

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций**

На правах рукописи

Соболева Ксения Кирилловна

**Сверхфокусировка излучения полупроводниковых лазеров для
оптического манипулирования микроскопическими и биологическими
объектами**

Направление подготовки 03.06.01 Физика и астрономия

Код и наименование

Направленность 03.06.01_04 Физическая электроника

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы:
Соболева Ксения Кирилловна

Научный руководитель:
доктор физико-математических
наук, доцент, Соколовский
Григорий Семенович

Санкт Петербург – 2019

Научно-квалификационная работа выполнена на кафедре физической электроники Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Заведующий кафедрой
физической электроники

*Филимонов Алексей Владимирович,
доктор физико-математических
наук, доцент*

Научный руководитель:

*Соколовский Григорий Семенович,
доктор физико-математических
наук, доцент*

Рецензент:

*Аверкиев Никита Сергеевич,
доктор физико-математических
наук, заведующий сектором теории
оптических и электрических явлений
в полупроводниках, Физико-
технический институт им. А.Ф.
Иоффе*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Из-за многомодовой природы излучения полупроводниковых лазеров, обладающих высоким параметром распространения M^2 размер фокусного пятна превышает дифракционный предел в 10-100 раз. Это существенно ограничивает возможность применения мощных лазерных диодов в таких приложениях, как обработка материала и биомедицинская фотоника. В работе предложен метод «сверхфокусировки» многомодового лазерного луча, при котором собственная интерференция мод позволяет значительно уменьшить размер фокусного пятна. Эффект достигается за счет использования конических микролинз на торце оптического волокна, полученных методом 3х мерной нанопечати. Данный метод многофотонной литографии позволяет установить практически любой оптический элемент на торце оптического волокна, обеспечивая тем самым более широкое применение многомодовых полупроводниковых лазеров.

Возможность применения сверхфокусированного лазерного излучения для оптического захвата и манипулирования биологическими и микроскопическими объектами доказывает хороший потенциал многомодовых полупроводниковых лазеров для разработок новых конфигураций «лаборатории на чипе».

Метод сверхфокусировки открывает новые возможности для применения лазерных диодов там, где требуется высокая мощность и точная фокусировка, например, в обработке материалов и 3D-печати.

Цель и задачи исследования

Целью данной работы являлось получение сверхфокусированного излучения полупроводникового лазера с высоким параметром распространения M^2 пригодного для оптического захвата и манипулирования биологическими микрообъектами. Важной задачей являлась теоретическая разработка метода получения сверхфокусированного излучения при помощи конической линзы – аксикона, а так же практическая реализация изготовления микролинзы на торце оптического волокна методом многофотонной литографии. Еще одной задачей было определение параметров сверхфокусированного излучения и факторов, влияющих на их изменения.

Научная новизна

Новизна полученных результатов состоит в использовании в качестве источников излучения для «оптического пинцета» многомодовых полупроводниковых лазеров. Необходимые параметры луча, требуемые для оптического захвата и манипулирования биологическими микроскопическими объектами, достигаются за счет использования интерференционной «сверхфокусировки» конической микролинзой напечатанной методом многофотонной литографии на торце оптического волокна.

Теоретическая и практическая значимость

Выполнен анализ требований, предъявляемых к параметрам лазерного излучения, обеспечивающим манипулирование микро- и нанообъектами по принципу «оптического пинцета». Показано, что ключевым моментом является правильный выбор длины волны лазерного излучения и его мощности. Для оптического захвата биологических объектов с целью минимизации поглощения и увеличения, таким образом, допустимой мощности захвата за счет повышения порога оптически-индуцированного повреждения, как правило, необходимо использовать инфракрасное излучение длиной волны около 1 мкм. При этом мощность, необходимая для оптического манипулирования, колеблется в диапазоне от единиц до десятков (иногда до сотен) милливатт в зависимости от размеров и собственной подвижности биологического объекта.

Рассмотрены основные характеристики и свойства сверхфокусированного излучения. Проведено сравнение различных способов фокусировки излучения с высоким параметром распространения. Показано, что наибольшей эффективностью преобразования характеризуется метод получения Бесселевых пучков с помощью аксикона.

Обоснован выбор способа формирования лазерных пучков с параметрами, требуемыми для манипулирования микроскопическими биологическими объектами. Показано, что для формирования таких пучков света могут быть использованы источники излучения с низкой пространственной когерентностью, такие как полупроводниковые лазеры. При этом, наиболее предпочтительным из-за высокой эффективности преобразования является использование конической линзы (аксикона).

Разработан метод изготовления микроаксиконов с помощью 3D лазерной нанопечати, на торце 100 мкм оптического волокна. Метод

позволяет изготавливать аксиконы с радиусом скругления их вершины менее 10 мкм. Сверхфокусированный луч, полученный с использованием такого микроаксикона, имеет поперечный размер 2-4 мкм на длине распространения 20 мкм. Источник излучения - многомодовый лазерный диод с параметром распространения $M^2 = 18$ и длиной волны 0.96 мкм. Минимально достижимый размер фокусного пятна от лазера с такими характеристиками при использовании «идеальной» фокусирующей линзы с единичной числовой апертурой составляет 11 мкм.

Разработана методика проведения экспериментальных исследований оптического захвата биологических микроскопических объектов сверхфокусированным излучением полупроводникового лазера. Доказана возможность устойчивого оптического захвата и перемещения эритроцитов со скоростью порядка 10 мкм/с.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на Российской молодежной конференции по физике и астрономии «Физика.Спб» (23-24 октября 2013 и 28-30 ноября 2014), на Международной зимней школе по физике полупроводников (1-4 марта 2013), на Неделе Науки СПбПУ 2014, а также на научных семинарах лаборатории интегральной оптики на гетероструктурах ФТИ им. А.Ф.Иоффе.

Публикации

По результатам исследований, выполненных в диссертационной работе, опубликовано 8 статей, список которых приведен в конце автореферата.

Представление научного доклада: основные положения

1. Для оптического захвата биологических объектов необходимо использовать инфракрасное излучение длиной волны около 1 мкм. Это позволяет минимизировать поглощение и повысить допустимую мощность захвата не приводящую к оптически-индуцированным повреждением биологических микрочастиц.
2. Метод «сверхфокусировки» многомодового излучения полупроводникового лазера обеспечивает достижение поперечного размера луча, значительно меньшего предельно малого размера

фокусного пятна, определяемого параметром распространения квази-Гауссова пучка M^2 .

3. Метод трёхмерной лазерной нанопечати позволяет установить на торце оптического волокна микроаксиконы, позволяющие значительно улучшить характеристики сверхфокусированного излучения.
4. Сверхфокусированное излучение многомодового полупроводникового лазера с высоким параметром распространения M^2 может быть использовано для оптического захвата и манипулирования микроскопическими биологическими объектами.

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. Оптический захват биологических микрочастиц

В первой главе проведен анализ требований, предъявляемых к параметрам лазерного излучения, обеспечивающим манипулирование микроскопическими биологическими объектами по принципу «оптического пинцета». Воздействие сфокусированным лазерным лучом может привести к гибели микрочастицы, как из-за повышения продольного оптического давления, так и из-за поглощения света самой микрочастицей.

Параграф 1.1. описывает первые эксперименты по захвату в оптическую ловушку биологических микрочастиц. Нобелевский лауреат Артур Ашкин в 1987 году показал, что использование видимого излучения аргонового лазера мощностью до 120 мВт позволяет захватить в оптическую ловушку вирус табачной мозаики и не приводит к его видимым изменениям [1]. В той же работе показано, что излучение того же лазера с мощностью порядка нескольких милливатт приводит к оптически-индуцированной гибели бактерий *Escherichia coli*.

В параграфе 1.2 приводится расчет силы, действующей на захваченную в оптическую ловушку бактерию *E.Coli* и скорость ее перемещения при воздействии инфракрасного излучения Nd:YAG лазера с мощностью до 80 мВт. Такое излучение не приводит к гибели бактерий *E.Coli* и обеспечивает возможность перемещения биологических микрочастиц со скоростью до 500 мкм/с [2]. Сила, соответствующая данным параметрам, составляет порядка

800mg – что является достаточным и даже превосходящим условием для удержания подвижной микрочастицы. Кроме того, использование Nd:YAG лазера позволило продемонстрировать размножение дрожжевых клеток захваченных в оптическую ловушку.

Параграф 1.3 посвящен определению влияния лазерного излучения на захваченные в оптическую ловушку биологические микрочастицы. В работе [2] наблюдалось изменение эластичности оболочек эритроцитов в зависимости от мощности излучения лазера, формирующего оптическую ловушку. Оптический захват наблюдался при мощности излучения Nd:YAG лазера от 4 мВт, мощность лазера постепенно увеличивалась, при мощности 80 мВт было выявлено значительное уменьшение эластичности оболочки эритроцита, что свидетельствует об их повреждении. Проведенный для сравнения эксперимент с использованием аргонового лазера показал, что изменения в эластичности оболочек эритроцитов наступают при гораздо меньшей мощности – порядка единиц милливатт.

Таким образом, важнейшими параметрами лазерного излучения, обеспечивающими оптическое манипулирование микрообъектами, являются правильный выбор длины волны излучения и его мощности. Для оптического захвата биологических объектов необходимо использовать инфракрасное излучение длиной волны около 1 мкм. Это позволяет минимизировать поглощение и повысить допустимую мощность захвата не приводящую к оптически-индуцированным повреждением биологических микрочастиц. При этом мощность, необходимая для оптического манипулирования, колеблется в диапазоне от единиц до десятков (иногда до сотен) милливатт в зависимости от размеров и собственной подвижности биологического объекта.

Глава 2. Сверхфокусировка излучения полупроводникового лазера

Современные оптические пинцеты основаны на применении высококогерентных источниках излучения - газовых и твердотельных лазерах. Однако для многих современных практических применений необходимы более компактные, эффективные и недорогие оптические пинцеты. Полупроводниковые лазеры с широким полоском соответствуют определенным выше параметрам мощности – до 20 Вт в непрерывном режиме и обладают высокой надёжностью (свыше 10 000 часов), однако они подвержены филаментации и многомодовой генерации. Этот недостаток сильно влияет на возможность применения полупроводниковых лазеров при создании оптических пинцетов.

В параграфе 2.1 рассматриваются проблемы фокусировки многомодового излучения. Как правило, качество лазерного луча описывается параметром распространения луча M^2 [3] («коэффициент качества луча»). M^2 определяется как отношение расходимости данного луча к расходимости Гауссова луча. Это означает, что «идеальный» Гауссов пучок с минимальной расходимостью (ограниченной дифракцией) будет иметь $M^2 = 1$. Аналогично, M^2 представляет коэффициент увеличения объема многомодового лазерного пучка по сравнению с «идеальным» Гауссовым аналогом при использовании той же фокусирующей системы. Использование параметра распространения значительно облегчает введение квази-Гауссова пучка, который близок к Гауссовому в дальнем поле, но шире в фокальной плоскости. Математически это достигается многократным M^2 увеличением длины волны при математическом описании Гауссовых пучков. Как правило, мощные лазерные диоды имеют значения M^2 в диапазоне от 20 до 30, следовательно, квази-Гауссовы пучки многомодовых полупроводниковых лазеров имеют размеры фокусного пятна, превышающие размеры пятна Гауссова пучка на один-два порядка.

На рисунке 1 представлен расчет преобразования ширины пучка ω вдоль оси Z для двух лучей: Гауссова луча с коэффициентом распространения луча 1 и квази-Гауссова луча с коэффициентом распространения луча 18. Шкала нормирована на ширину пучка ω_0 с ограниченной дифракцией и соответствует Рэлеевскому расстоянию z_0 . Рис. 1 демонстрирует, что фокусировка излучения многомодовых лазерных диодов является проблемой, которая серьезно ограничивает использование мощных полупроводниковых лазеров в приложениях, требующих точной фокусировки.

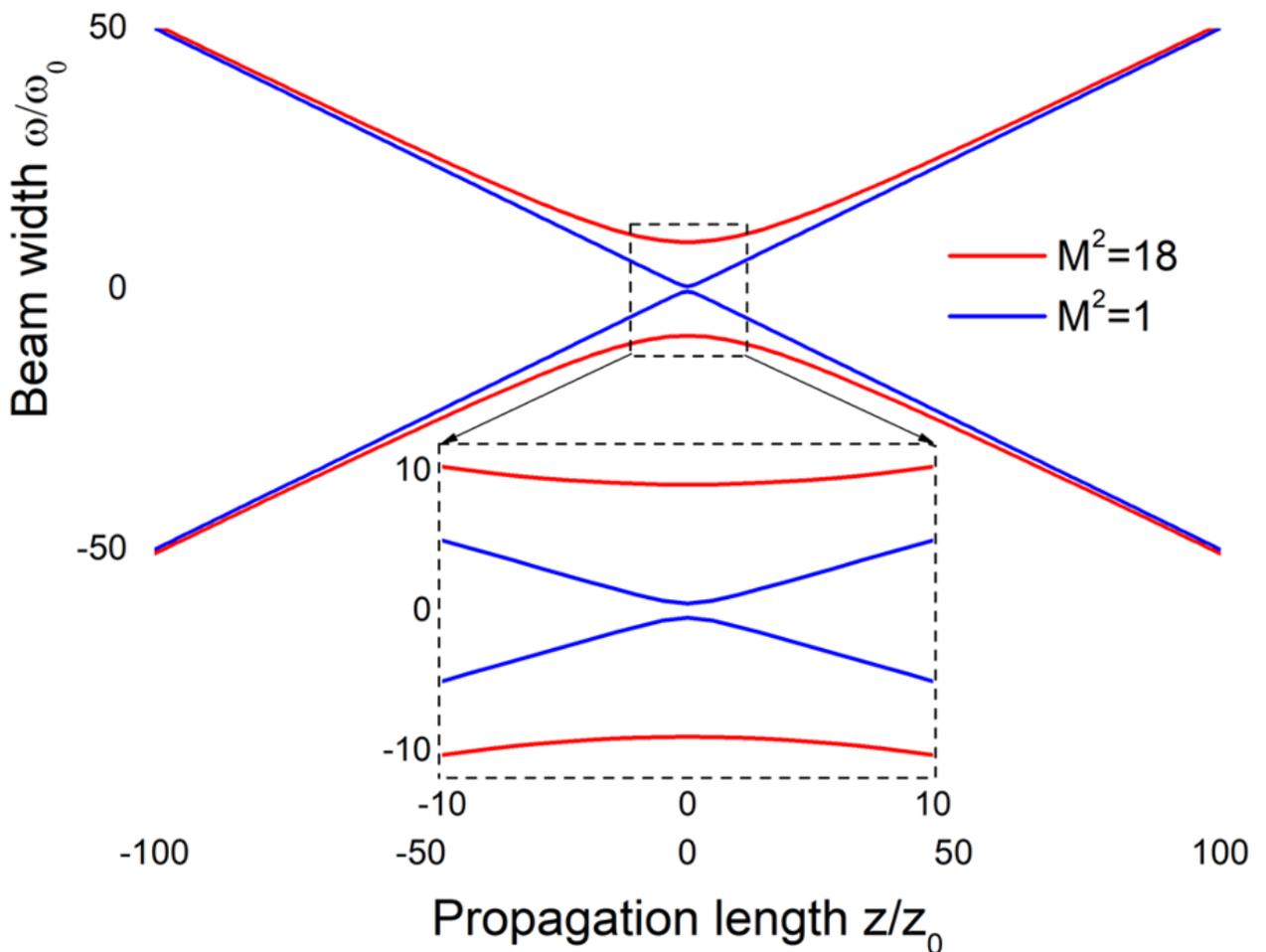


Рис. 1. Рассчитанное преобразования ширины Гауссова пучка ω при распространении вдоль азимутальной оси для двух пучков: «идеального» пучка с $M^2 = 1$ и квази-Гауссова пучка с $M^2 = 18$. Шкала нормирована на ширину пучка ω_0 с ограниченной дифракцией и соответствует Рэлеевскому расстоянию z_0 .

В настоящее время недорогие полупроводниковые лазеры применяются во многих областях науки и техники, и существует много методов для улучшения их многомодового излучения. Однако большинство предложений основаны на изменениях фазового фронта и/или компенсации волнового фронта многомодовым оптическим волокном. Обычно это достигается с помощью пространственных модуляторов света (SLM) или деформируемых зеркал (DMs) [4, 5], что увеличивает стоимость, сложность и размеры оборудования. Инновационный подход, представленный в данной работе, предполагает использование одного ультракомпактного (и, возможно, очень дешевого и доступного) элемента, интегрированного в оптическое волокно.

В параграфе 2.2 описана концепция сверхфокусировки излучения полупроводникового лазера с высоким параметром M^2 путем генерации Бесселева пучка с использованием конической линзы [6]. Этот тип

недифрагирующих лучей, способный сохранять свою интенсивность во время распространения [7], получил такое название, так как их профиль описывается функцией Бесселя первого рода.

В параграфе 2.3 приводится вывод пространственно-инвариантного решения волнового уравнения в свободном пространстве для описания Бесселевых пучков:

$$\Delta E(x, y, z, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E(x, y, z, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

Благодаря осевой симметрии, распространение монохроматического поля относительно z записывается в цилиндрической форме, что и даёт уравнение для комплексной амплитуды этого поля в виде:

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

где k_z и k_r соответственно продольный и поперечный показатели распространения поля $E(r, \phi, z, t)$, 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 решением волнового уравнения является Бесселева функция первого рода, для которого выражение нерасходящегося поля принимает вид:

$$E(r, \phi, z, t) = J_m(k_r r) e^{im\phi + ik_z z - i\omega t}, \quad (3)$$

где m – целое число.

На рисунке 2 представлено распределение интенсивности в поперечном сечении Бесселева пучка нулевого порядка ($m=0$).

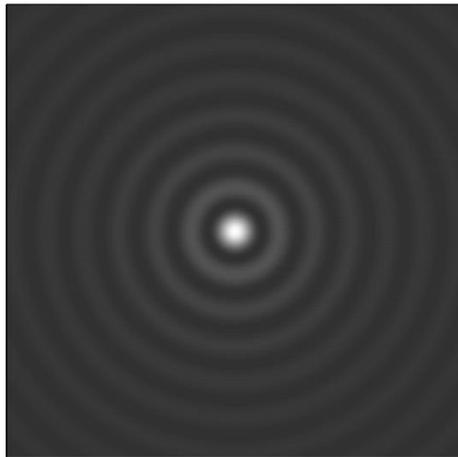


Рис.2. Распределение интенсивности в поперечном сечении Бесселева пучка нулевого порядка.

В параграфе 2.4 рассматриваются способы формирования сверхфокусированных лучей, особое внимание уделяется формированию

Бесселева пучка при прохождении плоской волны или сколлимированного Гауссова луча через коническую линзу (аксикон) [8]. Важным преимуществом этого метода является высокая эффективность, так как для формирования Бесселева луча используется вся энергия лазерного пучка. Диаметр центрального пятна сверхфокусированного луча определяется углом вершины аксикона и может быть порядка длины волны излучения.

Традиционные методы фокусировки многомодового излучения, описанные в параграфе 2.1, приводят к ряду искривлений волнового фронта, связанных с составляющими модами, и это, в свою очередь, вызывает смещение фокуса вдоль оптической оси. Кроме того, это приводит к увеличению размера фокусного пятна с ростом параметра распространения M^2 . Напротив, генерация Бесселева пучка зависит от «собственной интерференции» отдельных мод, что исключает любое увеличение размера фокусного пятна.

Параграф 2.5 посвящен определению длины распространения сверхфокусированного излучения. Поперечный размер центрального пятна Бесселева пучка, который создается посредством коллимирования многомодового квази-Гауссова луча через аксикон, значительно увеличивается из-за расходимости исходного пучка. Это, вместе с апертурой аксикона, накладывает физические ограничения на длину распространения Бесселева пучка. Однако начальный диаметр центрального пятна Бесселева пучка может быть в несколько раз меньше по сравнению с минимальным размером фокального пятна гауссова пучка с высоким значением M^2 .

Можно определить показатель качества (англ. figure of merit) FOM для сверхфокусировки многомодового квази-Гауссова пучка, основанный на собственной интерференции мод. Он выражается как отношение минимального размера фокусного пятна квазигауссова луча с высоким M^2 $\omega_{\min} = M^2\lambda/\pi$ к минимальному радиусу центрального пятна Бесселева пучка r_0 полученного с помощью аксикона с показателем преломления n и углом при вершине аксикона α от заданного квазигауссова пучка

$$FOM = \frac{\omega_{\min}}{r_0} \approx M^2(n - 1)\cos\frac{\alpha}{2}.$$

На рисунке 3 FOM показан для сверхфокусировки квази-Гауссова пучка с высоким параметром M^2 в зависимости от угла вершины аксикона. На графике также показан минимальный размер центрального пятна r_0 Бесселева пучка и минимальный размер фокусного пятна с высоким параметром M^2 квази-Гауссова луча с длиной волны 960 nm и коэффициентом распространения пучка 18 (последний не зависит

от угла аксикона и поэтому является постоянным). Очевидно, что с помощью предложенного способа фокусировки излучения многомодового лазера с «собственной интерференцией» можно добиться двукратной сверхфокусировки при использовании аксикона с углом при вершине 160° и более чем 3,5-кратной сверхфокусировки при использовании аксикона с углом при вершине 140° .

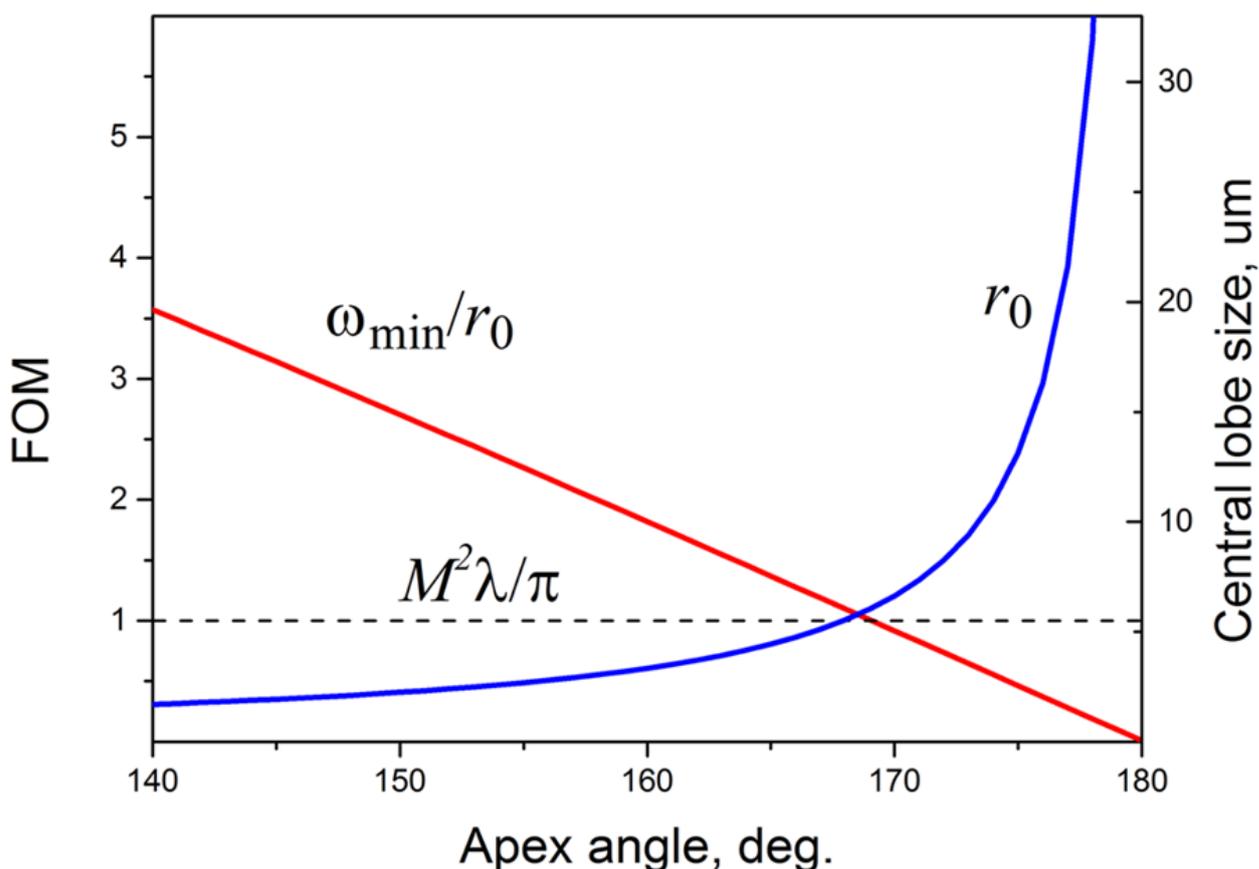


Рис.3 Показатель качества (FOM) сверхфокусировки квази-Гауссова луча с высоким параметром распространения M^2 как функция угла при вершине аксикона (красный). На графике показан минимальный размер центрального пятна Бесселева луча r_0 (синий) и минимальный размер фокусного пятна квази-Гауссова луча с параметром распространения $M^2=18$ и длиной волны $\lambda = 960 \text{ nm}$ (пунктирная линия).

Глава 3. Микроаксикон на торце оптического волокна

Для экспериментального изучения параметров сверхфокусированного излучения был изготовлен аксикон на торце оптического волокна. Такой подход к формированию сфокусированного излучения, основанный на размещении аксикона непосредственно на оптическом волокне предполагает уникальные возможности компактности и интеграции.

В параграфе 3.1 показано, что при сверхфокусировке луча с высоким параметром M^2 крайне важно учитывать радиус вершины аксикона. Как правило, этот радиус составляет около 100 мкм, а диаметр скругления на конце высококачественного аксикона может быть менее 50 мкм, поэтому его влияние может быть не столь значительным для многих практических применений. Приведены математические расчеты влияния скругления вершины аксикона на распространение сфокусированного луча. Показано, что эффекта скругления вершины аксикона можно практически избежать путем соответствующей блокировки пораженной части Бесселева пучка. Однако, для достижения сверхфокусировки даже небольшое несовершенство аксикона может значительно увеличить размер центрального пятна выходного пучка. Поэтому качество вершины аксикона имеет решающее значение для практической реализации задач сверхфокусировки.

Параграф 3.2 посвящен методу изготовления микро-аксиконов для эксперимента с помощью 3D лазерной нанопечати, так же называемой многофотонной литографией [9] (MPL), на торце 100 мкм оптического волокна. Лазерная технология аддитивного производства позволяет напрямую изготавливать трехмерные микроструктуры с разрешением, превышающим дифракционный предел.

Экспериментальная 3D лазерная нанопечать позволила создать аксикон специально адаптированный для применений на торце оптического волокна, что схематически показано на рис. 4. В результате были получены микроаксиконы со скруглением их вершины менее 10 мкм. Для экспериментов, представленных в данной работе, используются микроаксиконы с углами при вершине 140° и 160° (см. рис. 5). Противоположная сторона оптического волокна была отполирована и заделана стандартным оптоволоконным соединителем. Это было сделано для подавления искажений волнового фронта, которые характерны для оптических волокон без расщепления.

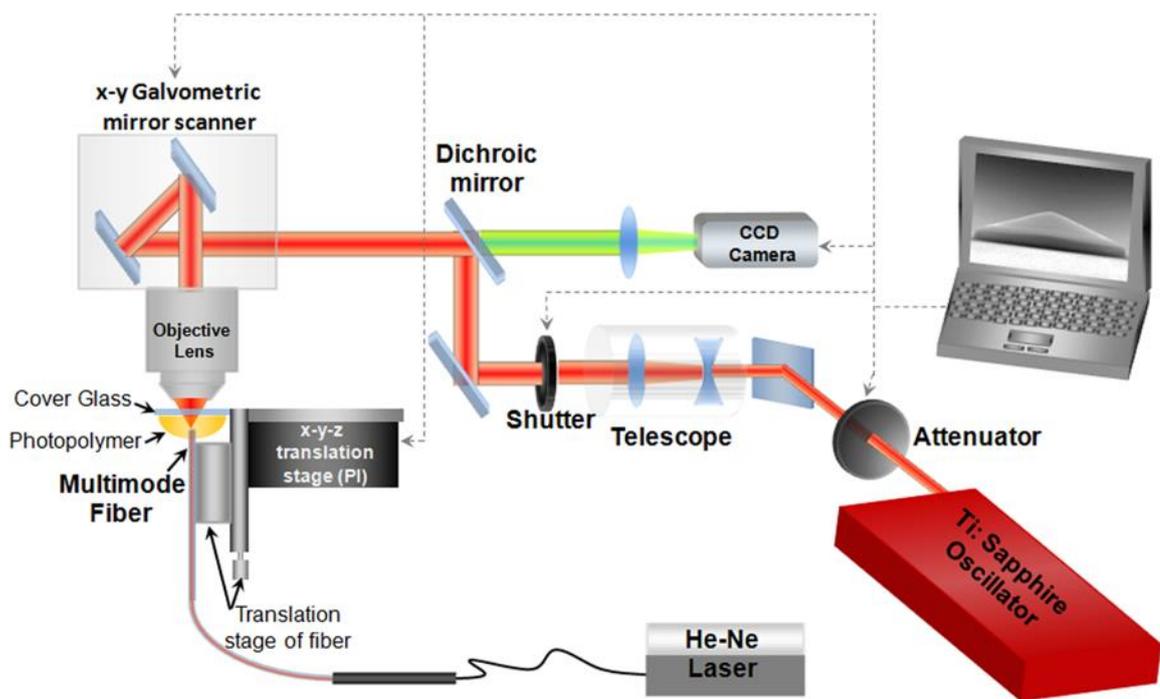


Рис. 4. Схематичное изображение экспериментальной установки, позволяющей осуществлять прямую 3D лазерную печать на оптическом волокне.

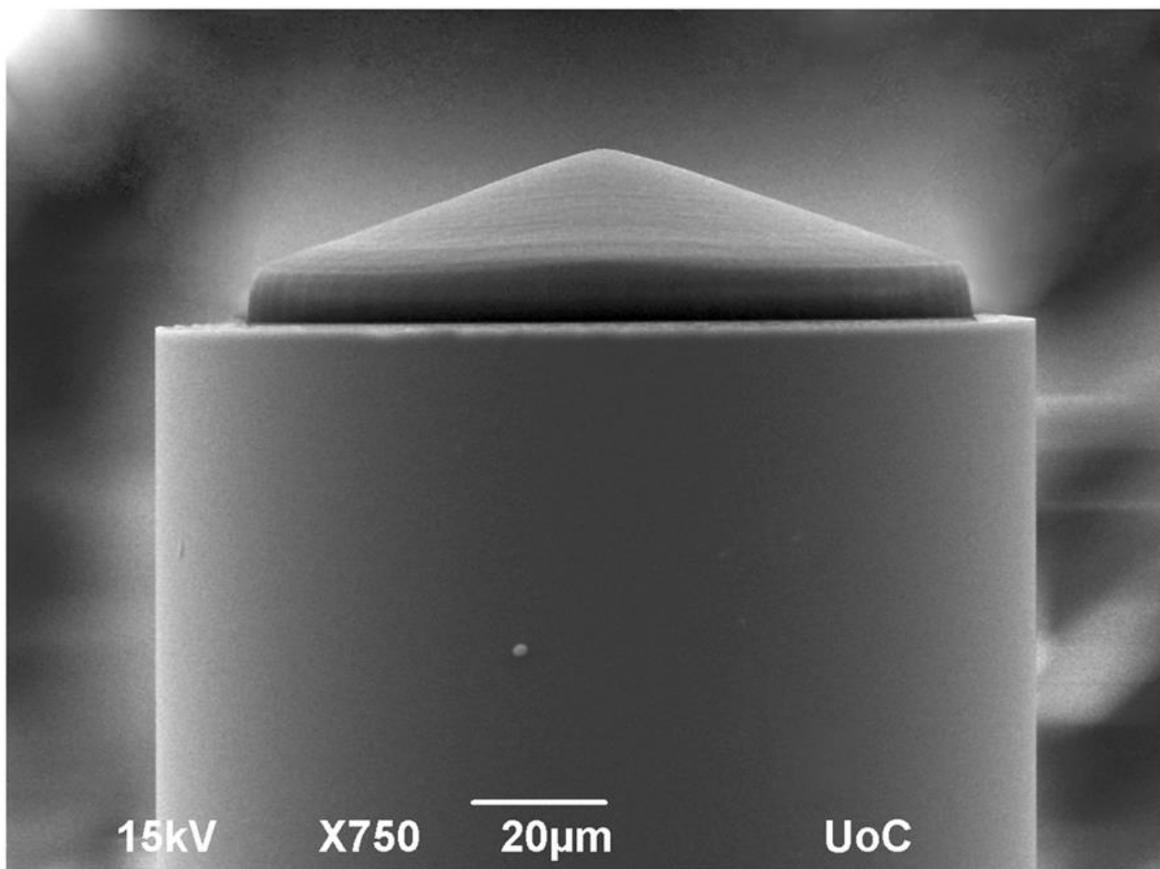


Рис. 5. Фотография микроаксикона на торце 100 мкм оптического волокна. Угол вершины аксикона составляет 140 °. Радиус скругления вершины аксикона составляет менее 10 мкм.

Подобная техника лазерной 3D нанопечати была описана для одномодовых волокон [10] и SMF кабелей [11], она позволяет изготавливать сложную микрооптику включающую высокоэффективные мульти-линзовые элементы, поверхности свободной формы и фотонные кристаллы. Однако описанный в работах [10, 11] комплексный подход ограничен одномодовым излучением и не предлагает решения для фокусировки лучей мощных (многомодовых) лазеров с высоким параметром M^2 .

В параграфе 3.3 подробно описан метод 3D лазерной нанопечати аксикона на оптическом волокне. Процесс изготовления аксикона показал высокую повторяемость. Для 3D лазерной нанопечати на срезе волокна аксикон был впервые разработан с использованием программного обеспечения SolidWorks® послойно с интервалом 100 нм. Каждый горизонтальный срез был отпечатан в фотополимер путем перемещения сфокусированного лазерного луча гальвосканера ScanLab. Специальная основа была разработана для размещения волокна и гибридного материала. Это основание было размещено на подвижке линейного перехода XYZ, как показано на рис.4. Чтобы совместить сердцевину волокна с объективом микроскопа, гелий-неоновый лазер (Uniphase) был присоединен к свободному концу волокна. Таким образом, свет, выходящий из торца волокна, который был погружен в фотополимер, позволил четко визуализировать сердцевину волокна с помощью ПЗС-камеры и выровнять ее с лазерным записывающим лучом, линейно перемещая подвижку (PI). Такой способ позволяет изготавливать аксиконы на каждом образце концентрически по отношению к оптическому волокну. Луч от фемтосекундного титан-сапфирового лазерного луча (Femtolasers Fusion, 800 нм, 75 МГц, <20 фс) фокусировался в органически-неорганический гибридном композите SZ2080 с использованием объектива микроскопа (40 ×, NA = 0,95, Zeiss, Plan Achromat). После печати каждого слоя образец опускали на 100 нм, чтобы «напечатать» следующий срез. Движение по оси z осуществлялось с использованием линейной этапной подвижки(PI). Средняя мощность, использованная для изготовления аксикона, составляет 40 мВт (средняя передача 20%). Скорость гальво сканирования была постоянной и составляла 200 мкм/с. После завершения лазерной обработки неполимеризованный SZ2080 удаляли погружением в раствор 1:1 изопропанол/ 4-метил-2-пентанон.

В параграфе 3.4 приведены характеристики излучения, использованного в дальнейших экспериментах. В качестве источника излучения в соответствии с описанными выше требованиями был выбран

полупроводниковый лазер с параметром распространения $M^2=18$ и длиной волны 960 нм. Изображение продольного распределения интенсивности сверхфокусированного лазерного показано на рис. 6. Угол при вершине микроаксикона 140° . На данном рисунке также показано продольное распределение излучение того же лазера, сфокусированного линзой с числовой апертурой $NA = 0,65$. Для данных параметров лазерного луча минимальный размер фокусного пятна, определяемый соотношением $2\omega_{\min} = 2M^2\lambda/\pi$, составляет приблизительно 11 мкм . Это хорошо согласуется с измеренным фокусным пятном 18 мкм для линзы $NA = 0,65$ на рис 6. Из рисунка видно, что поперечный размер сверхфокусированного луча, полученного с помощью микроаксикона 140° , составляет приблизительно 2–4 мкм при длине распространения 20 мкм. Это позволяет на порядок уменьшить размер фокусного пятна по сравнению с минимальным размером фокусного пятна, достижимого при фокусировке идеальной линзой $NA = 1$.

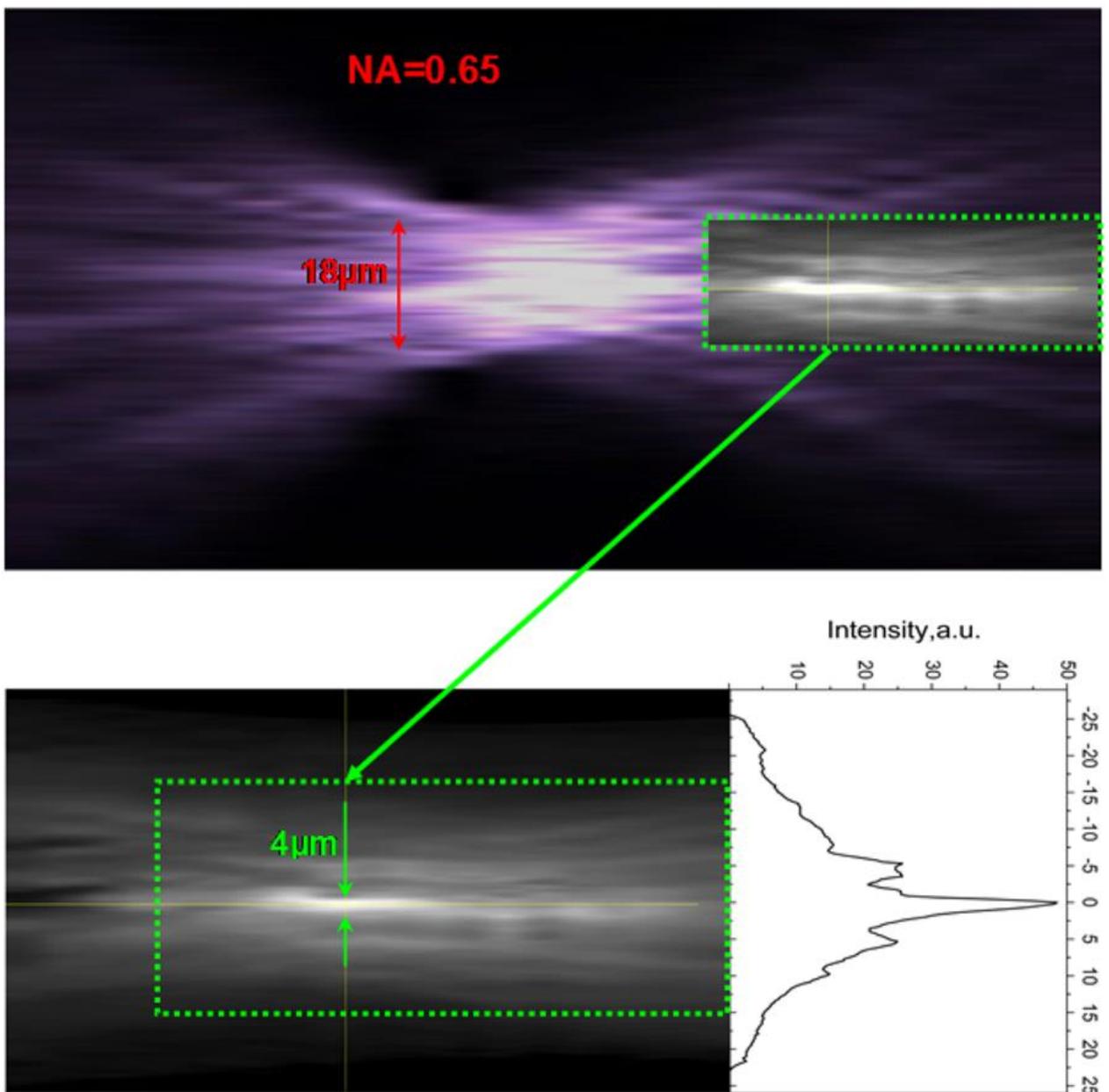


Рис. 6. Фокусировка луча полупроводникового лазера при помощи линзы с $NA = 0,65$ (верхнее изображение) и сверхфокусировка того же луча с помощью аксикона 140° , изготовленного на торце оптического волокна 100 мкм (нижнее изображение). Поперечный размер сверхфокусированного пучка с длиной распространения около 20 мкм составляет 2–4 мкм. Это позволяет уменьшить размер фокального пятна примерно на порядок, по сравнению с минимальным размером фокального пятна ~ 11 мкм, достижимым с идеальной линзой $NA = 1$ для лазерного луча с длиной волны 960 нм и параметром распространения луча равным 18.

Глава 4. Применение сверхфокусированного излучения полупроводникового лазера

Сверхфокусированный лазерный луч также был получен с использованием микроаксикона с углом при вершине 160° . В параграфе 4.1 определены параметры излучения для экспериментальной демонстрации оптического захвата и манипулирования крысиными эритроцитами. Средний размер эритроцитов составлял $\sim 5\text{--}6$ мкм, что соответствовало поперечному размеру сверхфокусированного луча, полученного с микроаксиконом с углом при вершине 160° , а не с аналогом 140° (см. рис. 3). Рисунок 7 показывает характеристику светового тока и типичный спектр 960 нм полупроводникового лазера, используемого в экспериментах по оптическому захвату. Важно отметить, что низкое спектральное качество лазерного луча является ограничивающим фактором для его когерентности и возможности собственной интерференции, что, в свою очередь, является фактором, способствующим генерации Бесселевого пучка. В статье [6] было продемонстрировано, что генерация Бесселевых пучков возможна лазерными диодами очень низкого спектрального качества и даже светодиодами. Также было продемонстрировано, что пространственная когерентность лазерного луча является более важным параметром для возможности генерации и качества Бесселевых лучей, чем временная когерентность. Таким образом, демонстрация сверхфокусировки многомодового лазерного излучения с плохой пространственной когерентностью является еще одним очень важным шагом, открывающим новые возможности для применения полупроводниковых лазеров.

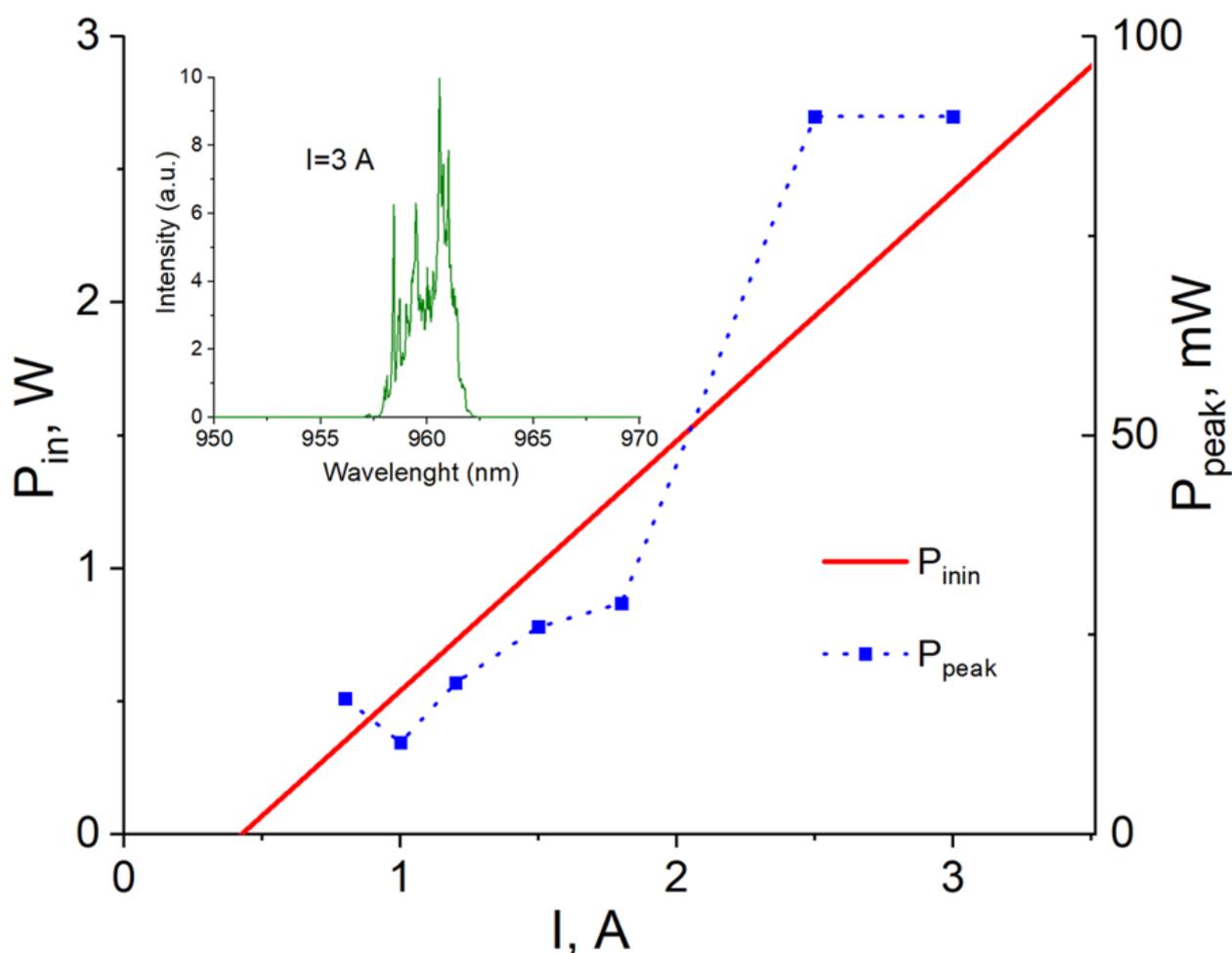


Рис. 7. Токовая характеристика полупроводникового лазера 960 нм, использованного в экспериментах по оптическому захвату (красная линия). Синие квадраты показывают оптическую силу в сверхфокусированном пучке при разных уровнях накачки. На вставке показан типичный оптический спектр полупроводникового лазера при токе накачки 3А.

В параграфе 4.2 экспериментально измерены параметры сверхфокусированного луча. Как упоминалось выше, максимальная мощность, передаваемая через микроаксикон на торце оптического волокна в наших экспериментах, была около 2,5 Вт (ограничена драйвером лазера). Процесс фокусировки с помощью микроаксикона хорошо управляем, что позволило обнаружить тот факт, что стабильность фокальной области зависит исключительно от стабильности волоконно лазерного источника. Область фокусировки берет свое начала от вершины аксикона и распространяется на длину, определяемую углом при вершине аксикона и его апертурой, а так же параметрами луча. Как видно из рис. 8, длина распространения сверхфокусированного луча составляет порядка нескольких десятков мкм, в то время как поперечный размер был значительно ниже – порядка 5 мкм на всех уровнях накачки. К сожалению, коэффициент

распространения лазерного луча M^2 трудно контролировать, так как изменение мощности лазера обычно приводит к изменению M^2 . Следовательно, прямое сравнение стабильности фокусировки на разных уровнях мощности невозможно. Тем не менее, проведенные эксперименты суперфокусировки на разных уровнях мощности демонстрируют высокую производительность и хорошую стабильность при изменениях мощности. Пиковая мощность в сверхфокусированном луче демонстрировала почти линейное увеличение с накачкой (показано синим квадратом на рис. 7) и составляла порядка 100 мВт при накачке 2,5–3 А.

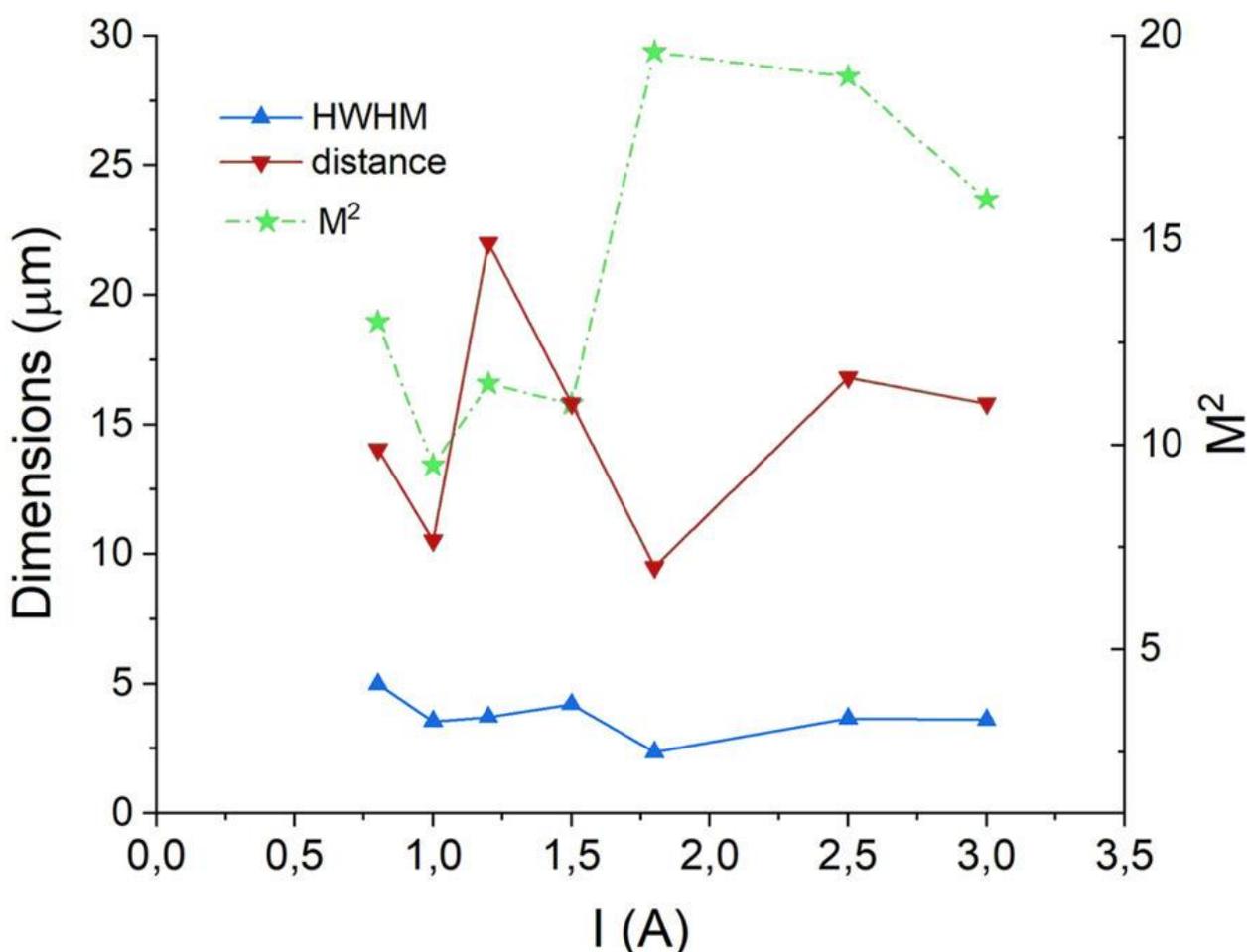


Рис. 8. Поперечный размер (синий) и длина распространения (красный) сверхфокусированного пучка, генерируемого с помощью микроаксикона 160° и полупроводникового лазера 960 нм с коэффициентом M^2 (зеленый), меняющимся в зависимости от тока накачки.

Для экспериментальной демонстрации оптического манипулирования биологическими микрообъектами в параграфе 4.3 использовалась крысиная кровь в водно-гепариновом растворе. Серия экспериментальных

изображений показана на рис. 9 и демонстрирует двумерное оптическое улавливание и манипулирование эритроцитами с помощью сверхфокусированного луча полупроводникового лазера с высоким M^2 . На рис. 8 красные стрелки указывают на захваченные в оптическую ловушку эритроциты и их перемещения. Площадь захвата составляет около 100 мкм (ограничено полем зрения оптической системы микроскопа и ПЗС-камеры), а максимальная скорость перемещения составляет около 10 мкм/с. Следует отметить, что оптический захват эритроцитов в наших экспериментах достаточно стабилен, и может быть выполнен даже с негидрофобными предметными стеклами.

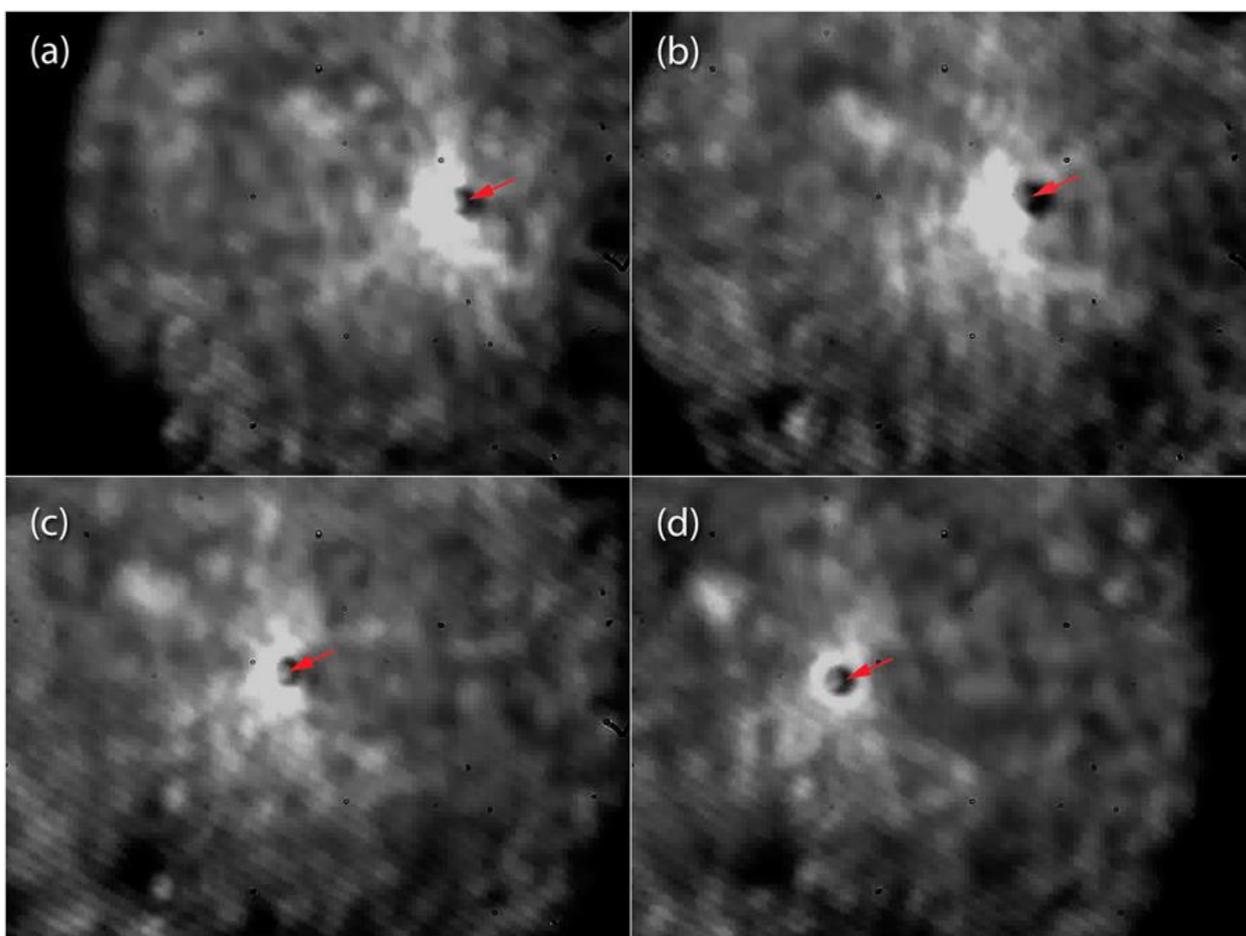


Рис. 9. Оптический захват и манипулирование эритроцитами с помощью сверхфокусированного луча от полупроводникового лазера с длиной волны 960 нм с $M^2=18$. Красные стрелки указывают на захваченный объект и его движение.

Параграф 4.4 посвящен стабильности микроаксионов. Наибольшая мощность непрерывной волны, передаваемая через микроаксикон на торце оптического волокна, составляет порядка 2,5 Вт, что соответствует

плотности мощности более $0,03 \text{ МВт/см}^2$. При такой плотности мощности (ограниченной драйвером лазера) признаков деградации микроаксиконов не обнаружено. Согласно опубликованным данным [12], результаты для светочувствительного материала (SZ2080 + PI), который был протестирован на порог повреждения индуцированного лазером (LIDT) на длине волны порядка 1 мкм для серии фемтосекундных и наносекундных импульсов, составляет $0,49 \pm 0,05 \text{ Дж / см}^2$ и $10,63 \pm 1,07 \text{ Дж/см}^2$ соответственно. Более того, другое исследование, посвященное устойчивости микролинз к непрерывному и фотосекундному импульсному воздействию [13] доказывает, что чистый SZ2080~ в 20 раз более устойчив к высокой освещенности по сравнению со стандартным литографическим материалом (SU8) и может выдерживать интенсивность до $1,91 \text{ ГВт / см}^2$.

В параграфе 4.5 показаны наиболее перспективные способы применения продемонстрированного подхода сверхфокусировки. К ним относится непосредственное применение полупроводниковых лазеров («прямых диодов») в обработке материалов и 3D-печати, где требуется высокая мощность и точная фокусировка. В настоящее время большинство таких разработок основаны на твердотельных лазерах с диодной накачкой (в том числе на волоконных и дисковых активных средах). Эти лазеры действуют как «преобразователи мощности», преобразуя низкое качество пучка нескольких некогерентно комбинированных лазерных диодов в один твердотельный лазерный луч высокой яркости. К сожалению, это преобразование приводит к значительному снижению эффективности и значительному увеличению отпечатка. Поэтому переход к «прямому диоду» и исключение необходимости использовать твердотельные активные среды считается единственным способом наиболее эффективного преобразования электрического тока в лазерное излучение. Таким образом технология сверхфокусировки открывает возможности для многих новых применений с «прямыми диодами» и для улучшения существующих в пайке, сварке, скрабировании, маркировке, гравировке, покраске, зачистки, порошковой пайке, синтезу, и механической обработки.

Заключение

Представленные результаты убедительно показывают, что сверхфокусированное излучение полупроводникового лазера с высоким параметром распространения луча может быть использовано в приложениях биофотоники для оптического захвата и манипулирования эритроцитами и другими микроскопическими объектами. Концепция «сверхфокусировки»

для лазера с высоким M^2 основана на генерации Бесселева пучка с использованием конической линзы и дополнена новой конструкцией для аксикона на торце оптического волокна. Нам удалось достичь поперечного размера сверхфокусированного пучка порядка 2–4 мкм при длине распространения 20 мкм. Это было сделано с помощью микроаксикона с углом при вершине 140° и лазерного луча 960 нм с параметром распространения луча $M^2 = 18$. Это дает на порядок меньший размер фокусного пятна по сравнению с минимальным размером фокусного пятна, достижимым при таком луче и идеальной линзе $NA = 1$. Таким образом, результаты являются хорошим предзнаменованием для будущих разработок в области обработки материалов, трехмерной лазерной печати, биомедицинской фотоники, где требуется как высокая мощность, так и точная фокусировка.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы

1. S. A. Poniaev, K. K. Soboleva, A. I. Sobolev, G. S. Sokolovskii, «Study of particle drag force in a channel for optical trapping applications», *Laser Optics*, 2016.
2. G.S.Sokolovskii, V.V.Dudelev, V.Melissinaki, S.N.Losev, K.K.Soboleva, A.G.Deryagin, V.I.Kuchinskii, M.Farsari, W.Sibbett, E.U.Rafailov, «Optical trapping with superfocused high- M^2 laser diode beam», *Proc. SPIE*, v. 9343, 9343-25, 2015.
3. G.S.Sokolovskii, V.V.Dudelev, S.N.Losev, K.K.Soboleva, A.G.Deryagin, K.A.Fedorova, V.I.Kuchinskii, W.Sibbett, E.U.Rafailov, «Bessel beams from semiconductor light sources», *Progress in Quantum Electronics*, 38(4), pp. 157–188, 2014.
4. G.S.Sokolovskii, V.Melissinaki, V.V.Dudelev, S.N.Losev, K.K.Soboleva, E.D.Kolykhalova, A.G.Deryagin, V.I.Kuchinskii, E.A.Viktorov, M.Farsari, W.Sibbett, E.U.Rafailov, «Superfocusing of high- M^2 semiconductor laser beams: experimental demonstration», *Proc. SPIE*, v. 9134, 9134-57, 2014.
5. Г.С.Соколовский, С.Н.Лосев, К.К.Соболева, В.В.Дюделев, А.Г.Дерягин, В.Сиббет, В.И.Кучинский, Э.У.Рафаилов, «Манипулирование микрочастицами при помощи бесселевых пучков, полученных от полупроводниковых лазеров», *Письма в ЖТФ*, 2014, т.40(11), с.53-59.
6. G.S.Sokolovskii, V.V.Dudelev, S.N.Losev, K.K.Soboleva, A.G.Deryagin, E.A.Viktorov, V.I.Kuchinskii, W.Sibbett, E.U.Rafailov, «Optical trapping

- with Bessel beams generated from semiconductor lasers», Int. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2014
7. G.S.Sokolovskii, V.V.Dudelev, S.N.Losev, K.K.Soboleva, A.G.Deryagin, V.I.Kuchinskii, W.Sibbett, E.U.Rafailov, «Optical trapping with Bessel beams generated from semiconductor lasers», Journal of Physics: Conference Series, 572 012039, 2014.
 8. 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, «Влияние характеристик аксикона и параметра качества пучка M^2 на формирование бесселевых пучков излучения полупроводниковых лазеров», Квантовая Электроника, т.43(5), с.423-427, 2013.

Список литературы

1. Ashkin A., Dziedzic J. M., Bjorkholm J. E., Chu S. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles// Opt. Lett. – 1986. – 11(5). – p.288–290.
2. Ashkin A., Dziedzic J.M., Yamane T. Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams // Nature. – 1987. – v.330. – p.769-771.
3. ISO 11146, Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios (2005).
4. Cižmár T., Dholakia K. Exploiting multimode waveguides for pure fibre-based imaging// Nat. Commun. – 2012. –v.3. – p.1027.
5. Papadopoulos I. N., Farahi S., Moser C., Psaltis D. Focusing and scanning light through a multimode optical fiber using digital phase conjugation// Opt. Express – 2012. – v.20. – p.10583–10590.
6. Соколовский Г.С., Дюделев В.В., Лосев С.Н., Золотовская С.А., Дерягин А.Г., Кучинский В.И., Рафаилов Э.У., Сиббетт В. Получение пространственно-инвариантных световых пучков при помощи полупроводниковых источников излучения // ПЖТФ – 2008. – т. 34(24). – с. 75–82.
7. Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory // J. of Opt. Soc. Am. – 1987. – A4. – p.651-654.
8. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф. Поле лазерного излучения сфокусированное реальными системами // Известия вузов. Радиофизика. – 1966. – т.9. – в.1. – с.95–101.

9. Malinauskas M., Farsari M., Piskarskas A., Juodkazis S. Ultrafast laser nanostructuring of photopolymers: A decade of advance // *Physics Reports*. – 2013. – v. 533. – p. 1-31.
10. Gissibl T., Tiele S., Herkommer A., Giessen H. Sub-micrometre accurate free-form optics by three-dimensional printing on single-mode fibres// *Nat. Commun.* – 2016. – v.7, – p.11763.
11. Gissibl T., Tiele S., Herkommer A., Giessen H. Two-photon direct laser writing of ultracompact multi-lens objectives// *Nat. Photon.* –2016. – v.10. – p.554–561.
12. Žukauskas A. et al. Characterization of photopolymers used in laser 3d micro/nanolithography by means of laser-induced damage threshold (lidt)// *Opt. Mater. Express* – 2014. – v.4. – p.1601–1616.
13. Jonušauskas L. et al. Optically clear and resilient free-form μ -optics 3d-printed via ultrafast laser lithography// *Materials* – 2017. – v.10. – p.12.

Аспирант

К.К. Соболева