселевых пучков, согласно устоявшемуся мнению, требуются источники света с высокой пространственной когерентностью, такие как газовые и твердотельные лазеры, что делает оптический пинцет весьма громоздким и дорогостоящим инструментом. Однако в работе [6] было показано, что при сильном диафрагмировании возможно получение инвариантных пучков света даже от галогенной лампочки, дающей некогерентное излучение. При этом следует отметить, что диафрагмирование приводит к значительным оптическим потерям и мощность излучения в центральном пятне получаемого таким образом Бесселева пучка недостаточна для практических применений. Весьма привлекательным представляется использование в качестве источников излучения для получения пространственно-

инвариантных световых пучков полупроводниковых излучателей (светодиодов и лазеров), которые по своим когерентным характеристикам занимают промежуточное положение между лампой накаливания и газовыми/твердотельными лазерами и при этом обладают большой выходной мощностью, высокой эффективностью и малыми размерами.

В настоящей работе исследуется возможность получения пространственно-инвариантных пучков света при помощи полупроводниковых источников света, таких как светодиоды (СИД), торцевые полупроводниковые лазеры (ППЛ) с широким полоском и поверхностно излучающие лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL — англ.).

Схема эксперимента была построена следующим образом: свет от источника излучения проецировался микрообъективами с различными коэффициентами увеличения на аксикон с углом  $178^\circ$  (СИД, торцевой ППЛ) или  $170^\circ$  (VCSEL), что обеспечивало диаметр центрального пятна 100 и  $10\ \mu\text{m}$  соответственно. Результирующая картина излучения после аксикона регистрировалась при помощи ПЗС матрицы и объектива, использовавшегося при необходимости телескопирования.

Исследуемые в работе полупроводниковые источники света имели различную длину когерентности  $l_c$ , которая напрямую связана с шириной спектра источника света [7]:

$$l_c = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}, \quad (1)$$

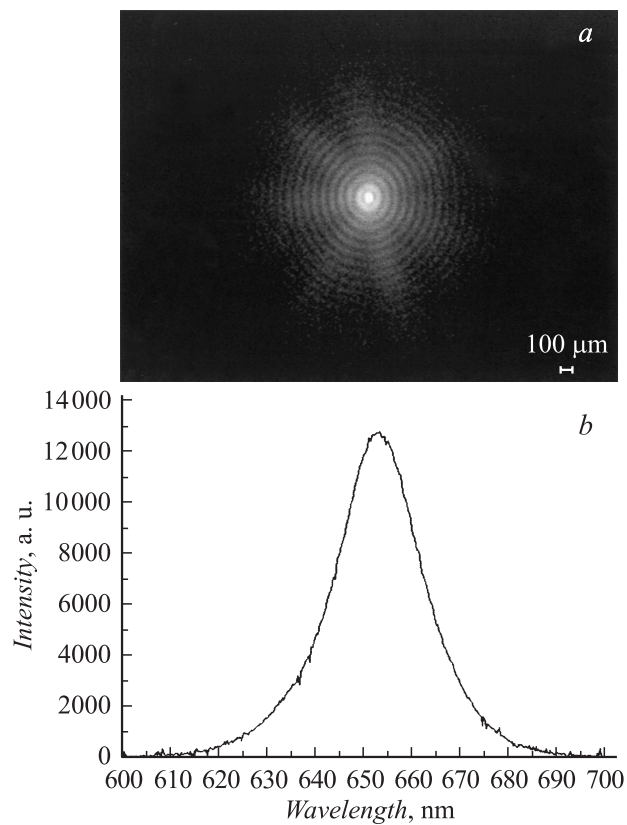
где  $\lambda_0$  — длина волны максимума спектра излучения в воздухе,  $\Delta\lambda$  — полуширина спектра излучения. В таблице приведены параметры исследованных в этой работе полупроводниковых источников света.

На рис. 1, *a* приведена характерная картина Бесселева пучка, полученная при использовании СИД в качестве источника излучения (№ 4 из таблицы). На рис. 1, *b* приведен соответствующий спектр излучения СИД. В связи с низкой длиной когерентности СИД для получения Бесселевых пучков требовалось либо диафрагмировать источник излучения, либо располагать его на расстоянии, значительно большем фокусного расстояния первого микрообъектива. Это расстояние варьировалось в зависимости от размера светоизлучающего кристалла и формы корпуса светодиода, что демонстрировало влияние пространственной когерентности на возможность получения Бесселевых лучей. Так, например, для светодиодов с практически одинаковой длиной когерентности (№ 1 и 4 в таблице) это расстояние

Параметры исследуемых полупроводниковых источников света

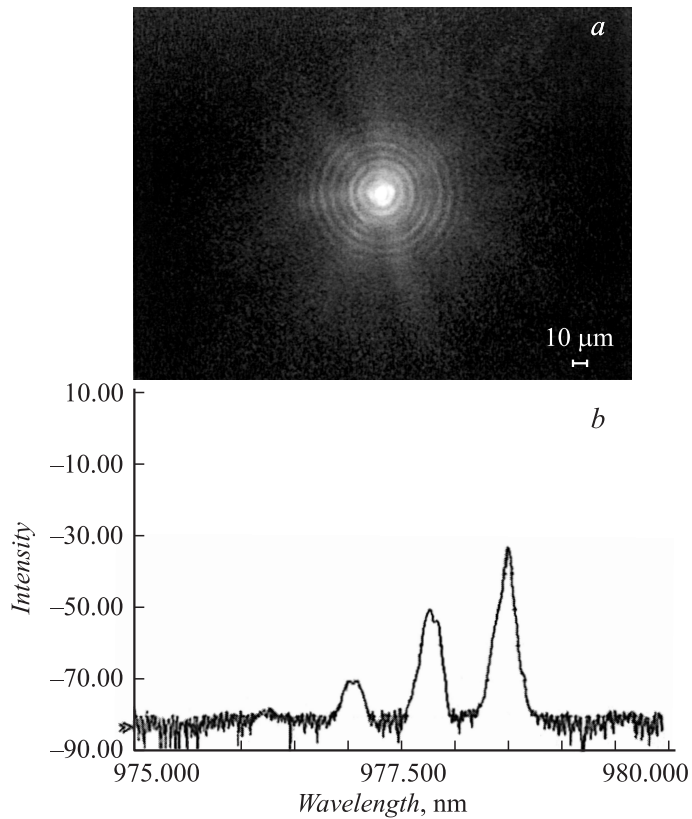
№	Источник света	Ток, мА	Полуширина спектра, nm	$\lambda_0$ , nm	Длина когерентности, $\mu\text{m}$
1	Мощный красный СИД LXHL-MD1D, Lumileds	36	19	642	22
2	Мощный синий СИД LXHL-LB3C, Lumileds в параболическом корпусе с диаметром светоизлучающей поверхности 27 mm; ООО „Белый свет“	36	20	473	11
3	Зеленый СИД, LY517PPG1-70, COTCO	2	30	528	9.2
4	Красный СИД КИПД 21 К-К, НПО „Планета“ — СИД в параболическом корпусе с диаметром светоизлучающей поверхности 20 mm; ООО „Белый свет“	8	20	652	21
5	Торцевой широкополосковый лазер [8]	400	0.8	1052.5	1385
6	То же	1000	2.1	1052	527
7	VCSEL DO-701d, Innolume GmbH	1	0.1	988.5	9771
8	То же	3	0.9	988.5	1086

Письма в ЖТФ, 2008, том 34, вып. 24



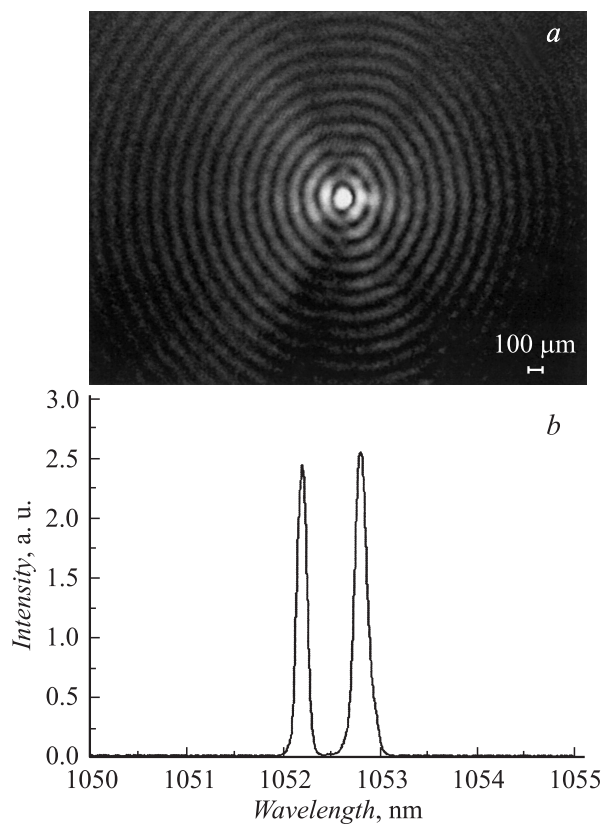
**Рис. 1.** *a* — картина Бесселева пучка, полученная при помощи СИД КИПД 21К-К с параболическим эпоксидным корпусом с диаметром торца 20 mm, ООО „Белый свет“, угол аксикона 178°, диаметр диафрагмы 5 mm,  $I = 8$  mA; *b* — спектр излучения этого СИД,  $I = 8$  mA.

различалось в несколько раз, что, по нашему мнению, связано с различием пространственной когерентности данных источников света. Следует отметить, что этот тип когерентности играет важную роль в образовании Бесселевых пучков. Судя по полученным результатам, наибольшей пространственной когерентностью из исследованных СИД обладал светодиод с малым размером светоизлучающего кристалла ( $300 \times 300 \mu\text{m}$ ) и параболической формой эпоксидного корпуса.



**Рис. 2.** *a* — картина Бесселева пучка, полученная при помощи VCSEL DO-701d, Innolume GmbH, угол аксикона  $170^\circ$ ,  $I = 1$  mA; *b* — спектр излучения VCSEL,  $I = 1$  mA.

На рис. 2, *a* приведено изображение Бесселева пучка, полученное при помощи квазиодномодового VCSEL при значении тока накачки  $I = 1$  mA. Спектр излучения такого лазера приведен на рис. 2, *b*. При увеличении тока накачки лазер переходил в многомодовый режим генерации, что приводило к уменьшению длины когерентности (см. таблицу), и к ухудшению пространственной когерентности, что, в свою очередь, вело к некоторому уменьшению контраста колец и их количества.



**Рис. 3.** *a* — картина Бесселева пучка, полученная при помощи торцевого ППЛ, угол аксикона  $178^\circ$ ,  $I = 400$  mA; *b* — спектр излучения торцевого ППЛ,  $I = 400$  mA.

Весьма интересным объектом для получения пространственно-инвариантных пучков света являются торцевые ППЛ, которые позволяют получать до 16 W выходной мощности излучения в непрерывном режиме генерации [8]. Мы исследовали возможность получения пространственно-инвариантных пучков света при помощи ППЛ с шириной полоска  $100\ \mu\text{m}$ . На рис. 3, *a* приведена картина Бесселева пучка при величине тока накачки  $I = 400$  mA, близкой к порогу генерации. Соответствующий спектр ППЛ приведен на рис. 3, *b*. При увеличении

тока происходит изменение картины Бесселева пучка, в которой может наблюдаться не одно центральное яркое пятно, а несколько, что объясняется возникновением у полупроводникового лазера генерации в каналах (так называемого „шпотования“).

Таким образом, в настоящей работе приводятся результаты исследования, которые показали, что в качестве источников излучения для получения пространственно-инвариантных (Бесселевых) пучков света могут быть использованы различные типы полупроводниковых источников, такие как светоизлучающие диоды, а также поверхностно-излучающие и торцевые полупроводниковые лазеры. Длина распространения Бесселевых лучей определялась диаметром поперечного сечения исходного луча и составляла от единиц до десятков сантиметров в зависимости от угла аксикона. Выявление наиболее оптимальных конструкций полупроводниковых излучателей для получения пространственно-инвариантных пучков с мощностью излучения в центральном пятне, достаточной для практических применений, требует проведения дополнительных исследований.

Авторы выражают благодарность И.С. Тарасову, Н.А. Пихтину, А.В. Лютецкому (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), А.Р. Ковшу, Д.А. Лившицу, С.С. Михрину (Innolume GmbH), А.В. Абрамову, Н.Г. Дерягину (ООО „Белый свет“) за предоставленные лазеры и светодиоды, а также П. Фишеру за обсуждение результатов и полезные советы.

Работа поддержана грантом Администрации Санкт-Петербурга.

## Список литературы

- [1] *Durnin J.* // J. Opt. Soc. Am. 1987. A 4. P. 651–654.
- [2] *Durnin J., Miceli J.J., Eberly J.H.* // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. N 15. P. 1499–1501.
- [3] *Bouchal Z., Wagner J., Chlup M.* // Opt. Commun. 1998. V. 151. P. 207–211.
- [4] *Ashkin A., Dziedzic J.M., Bjorkholm J.E., Chu S.* // Opt. Lett. 1986. V. 11. P. 288–290.
- [5] *Garces-Chavez V., McGloin D., Meiville H., Sibbett W., Dholakia K.* // Nature. 2002. V. 419(12). P. 145–147.
- [6] *Fischer P., Brown C., Morris J., López-Mariscal C., Wright E., Sibbett W., Dholakia K.* // Opt. Express. 2005. V. 13(17). P. 6657–6666.
- [7] *Франсон М., Сланский С.* Когерентность в оптике. М.: Наука, 1967. 80 с.
- [8] *Винокуров Д.А., Зорина С.А., Капитонов В.А.* и др. // ФТП. 2005. Т. 39. В. 3. С. 388.