

на правах рукописи



Лосев  
Сергей Николаевич

**Получение и исследование нерасходящихся (бесселевых) пучков  
от полупроводниковых лазеров и светодиодов**

специальность:  
01.04.10 — физика полупроводников

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена  
в федеральном государственном бюджетном учреждении науки  
Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе  
Соколовский Григорий Семенович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
профессор  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»  
Зубков Василий Иванович

доктор физико-математических наук,  
профессор  
Санкт-Петербургский государственный университет  
Вербин Сергей Юрьевич

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский академический университет —  
научно-образовательный центр нанотехнологий РАН  
(Академический университет)

Защита состоится: «20» ноября 2014 года в 10:00 на заседании  
диссертационного совета Д 002.205.02 при Федеральном государственном  
бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте  
им. А. Ф. Иоффе РАН по адресу: Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Автореферат разослан «\_\_» сентября 2014 года

Учёный секретарь диссертационного совета Д 002.205.02

доктор физико-математических наук



Сорокин Л. М.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Полупроводниковые лазеры широко применяются во многих областях науки и техники, наиболее яркими примерами которых являются передача, обработка и хранение информации и лазерная печать. Неуклонное улучшение параметров полупроводниковых лазеров (в первую очередь, их мощности) ведет к дальнейшему расширению круга их применений, в том числе и за счет постепенного вытеснения газовых и твердотельных лазеров. Такое вытеснение наиболее заметно в области фотобиологии и лазерной медицины, развивающейся в настоящее время огромными темпами. Тем не менее, дальнейшее расширение круга применений мощных полупроводниковых лазеров и мощных светодиодов сдерживается неразрешенной проблемой фокусировки характерного для них многомодового излучения. Достижимый размер фокусного пятна при фокусировке многомодового излучения определяется параметром распространения луча  $M^2$ , являющимся отношением расходимости данного луча к расходимости «идеального» гауссова луча, определяемой дифракционным пределом. Другими словами, параметр  $M^2$  определяет увеличение размера фокусного пятна по сравнению с его размером при фокусировке идеального гауссова луча той же оптической системой. Он удобен тем, что позволяет использовать для описания квази-гауссовых пучков математический аппарат, развитый для гауссовых лучей, путем простой замены  $\lambda \rightarrow M^2\lambda$ , т.е. численным увеличением длины волны в  $M^2$  раз. Типичные значения  $M^2$  для мощных полупроводниковых лазеров составляют 20-50. В связи с этим, минимальный размер фокусного пятна полупроводникового лазера на один-два порядка превышает дифракционный предел, что существенно ограничивает как повышение плотности мощности при фокусировке, так и создание градиента интенсивности излучения, необходимого для многих практических применений.

В силу фундаментального характера данной проблемы, ее решение традиционными методами не представляется возможным. Поэтому было предложено использовать для фокусировки излучения полупроводниковых лазеров нерасходящиеся (бесселевы) световые пучки. Несмотря на наличие значительного числа публикаций, посвященных генерации и изучению бесселевых пучков, возможность их получения от полупроводниковых лазеров не исследовалась до

начала работ, изложенных в данной диссертации, чем и определяется их актуальность.

## **Цель**

Целью данной работы являлось получение и исследование нерасходящихся (бесселевых) пучков от полупроводниковых лазеров и светодиодов, определение параметров их излучения, определяющих предельную длину распространения и поперечный размер центрального луча получаемых бесселевых пучков, а также возможность их использования для оптического захвата и манипулирования микроскопическими объектами в т.н. «оптических пинцетах».

## **Научная новизна**

### **Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Получены пространственно-инвариантные пучки от светодиодов и полупроводниковых лазеров различных конструкций: узкополосковых и широкополосковых торцевых излучателей, поверхностно-излучающих лазеров с вертикальным резонатором (VCSEL – англ.) и поверхностно-излучающих лазеров с внешним вертикальным резонатором (VECSEL – англ.).

2. Показано, что бесселевы пучки, получаемые от широкополосковых многомодовых полупроводниковых лазеров и светодиодов, обеспечивают достижение поперечного размера центрального луча, значительно меньшего предельно малого размера фокусного пятна, определяемого параметром распространения квазигауссового пучка  $M^2$ .

3. Показано, что пространственная однородность излучения полупроводникового лазера оказывает гораздо большее влияние на формирование бесселевых пучков, чем его временная когерентность. Возникающие при получении бесселевых пучков трудности, связанные с пространственной неоднородностью излучения полупроводниковых лазеров с широким полоском связаны с многомодовым характером их излучения, его астигматизмом и генерацией в каналах.

4. Продемонстрировано, что параметры бесселевых пучков, получаемых от полупроводниковых лазеров, позволяют использовать их для оптического захвата и манипулирования микроскопическими (в т. ч. биологическими) объектами в т. н. «оптических пинцетах».

Основные результаты, перечисленные в заключении по диссертации, были получены впервые.

## **Практическая ценность**

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Получены бесселевы пучки от полупроводниковых лазеров с мощностью, достигающей 2,4 Вт в непрерывном режиме, достаточной для подавляющего большинства практических применений.

2. Предложен способ сверхфокусировки многомодового излучения за счет использования интерференции и продемонстрированы размеры фокусного пятна мощных полупроводниковых лазеров и светодиодов, недостижимые при традиционной фокусировке излучения с высоким параметром распространения  $M^2$ . Показано, что при фокусировке излучения полупроводникового лазера с параметром распространения  $M^2 = 25$  интерференционная фокусировка позволяет превзойти теоретический предел плотности мощности при использовании аксикона с углом при вершине  $140^\circ$  при числовой апертуре образующего луча  $NA > 0,2$ .

3. Показано, что длина распространения бесселевых пучков, генерируемых при помощи полупроводниковых лазеров с широким полоском, ограничивается в основном из-за многомодового характера излучения таких лазеров, приводящего к «размыванию» колец бесселева пучка, а также астигматизма, приводящего к постепенному искажению центрального пятна бесселева пучка, приобретающего неправильную продолговатую форму, и генерации в каналах, приводящей к превращению центрального пятна в линию, состоящую из отдельных ярких точек.

4. Продемонстрирован оптический захват и манипулирование микроскопическими (в т. ч. биологическими) объектами при помощи бесселевых пучков, полученных от полупроводниковых лазеров, что открывает путь для их использования в т. н. «оптических пинцетах» и устройствах типа «лаборатория на чипе».

## **Научные положения выносимые на защиту**

1. Получение пространственно-инвариантных (бесселевых) пучков возможно при использовании полупроводниковых лазеров и светодиодов.

2. Бесселевы пучки, получаемые от широкополосковых многомодовых полупроводниковых лазеров и светодиодов, обеспечивают достижение поперечного размера центрального луча, значительно меньшего предельно малого размера фокусного пятна, определяемого параметром распространения квази-гауссова пучка  $M^2$ .
3. Длина распространения бесселевых пучков, получаемых от полупроводниковых лазеров с широким полоском, ограничивается из-за астигматизма, генерации в каналах и многомодового характера излучения таких лазеров.
4. Бесселевы пучки, получаемые от полупроводниковых лазеров, пригодны для оптического захвата и манипулирования микроскопическими (в том числе биологическими) объектами в оптических пинцетах.

## **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались на Всероссийских и Международных конференциях 3rd EPS-QEOD Europhoton Conference (Paris, France, 30 August – 5 September 2008), Международном семинаре по оптоэлектронике (С-Петербург, 27 октября 2008), Конференции по физике и астрономии для молодых ученых С-Петербурга и Северо-Запада «Физика.СПб» (С-Петербург, 29–30 октября 2009), International Symposium «Nanostructures: Physics and technology» (С-Петербург, 21-26 июня 2010), International Conference Laser Optics, (С-Петербург, 25-29 июля 2010), Симпозиуме «Полупроводниковые лазеры: физика и технология», (С-Петербург, 5-7 ноября 2008, 10-12 ноября 2010, 13-16 ноября 2012), International Conference Photonics West (San Francisco, USA, 22-27 January 2011, 21-26 January 2012), Российской конференции по физике полупроводников (Нижний Новгород, 19–23 сентября 2011, С-Петербург, 16–20 сентября 2013), а также на научных семинарах лаборатории интегральной оптики на гетероструктурах ФТИ им. А.Ф.Иоффе.

## **Публикации**

По результатам исследований, выполненных в диссертационной работе, опубликовано 6 статей, список которых приведен в конце автореферата.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы. Объем диссертации составляет 110 страниц, в том числе 34 рисунка на 34 страницах и 3-х таблиц. Список цитированной литературы включает в себя 62 наименования.

### Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определена цель работы, её научная новизна и практическая ценность, приведены выносимые на защиту научные положения и кратко изложено содержание диссертации.

### Глава 1. Световые пучки, их распространение и расходимость.

Параграф 1.1 посвящен рассмотрению проблемы фокусировки многомодового излучения, являющейся одной из наиболее существенных преград на пути расширения круга применений мощных полупроводниковых лазеров и светодиодов. В общем случае, качество лазерного луча принято описывать при помощи параметра распространения [1, 2], называемого параметром  $M^2$  или, зачастую, параметром качества луча. Параметр распространения является отношением расходимости данного луча к расходимости «идеального» Гауссова луча (т. е. луча с  $M^2=1$ ), определяемой дифракционным пределом. Аналогичным образом, параметр  $M^2$  определяет, во сколько раз размер фокусного пятна данного луча больше пятна, достижимого при фокусировке идеального Гауссова луча той же оптической системой. Параметр распространения удобен тем, что позволяет использовать для описания квазигауссовых лучей математический аппарат, развитый для Гауссовых лучей, путем простой замены  $\lambda \rightarrow M^2\lambda$ , т.е. численным увеличением длины волны в  $M^2$  раз.

Рисунок 1а иллюстрирует фундаментальную проблему, возникающую при фокусировке многомодового излучения – при типичных значениях  $M^2$ , составляющих для мощных полупроводниковых лазеров 20-50, а для светодиодов достигающих 200-500, низкое пространственное совершенство луча определяет теоретический предел размера фокусного пятна, на один-два порядка превышающий дифракционный предел, что существенно ограничивает как повышение плотности мощности при фокусировке, так и создание градиента оптического поля, необходимого для многих практических применений.

Параграф 1.2 посвящен выводу пространственно-инвариантного решения волнового уравнения в свободном пространстве. В случае осевой симметрии, распространение световой волны относительно продольной оси  $z$  можно записать в цилиндрической форме  $E(r, \phi, z, t) = A(r)e^{(im\phi + ik_z z - i\omega t)}$ , что даёт уравнение для комплексной амплитуды в виде:

$$\frac{\partial^2 A(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A(r)}{\partial r} (k_r^2 - \frac{m^2}{r^2}) A(r) = 0, \quad (1)$$

где  $k_z$  и  $k_r$  соответственно продольный и поперечный показатели распространения волны  $E(r, \phi, z, t)$ , так что  $k_z^2 + k_r^2 = \omega^2/c^2$ . С действительными  $k_z$  и  $k_r$  решение уравнения (1) даёт класс недифрагирующих полей, чей усреднённый по времени поперечный профиль интенсивности при  $z = 0$  точно повторяется вдоль оси  $z$ . Таким образом мы получаем конечное решение уравнения (1) являющейся функцией Бесселя первого рода. Искомое решение волнового уравнения принимает вид:

$$E(r, \phi, z, t) = J_m(k_r r) e^{im\phi + ik_z z - i\omega t}, \quad (2)$$

где  $m$  – целое число. Простейший и наиболее важный случай такого поля с  $m = 0$  имеет поперечный профиль  $J_0(k_r r)^2$  и выглядит в поперечной проекции как яркое пятно, окруженное концентрическими кольцами, как показано на вставках б рисунка 1.

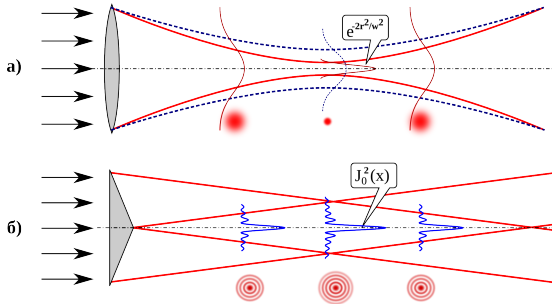


Рис. 1. Иллюстрация распространения гауссовых и бesselевых пучков. а) Фокусировка гауссова (сплошная линия) и квазигауссова (пунктирная линия) пучков линзой. б) Распространение бesselева пучка, созданного аксиконом.



Параграф 1.3 посвящен описанию методов получения и свойств бесселевых пучков. Пространственно-инвариантные пучки света, распространяющиеся без изменения интенсивности, описаны Дурниным [3] в 1987 году (а также Зельдовичем и МакЛеодом в 1950-60-х [4, 5]) и были названы бесселевыми пучками, так как их профиль описывается функцией Бесселя первого рода нулевого порядка, как показано в параграфе 1.2. На практике бесселевы пучки получают в результате интерференции сходящихся лучей, возникающей при прохождении сколлимированного Гауссова пучка через коническую линзу – аксикон. Диаметр центрального пятна определяется углом при вершине 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. Ещё одним замечательным свойством бесселевых пучков является то, что их центральный луч «самовосстанавливается» после встречи с препятствием. Практическое применение пространственно-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. 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. 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.

## **Глава 2. Получение нерасходящихся пучков от полупроводниковых источников света.**

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.

В параграфе 2.1 исследуется возможность получения пространственно-инвариантных пучков света при помощи полупроводниковых источников света, таких, как светодиоды (СИД) и поверхностно излучающие лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL – англ). Для получения пространственно-инвариантных (бесселевых) пучков использовались аксиконы с углами  $178^\circ$  и  $170^\circ$ , что обеспечивало диаметр центрального пятна 100 и 10 мкм соответственно. Показано, что полупроводниковые излучатели являются перспективными источниками для получения пространственно-инвариантных пучков света для применения в различных устройствах манипулирования микроскопическими объектами, в том числе в оптических пинцетах.

В параграфе 2.2 изучены особенности получения бесселевых пучков от широкополосковых полупроводниковых лазеров и продемонстрировано, что пространственная однородность излучения оказывает гораздо большее влияние на формирование бесселевых пучков, чем его временная когерентность. Возникающие при получении бесселевых пучков трудности, связанные с пространственной неоднородностью излучения полупроводниковых лазеров с широким полоском, могут быть разделены на три основные группы:

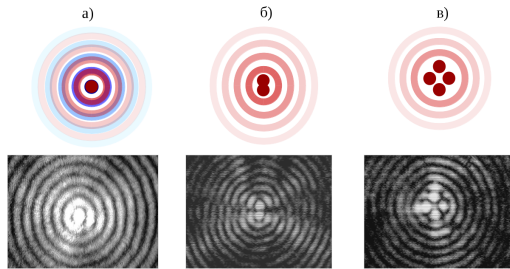


Рис. 2. Схематические изображения бесселевых пучков, образованных а) многомодовым излучением полупроводникового лазера; б) при генерации в каналах; в) при облучении аксикона под углом, а также соответствующие типичные экспериментальные распределения интенсивности.

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 бесселева пучка. Важно отметить, что при этом размер центрального луча практически не изменяется, как схематически показано на рис. 2а.

2) Астигматизм излучения, а также генерация в каналах в лазере 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 генерации в каналах, превращаясь в линию, состоящую из ярких точек), как показано на рис. 2б.

3) Облучение аксикона под углом. При разъюстировке оптической схемы центральная часть бесселева пучка искажается, образуя ромбовидную каустику (рис.2в). Размер возникающей каустики пропорционален расстоянию от точки наблюдения до вершины аксикона и углу, под которым облучается аксикон. Следует отметить, 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.

В параграфе 2.3 исследовались бесселевы пучки, полученные от поверхностно-излучающих лазеров с внешним вертикальным резонатором (vertical external cavity surface-emitting laser, VECSEL – англ.) с широкой активной областью с длиной волны излучения 1040 нм. Активный полупроводниковый элемент был закреплен на внутррезонаторном алмазном теплоотводе с медным основанием, обеспечивавшем эффективный отвод тепла к держателю с водяным охлаждением, что обеспечивало высокую мощность излучения, достигавшую 2,4 Вт в непрерывном режиме. Параметр распространения выходного излучения в наших экспериментах составлял  $M^2 = 2 \div 4$ . Бесселевы лучи формировались при помощи аксикона с углом при вершине  $140^\circ$  и регистрировались при помощи телескопической проекционной системы и ПЗС матрицы. Мощность излучения в центральном пятне получаемого таким образом бесселева пучка достигала нескольких десятков милливольт, что обеспечивает возможность их использования в подавляющем большинстве практических применениях.

### **Глава 3. Влияние скругления вершины аксикона и параметра распространения пучка $M^2$ на формирование бесселевых пучков от полупроводниковых лазеров**

В параграфе 3.1 изучается влияние высокого параметра распространения пучка  $M^2$  на получение бесселевых пучков от полупроводниковых лазеров. При распространении бесселева пучка, сформированного из сколлимированного мно-

гомодового квазигауссова луча, размер центрального луча постепенно увеличивается в силу значительной расходимости формирующего квазигауссова луча, что приводит к увеличению поперечного размера центрального луча бесселева пучка и может ограничивать длину распространения полученного пучка  $z_B$ . Для оценки влияния расходимости образующего луча, был учтен угол расходимости в выражении, связывающем поперечный размер центрального луча бесселева пучка с геометрическими параметрами оптической схемы путем замены угла интерференции конически сходящихся лучей  $\gamma \rightarrow x(z)$  (рис. 3).

Полученное таким образом выражение позволяет вычислить длину распространения бесселева пучка, определяемую расходимостью образующего луча. Принимая длину распространения бесселева пучка  $z_B$  как расстояние, на котором поперечный размер его центрального луча увеличивается в  $\sqrt{2}$  раз можем записать:

$$z_B \approx \frac{2\omega_0^2}{M^2\lambda}, \quad (3)$$

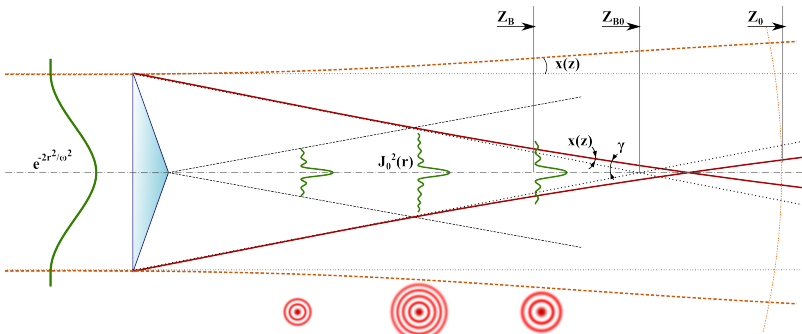


Рис. 3. Распространение бесселева пучка сформированного от квазигауссова пучка с высоким параметром  $M^2$ .

Параграф 3.2 посвящен изучению влияния скругления вершины аксикона на поперечный размер центрального пятна бесселева пучка. Скругление вершины аксикона является крайне нежелательным дефектом, возникающим при его изготовлении, что связано с неизбежными технологическими затруднениями при финишной полировке конической поверхности аксикона. Влиянием скругления вершины аксикона можно пренебрегать при изучении формирования бесселевых пучков с большой апертурой образующего луча и значительной длиной распространения. Однако, при уменьшении апертуры образующего луча

до сотен микрометров и соответствующем сокращении длины распространения бесселева пучка, учет скругления вершины аксикона на поперечный размер центрального луча бесселева пучка является абсолютно необходимым. Проведенный теоретический анализ показал, что в эксперименте следует ожидать сравнительно резкого визуального увеличения поперечного размера центрального луча бесселева пучка при приближении к скругленной вершине аксикона на расстояние, определяемое радиусом скругления. Расчёты показывают, что скругление вершины аксикона может приводить к значительному увеличению видимого размера центрального луча бесселева пучка даже при его формировании идеальным Гауссовым лучом.

В параграфе 3.3 приведены результаты экспериментов по изучению влияния скругления вершины аксикона и высокого параметра  $M^2$  на получение бесселевых пучков от полупроводниковых лазеров. Для этого использовались лазеры с расширенным вертикальным резонатором (VECSEL), описанные в параграфе 2.3, с небольшими значениями параметра распространения луча, находящимися в пределах  $M^2 = 2 \div 4$ . Бесселевы пучки формировались при помощи аксиконов с углом при вершине  $140^\circ$  и  $160^\circ$  и регистрировались при помощи телескопической проекционной системы и ПЗС матрицы. Проведенные эксперименты позволили весьма наглядно проследить теоретически предсказанную в параграфах 3.1 и 3.2 тенденцию сокращения поперечного размера центрального луча бесселева луча при удалении от вершины аксикона (т.е. при сокращении влияния скругления вершины), а также его увеличения из-за расходимости образующего луча при значительном увеличении расстояния от аксикона.

#### **Глава 4. Сверхфокусировка излучения полупроводниковых источников с высоким параметром $M^2$ и использование бесселевых пучков, полученных от полупроводниковых лазеров, для оптического манипулирования микрочастицами**

В параграфе 4.1 исследуется проблема фокусировки многомодового излучения мощных полупроводниковых лазеров и светодиодов, где низкое пространственное совершенство луча определяет теоретический предел размера фокусного пятна, на один-два порядка превышающий дифракционный предел, что существенно ограничивает как повышение плотности мощности при фокусировке, так и создание градиента оптического поля, необходимого для многих практических применений. Для преодоления этого ограничения в данном па-

параграфе предложена способ сверхфокусировки многомодового излучения за счет использования интерференции и продемонстрированы размеры фокусного пятна мощных полупроводниковых лазеров и светодиодов, недостижимые при традиционной фокусировке, а также предложен путь преодоления теоретического предела плотности мощности при фокусировке излучения с высоким параметром распространения  $M^2$ . Показано, что при фокусировке излучения полупроводникового лазера с параметром распространения  $M^2 = 25$  интерференционная фокусировка позволяет превзойти теоретический предел плотности мощности при использовании аксикона с углом при вершине  $140^\circ$  при числовой апертуре образующего луча  $NA > 0.2$  (данный результат получен без учёта фактической доли энергии в расчётной апертуре квазигауссова пучка).

В параграфе 4.2 представлены результаты экспериментов по манипулированию микрочастицами при помощи бесселевых пучков, полученных от полупроводниковых лазеров.

Для генерации бесселевых пучков использовалось излучение полупроводникового лазера с резонатором Фабри-Перо и волоконным выводом с длиной волны излучения 1065 нм. Мощность а до 600 мВт. 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  $160^\circ$ , что определило величину поперечного размера центрального луча бесселева пучка  $\sim 7$  мкм. Размер бесселева пучка измерялся с помощью прозрачной градуированной сетки (т. н. «гратифула») с масштабными делениями 10 мкм и общей длиной градуированной шкалы 1 мм. Гратифул 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, принятыми в расчет, достигала 20 мВт. 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 мкм в водном растворе, в качестве объектов с большим коэффициентом преломления и водяные пузырьки в масле, как частицы с низким коэффициентом преломления. Раствор, содержащий микрообъекты, размещался между двумя предметными стеклами. Перемещение предметного стекла с микрочастицами осуществлялось трёхкоординатным микропозиционером.

В работе также исследовался оптический захват красных кровяных телец

крысиной крови. Крысиная кровь растворялась в воде с добавлением гепарина для предотвращения свертывания. Средний размер клеток составлял приблизительно 5 мкм. Продемонстрирован двухкоординатный оптический захват и манипулирование эритроцитами крысиной крови в центральном луче бесселева пучка, полученного от полупроводникового лазера. При этом не наблюдалось оптически-индуцированных повреждений живых клеток в используемом в экспериментах диапазоне оптической мощности. 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.

## **Заключение**

Основные результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Получены и исследованы пространственно-инвариантные пучки от светодиодов и полупроводниковых лазеров различных конструкций: узкополосковых и широкополосковых торцевых излучателей, поверхностно-излучающих лазеров с вертикальным резонатором и поверхностно-излучающих лазеров с внешним вертикальным резонатором с мощностью, достигающей 2.4 Вт в непрерывном режиме, достаточной для подавляющего большинства практических применений.

2. Показано, что бесселевы пучки, получаемые от широкополосковых многомодовых полупроводниковых лазеров и светодиодов, обеспечивают достижение поперечного размера центрального луча, значительно меньшего предельно малого размера фокусного пятна, определяемого параметром распространения квазигауссового пучка  $M^2$ . Предложен способ сверхфокусировки многомодового излучения за счет использования интерференции и продемонстрированы размеры фокусного пятна мощных полупроводниковых лазеров с высоким параметром распространения  $M^2$  и светодиодов, недостижимые при традиционной фокусировке.

3. Показано, что пространственная однородность излучения полупроводникового лазера оказывает гораздо большее влияние на формирование бесселевых пучков, чем его временная когерентность, и продемонстрировано, что длина распространения бесселевых пучков, генерируемых при помощи полупроводниковых лазеров широким полоском, ограничивается в основном из-за многомодового характера излучения таких лазеров, приводящего к «размыванию»

колец бесселева пучка, а также астигматизма излучения и генерации в каналах, приводящего к постепенному искажению центрального пятна бесселева пучка, приобретающего неправильную продолговатую форму и, в случае генерации в каналах, превращаясь в линию, состоящую из отдельных ярких точек.

4. Показано, что параметры бесселевых пучков, получаемых от полупроводниковых лазеров, позволяют использовать их для оптического захвата и манипулирования микроскопическими объектами в т. н. «оптических пинцетах» и продемонстрирован оптический захват и манипулировании микроскопическими (в т. ч. биологическими) объектами, что открывает путь для их использования в устройствах типа «лаборатория на чипе».

## **Публикации по теме диссертации**

[A1] Г. С. Соколовский, В. В. Дюделев, С. Н. Лосев, С. А. Золотовская, А. Г. Дерягин, В. И. Кучинский, Э. У. Рафаилов, В. Сиббет, «Получение пространственно-инвариантных световых пучков при помощи полупроводниковых источников излучения», Письма в ЖТФ, 2008, т.34(24), с.75-82.

[A2] 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, «Исследование пространственно-инвариантных пучков, полученных от полупроводниковых лазеров с широким полоском с торцевым выводом излучения», Письма в ЖТФ, 2010, т.36(1), с.22-30.

[A3] G. S. Sokolovskii, S. A. Zolotovskaya, S. N. Losev, V. V. Dudelev, A. G. Deryagin, V. I. Kuchinskii, W. Sibbett, E. U. Rafailov, "High power Bessel beams from EP-VECSELS", Proc. SPIE, v. 7919, 79190J, 2011.

[A4] Г. С. Соколовский, В. В. Дюделев, С. Н. Лосев, А. Г. Дерягин, В. И. Кучинский, В. Сиббет, Э. У. Рафаилов «О сверхфокусировке многомодовых полупроводниковых лазеров и светодиодов», Письма в ЖТФ, 2012, т.38(9), с.8-14.

[A5] G. S. Sokolovskii, M. Butkus, S. N. Losev, V. V. Dudelev, A. G. Deryagin, V. I. Kuchinskii, W. Sibbett, E. U. Rafailov, "Non-diffracting beams from surface-emitting lasers", Proc. SPIE, v. 8242, 82420T, 2012.

[A6] Г. С. Соколовский, В. В. Дюделев, С. Н. Лосев, М. Буткус, К. К. Соболева, А. И. Соболев, А. Г. Дерягин, В. И. Кучинский, В. Сиббет, Э. У. Рафаилов, «Влия-



ние характеристик аксикона и параметра качества пучка  $M^2$  на формирование бесселевых пучков излучения полупроводниковых лазеров», Квантовая электроника, 2013, т.43 (5), с.423-427.

[A7] G.S.Sokolovskii, S.A.Zolotovskaya, S. N. Losev, V. V. Dudelev, A. G. Deryagin, V. I. Kuchinskii, E. U. Rafailov, W. Sibbett, "Non-diffracting beams generated from semiconductor light sources", ТUp.2, 3rd EPS-QEOD Europhoton Conference, Paris, France, 30 August – 5 September 2008.

[A8] В. В. Дюделев, Г. С. Соколовский, 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, «Генерация пространственно-инвариантных лучей от полупроводниковых источников», приглашенный доклад, Международный семинар по опто- и наноэлектронике, С-Петербург, 27 октября 2008.

[A9] В. В. Дюделев, Г. С. Соколовский, 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. Сиббет, В. И. Кучинский, «Нерасходящиеся лучи света от полупроводниковых излучателей», Симпозиум «Полупроводниковые лазеры: физика и технология», С-Петербург, 5-7 ноября 2008.

[A10] К. К. Золотова, С. Н. Лосев, А. С. Маслов, Г. С. Соколовский, «Исследование распространения пространственно-инвариантных (бесселевых) пучков от полупроводниковых лазеров с широким полоском», Конференция «Физика.СПб», СПб, 29-30 октября 2009.

[A11] G. S. Sokolovskii, S. N. Losev, V. V. Dudelev, A. G. Deryagin, V. I. Kuchinskii, E. U. Rafailov, W. Sibbett, "Properties of non-diffracting (Bessel) beams generated from semiconductor lasers", Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology (NANO-2010), St. Petersburg, 21-26 June 2010.

[A12] Г. С. Соколовский, С. Н. Лосев, В. В. Дюделев, А. Г. Дерягин, В. И. Кучинский, В. Сиббет, Э. У. Рафаилов, «Преодоление теоретического предела при фокусировке излучения полупроводниковых источников», Симпозиум Полупроводниковые лазеры: физика и технология, СПб, 10-12 ноября 2010.

[A13] G. S. Sokolovskii, S. A. Zolotovskaya, S. N. Losev, V. V. Dudelev, A. G. Deryagin, V. I. Kuchinskii, W. Sibbett, E. U. Rafailov "High power Bessel beams from EP-VECSELS" Int. Conf. Photonics West, San Francisco, USA, 22-27 January 2011.

[A14] Г. С. Соколовский, С. Н. Лосев, В. В. Дюделев, А. Г. Дерягин,

В. И. Кучинский, В. Сиббет, Э. У. Рафаилов, «Преодоление теоретического предела фокусировки излучения полупроводниковых лазеров и светодиодов» 10-я Российская конференция по физике полупроводников, Нижний Новгород, 19-23 сентября 2011.

[A15] G. S. Sokolovskii, S. N. Losev, V. I. Kuchinskii, W. Sibbett, E. U. Rafailov “Non-diffracting beams from surface-emitting lasers” Int. Conf. Photonics West, San Francisco, USA, 21-26 January 2012.

[A16] V. V. Dudelev, G. S. Sokolovskii, M. Butkus, S. N. Losev, A. G. Deryagin, V. I. Kuchinskii, W. Sibbett, E. U. Rafailov, “Non-diffracting beams from semiconductor lasers”, Int. Conf. Laser Optics, St. Petersburg, Russia, 25-29 July 2012.

[A17] С. Н. Лосев, В. В. Дюделев, А. Г. Дерягин, В. И. Кучинский, В. Сиббет, Э. У. Рафаилов, Г. С. Соколовский, “Оптический захват и манипулирование биологическими объектами при помощи нерасходящихся (бесселевых) пучков полупроводниковых лазеров”, Симпозиум «Полупроводниковые лазеры: физика и технология», СПб, 13-16 ноября 2012.

[A18] Г. С. Соколовский, К. К. Соболева, С. Н. Лосев, В. В. Дюделев, А. Г. Дерягин, В. И. Кучинский, W. Sibbett, Э. У. Рафаилов, «Генерации нерасходящихся (бесселевых) световых пучков при помощи полупроводниковых лазеров и их применение для оптического манипулирования биологическими объектами», 11-я Российская конференция по физике полупроводников «Полупроводники'13», СПб, 16-20 сентября 2013.

## Список цитируемой литературы

- [1] Siegman A.E. How to (Maybe) Measure Laser Beam Quality // *Osa Tops.* — 1998. — Vol. 17. — P. 184–199.
- [2] ISO11146. Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios. — 2005.
- [3] Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory // *J. Opt. Soc. Am.* — 1987. — Vol. A 4. — P. 651–654.
- [4] Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф. // *Известия ВУЗов, Радиофизика.* — 1966. — Т. 9 (1). — С. 95–101.
- [5] McLeod J.H. The Axicon: A New Type of Optical Element // *J. Opt. Soc. Am.* — 1954. — Vol. 44. — P. 592–597.