

На правах рукописи

Достовалов Александр Владимирович

Создание периодических структур фемтосекундным
излучением внутри световодов и на поверхности металлов

01.04.05 «Оптика»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Институте автоматики и электрометрии
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИАиЭ СО РАН)

Научный руководитель: **Бабин Сергей Алексеевич**
доктор физико-математических наук, член-
корреспондент РАН

Официальные оппоненты: **Жуков Владимир Петрович**
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт вычислительных
технологий Сибирского отделения Российской
академии наук,
старший научный сотрудник

Охримчук Андрей Гордеевич
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Научный центр волоконной
оптики Российской академии наук,
старший научный сотрудник

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт лазерной физики
Сибирского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится "10" апреля 2015 г. в 11³⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 003.005.01 при Федеральном государственном
бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии СО
РАН, адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан " " _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н.

Ильичев Л. В.

Общая характеристика работы

Актуальность

В последние десятилетия с развитием фемтосекундных ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$) лазерных технологий, позволяющих получать сверхкороткие импульсы с высокой энергией, все большую популярность набирает фемтосекундная микрообработка, которая имеет ключевое преимущество - возможность локального изменения показателя преломления в нефоточувствительных прозрачных материалах [1]. В настоящее время уже продемонстрировано применение данного метода для создания различных оптических элементов: волоконных решеток показателя преломления, фазовых масок, ответвителей, планарных волноводов [2; 3]. Исследование влияния характеристик излучения на параметры модификации (форма, размер, изменение показателя преломления) и их оптимизация для получения необходимых параметров микроструктур представляется актуальной задачей оптики и лазерной физики. В частности, изучается влияние длительности, энергии импульсов, направления поляризации, условий фокусировки, скорости записи на параметры модификации материала [4; 5]. Длина волны излучения также является одним из важных параметров, определяющих процесс модификации, поскольку именно от него зависит порядок фотонности процесса при нелинейном поглощении импульса, кроме того, оптические свойства самого материала существенно меняются при изменении длины волны. Таким образом, исследование эффективности поглощения на различных длинах волн является актуальной задачей для развития технологии фемтосекундной записи. Временные характеристики излучения являются также важным фактором, поскольку динамика и взаимодействие различных физических процессов (многофотонная ионизация, лавинная ионизация, плазменное поглощение, температурная релаксация) определяют режим записи.

Одной из реализаций технологии создания решеток показателя преломления в волоконных световодах (ВС) с помощью фс излучения является метод поточечной лазерной записи. Однако данный метод имеет ряд недостатков, в частности, значительные нерезонансные потери и плохую воспроизводимость результатов [6] из-за проблемы точного

позиционирования области модификации внутри сердцевины ВС на всей длине решётки, которая может достигать нескольких сантиметров. Поэтому так актуальна разработка технологии поточечной записи длиннопериодных волоконных решёток (ДПВР) с минимальными нерезонансными потерями и высокой воспроизводимостью результатов. Актуальной задачей является также фс запись волоконных брэгговских решёток (ВБР) через полиимидное покрытие, поскольку это позволяет увеличить предел прочности ВБР на растяжение и их стойкость к высоким температурам, что расширяет спектр применения датчиков на основе ВБР. Стандартная технология записи ВБР с помощью УФ излучения требует удаления непрозрачного (для данных длин волн) пластикового защитного покрытия, что значительно снижает прочностные характеристики ВБР. Для фс излучения с длиной волны ~ 1 мкм защитное покрытие прозрачно, поэтому в этом случае возможна модификация показателя преломления ВС без удаления защитного покрытия. Кроме того, фемтосекундная модификация ВС с чисто кварцевой сердцевиной делает возможным использование ВБР датчиков в среде с повышенной концентрацией водорода.

Помимо представленных выше возможностей технологии фс модификации прозрачных материалов, существует широкий класс задач, связанных с поверхностной модификацией как прозрачных, так и непрозрачных (металлы, полупроводники) материалов, где также проявляются особенности фемтосекундного взаимодействия, например, создание лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИПС), исследование которых являются актуальной задачей как с точки зрения исследования механизмов образования ЛИПС, так и с точки зрения их практического применения [7].

Цель работы

Исходя из вышесказанного, целью данной работы являлось создание периодических структур высокого качества внутри световодов и на поверхности металлов методом поточечной записи фемтосекундным излучением иттербиевого лазера (как основной, так и второй гармоники).

Задачи работы

Основные задачи, которые необходимо было решить для достижения цели:

1. Исследовать процесс поглощения энергии фс излучения в зависимости от параметров излучения (в первую очередь от длины волны и энергии импульса) при фокусировке под поверхностью диэлектрика.
2. Разработать технологию фемтосекундной модификации показателя преломления внутри прозрачных диэлектриков и создать структуры с периодом от 0,5 мм до 0,5 мкм.
3. Исследовать влияние формы области модификации на спектральные характеристики решёток показателя преломления в волоконных световодах.
4. Исследовать характеристики волоконных решеток, записанных фемтосекундным излучением через пластиковую защитную оболочку световода, в том числе для их применений в качестве сенсоров температуры и деформации.
5. Исследовать особенности формирования лазерно-индуцированных периодических структур на поверхности различных металлов в зависимости от параметров падающего фс излучения.

Научная новизна

В результате численного моделирования распространения сфокусированного фс излучения в плавленном кварце впервые установлено, что эффективность поглощения излучения для второй гармоники выше, чем для основного излучения иттербиевого лазера с длиной волны 1030 нм. При этом размер области модификации меньше для основного излучения из-за более высокой степени нелинейности процесса модификации. Кроме того, установлено, что использование фс импульсов с асимметричной временной формой приводит к лучшей по сравнению с симметричными импульсами локализации области поглощения.

Впервые предложен и реализован метод записи длиннопериодных волоконных решеток в нефоточувствительных световодах фс излучением с ограниченным щелью пучком, с помощью которого удалось снизить величину «серых» потерь в спектре ДПВР по сравнению с записью гауссовым пучком.

Впервые продемонстрирована запись ВБР первого и второго порядков в нефоточувствительных ВС без снятия защитного полиимидного покрытия, при которой ВБР имеют высокую температурную стойкость до 350 °С.

Впервые обнаружен эффект поворота штрихов ЛИПС на поверхности никеля относительно направления поляризации излучения. Впервые обнаружено одновременное формирование абляционных и термохимических ЛИПС на пленках титана при острой фокусировке фс излучения.

Практическая значимость

Представленный метод записи ДПВР в нефоточувствительных световодах ограниченным щелью фс пучком может быть применен для записи ДПВР, используемых в качестве спектральных фильтров волоконных лазеров, поскольку позволяет записывать ДПВР в нефоточувствительных световодах с минимальными нерезонансными потерями, а также сенсоров, поскольку позволяет создавать ДПВР без снятия защитной оболочки.

Записанные фс ВБР могут применяться в качестве чувствительных элементов сенсорных систем с высоким пространственным разрешением с большими рабочими диапазонами как по температуре, так и по деформации в сравнении с ВБР, созданными по технологии УФ записи. ВБР, записанные в световоде с чисто-кварцевой сердцевиной, могут успешно применяться для долговременного мониторинга в жестких внешних условиях повышенной концентрации водорода и наличии повышенного радиационного фона. Суперструктурированные ВБР могут применяться в сенсорных системах мониторинга для одновременного измерения температуры и деформации. Кроме того, узкополосные ВБР, записанные через защитную оболочку как пассивных, так и активных (легированных редкоземельными элементами) световодах, обладают повышенными эксплуатационными характеристиками при использовании в качестве зеркал мощных волоконных лазеров.

Лазерно-индуцированные периодические структуры на поверхности металлов могут использоваться, например, для изменения смачиваемости поверхности [7]. Таким образом, можно создавать самоочищающиеся поверхности. Кроме того, данные структуры могут применяться для формирования антиотражающих покрытий. Также известно, что оптические свойства поверхности металлов с ЛИПС изменяются в широком диапазоне длин волн от УФ до ИК и имеют поляризационную зависимость.

Термохимические ЛИПС [8] на поверхности титана могут быть использованы для формирования металлических периодических структур с высоким аспектным отношением с применением реактивного ионного травления, например, для создания микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертации представлялись автором лично в докладах на международной конференции «Fundamentals of Laser Assisted Micro- & Nanotechnologies» (24-28 июня 2013 г., Санкт-Петербург), на 15-ой и 16-ой международных конференциях «Laser Optics 2012» и «Laser Optics 2014» (25-29 июня 2012 г., 30 июня - 4 июля, Санкт-Петербург), на Российском семинаре по волоконным лазерам (14-18 апреля 2014г., Новосибирск), международной конференции «23th International Laser Physics Workshop» (14–18 июля, 2014, София, Болгария). Результаты также докладывались на научных семинарах Института автоматизации и электротехники СО РАН, Новосибирск (9 октября 2014, 20 ноября 2014).

Защищаемые положения

1. Эффективность поглощения излучения при фемтосекундной лазерной объемной модификации плавленого кварца для второй гармоники выше, чем для основного излучения иттербиевого лазера. Размер области модификации меньше при длине волны 1030 нм из-за более высокой степени нелинейности процесса модификации.
2. Фемтосекундная запись длиннопериодных волоконных решеток в нефоточувствительных световодах ограниченным щелью пучком позволяет уменьшить нерезонансные потери и увеличить амплитуду резонансного пика.
3. Запись волоконных брэгговских решеток фемтосекундным излучением через полиимидное защитное покрытие световода (как с германо-силикатной, так и с чисто кварцевой сердцевиной) позволяет создавать волоконные датчики температуры с рабочим диапазоном до 350 °С и пределом прочности по растяжению в 2 раза превышающий предел волоконных брэгговских решеток, записанных со снятием оболочки.

4. Поворот штрихов самоориентирующихся поверхностных решеток относительно направления поляризации излучения зависит от расстояния между треками и направления движения пучка в смежных треках. При двойном проходе лазерного пучка по одной и той же траектории, но с небольшой разницей в направлении поляризации излучения между проходами, возможно формирование двумерных периодических решеток. Формирование высокоупорядоченных периодических решеток происходит различным образом при движении вдоль и поперек направления поляризации излучения.

Личный вклад автора

Основные результаты получены автором лично. В ходе выполнения работ автор принимал активное участие в выборе направления исследований и постановке задач, осуществил теоретический анализ, провёл эксперименты и обработку результатов, подготовил материалы для публикаций.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 4 статьях в ведущих рецензируемых научных журналах [A1 – A4], определенных Высшей аттестационной комиссией, а также имеет 6 публикаций в материалах всероссийских и международных конференций [A5 – A10].

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы, а также списка обозначений и сокращений. Работа изложена на 120 страницах, содержит 53 рисунка и 3 таблицы. Список литературы состоит из 119 наименований.

Содержание работы

Во введении описывается область исследований, обосновывается актуальность, определяются цели и задачи, приводится новизна работы. Кроме того, дается обзор публикаций, посвященных фемтосекундной модификации различных материалов. Далее приводится изложение основного содержания работы по главам. В конце приводится список публикаций и формулируются защищаемые положения.

В первой главе представлены физические основы процесса фемтосекундной модификации различных материалов. А именно, описываются особенности распространения сверхкоротких импульсов в различных средах, приводятся оценки величин дисперсионного расплывания импульса для воздуха и плавленого кварца, оценки величин критической мощности, свыше которой происходит самофокусировка пучка. Далее описываются процессы взаимодействия с диэлектриками: нелинейное поглощение импульса и образование плазмы в фокальной области за счет многофотонной, туннельной или лавинной ионизации, последующая передача энергии от возбужденных электронов решетке и соответствующие режимы модификации прозрачных диэлектриков: плавное изменение показателя преломления, двулучепреломляющее изменение показателя преломления и образование микропустот. Также представлены основные отличия воздействия фемтосекундных импульсов по сравнению с более длительными воздействиями. Описываются процессы взаимодействия фемтосекундных импульсов с поверхностью металлов. Далее представлена теория волоконных решеток показателя преломления (длиннопериодных и брэгговских), области их практического применения, существующие методы их создания и преимущества фемтосекундной модификации. Кроме того, описаны основные модели формирования самоориентирующихся периодических структур на поверхности металлов и области их практического применения.

Во второй главе представлены результаты по теоретическому исследованию процесса поглощения энергии при фемтосекундной записи в плавленном кварце. В первом разделе представлены результаты сравнения эффективности поглощения энергии на основной и второй гармонике иттербиевого лазера. Для численного расчета была выбрана модель [9], учитывающая образование плазмы в области фокусировки посредством многофотонной и лавинной ионизации:

$$i\mathcal{E}_z + \frac{1}{2k} \Delta_{\perp} \mathcal{E} - \frac{k''}{2} \frac{\partial^2 \mathcal{E}}{\partial t^2} + k_0 n_2 |\mathcal{E}|^2 \mathcal{E} + \frac{i\sigma_{BS}}{2} (1 + i\omega\tau) \rho \mathcal{E} + \frac{i\beta^{(K)}}{2} |\mathcal{E}|^{2(K-1)} \mathcal{E} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\sigma_{BS}}{n_0^2 E_g} \rho |\mathcal{E}|^2 + \sigma^{(K)} |\mathcal{E}|^{2K} \quad (2)$$

Волновое уравнение (1) на комплексную амплитуду \mathcal{E} электрического поля в параксиальном приближении описывает распространение

фемтосекундного импульса внутри материала вдоль координаты z с учетом дифракции, дисперсии групповых скоростей, керровской нелинейности, лавинообразного и многофотонного поглощения. Уравнение (2) для плотности плазмы содержит члены, отвечающие за лавинную, многофотонную ионизацию. В качестве начальных условий для уравнений (1-2) рассматривался гауссов импульс. На рис. 1 представлена зависимость поглощенной энергии от величины энергии падающего излучения, из которого видно различное поведение кривых до энергии 40 нДж, связанное с преобладанием многофотонного поглощения при данных энергиях импульсов. Так как порядок многофотонного процесса зависит от длины волны падающего излучения, то и процесс многофотонного поглощения будет в данном случае различным для различных длин волн, что и наблюдается при данных энергиях импульсов. Тогда как для большей энергии превалирует плазменное поглощение и зависимость в данном случае стремится к линейной, а графики имеют практически одинаковый наклон при энергиях свыше 100 нДж. Из этих данных видно, что поглощенная энергия для второй гармоники больше по сравнению с основной при фиксированной величине энергии падающего излучения. По данной причине вторая гармоника более предпочтительна в задачах, где важно достичь минимального порога по модификации материала.

Приводятся распределения плотности плазмы для основной и второй гармоники при различной начальной энергии импульсов (41 нДж, 132 нДж, 335 нДж). Показано, что распределение плотности плазмы имеет сигарообразную форму при малой энергии импульса (41 нДж), тогда как при большей энергии (335 нДж) имеет более сложную форму. Показаны изолинии температуры стеклования плавленого кварца для обеих гармоник, из которых видно, что размер области модификации меньше для 1030 нм из-за более высокой степени нелинейности.

В разделе 2 представлены результаты численного исследования влияния временной формы импульса на модификацию плавленого кварца фемтосекундными импульсами. В качестве начальных условий для уравнения (1-2) рассматривается сфокусированный гауссов пучок с отличной от нуля компонентой ϕ_3 (дисперсия третьего порядка):

$$\mathcal{E}(z=0, r, \omega) = \mathcal{E}_0 \Delta t \sqrt{\frac{\pi}{2 \ln 2}} \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2} - \frac{ikr^2}{2f} - \frac{\Delta t^2}{8 \ln 2} \omega^2 - i \frac{\phi_3}{6} \omega^3\right)$$

Из сравнения изменения плотности плазмы со временем при $z = 0.181$ мм (в районе пика плотности плазмы) следует, что при энергии импульса 115 нДж плотность плазмы для $\phi_3 > 0$ больше, чем для $\phi_3 < 0$, что объясняет большее поглощение на начальном этапе распространения импульса. Показано, что в случае с $\phi_3 > 0$ за счет лавинной ионизации результирующая плотность плазмы становится выше в данном случае. Однако, при энергии импульса 200 нДж максимальная плотность плазмы достигается при $\phi_3 < 0$, что объясняется деформацией импульса в радиальном направлении при распространении, зависящей от знака ϕ_3 .

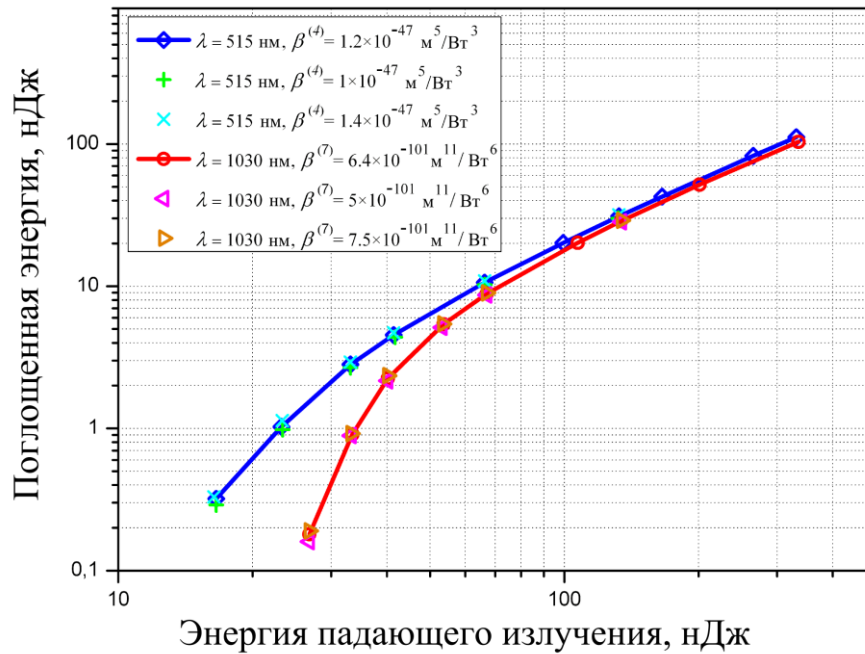


Рис. 1 Зависимость поглощенной энергии от величины энергии падающего излучения

В третьей главе представлены результаты по записи длиннопериодных волоконных решеток показателя преломления в стандартном телекоммуникационном световоде SMF-28e+. Представлен метод записи ДПВР в нефоточувствительных световодах фс излучением на 1026 нм с ограниченным щелью пучком, схема которого изображена на рис. 2а. За счет более равномерной модификации внутри сердцевины волокна (рис. 2в) данный метод позволяет записать ДПВР с нерезонансными потерями $\leq 0,2$ дБ, при этом амплитуда резонансного пика заметно выше, чем в случае записи

пучком с гауссовым профилем. Также показано, что амплитуду пика ДПВР можно увеличить посредством многократной записи (до 18.3 дБ, см. рис. 2г).

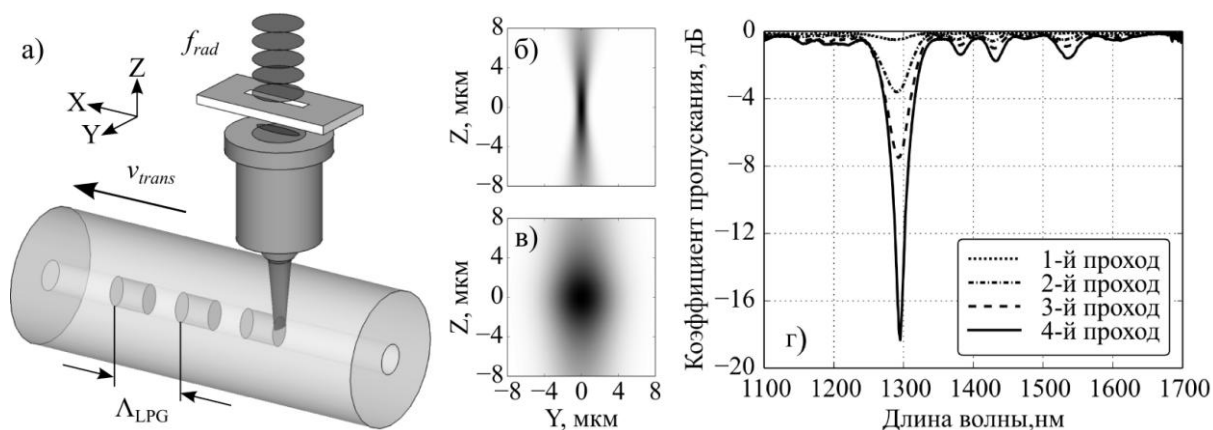


Рис. 2 а) Схема записи ДПВР ограниченным щелью пучком. б) Расчетное распределение интенсивности для случая фокусировки гауссова пучка и в) пучка, ограниченного щелью. Спектры пропускания ДПВР (длина $L = 20$ мм, период $\Lambda_{LPG} = 500$ мкм), записанных ограниченным щелью пучком.

Также представлено сравнение экспериментального и расчетного спектра ДПВР. Расчет осуществлялся для параметров ДПВР и ВС. Величина модуляции показателя преломления ДПВР, используемая в расчетах, равна $8,2 \times 10^{-4}$. Из сравнения данных расчетных и экспериментальных спектров следует, что пик поглощения ДПВР с $\lambda = 1295$ нм соответствует связи мод LP_{01} - LP_{02} , тогда как другие пики поглощения ДПВР являются резонансами, связанными с модами высшего порядка LP_{04} , LP_{05} , что также подтверждается большим смещением в коротковолновую область данных пиков по сравнению с модами низших порядков при увеличении показателя преломления внешней среды.

Четвертая глава посвящена созданию волоконных брэгговских решеток показателя преломления первого и второго порядка фс излучением с длиной волны 1026 нм через полиимидное защитное покрытие в световодах с легированной сердцевиной и чисто-кварцевой сердцевиной. При записи ВБР второго порядка амплитуда пика отражения составила 86.5% при спектральной ширине 0.18 нм (см рис. 3а). Показано, что такие решетки имеют температурную стойкость до 350 °С и предел прочности по растяжению в 2 раза выше по сравнению с ВБР, записанной со снятием оболочки. Представлены изображения данных ВБР, полученных с помощью метода дифференциальной интерференционно-контрастной микроскопии.

Также представлены результаты по созданию ВБР первого порядка с длиной $L = 1-2.7$ мм, чирпированных и суперструктурированных ВБР, также записанных через полиимидное защитное покрытие (см. рис.3б). Проведено сравнение спектров полученных ВБР с аналитическими выражениями для спектров однородных и суперструктурированных ВБР.

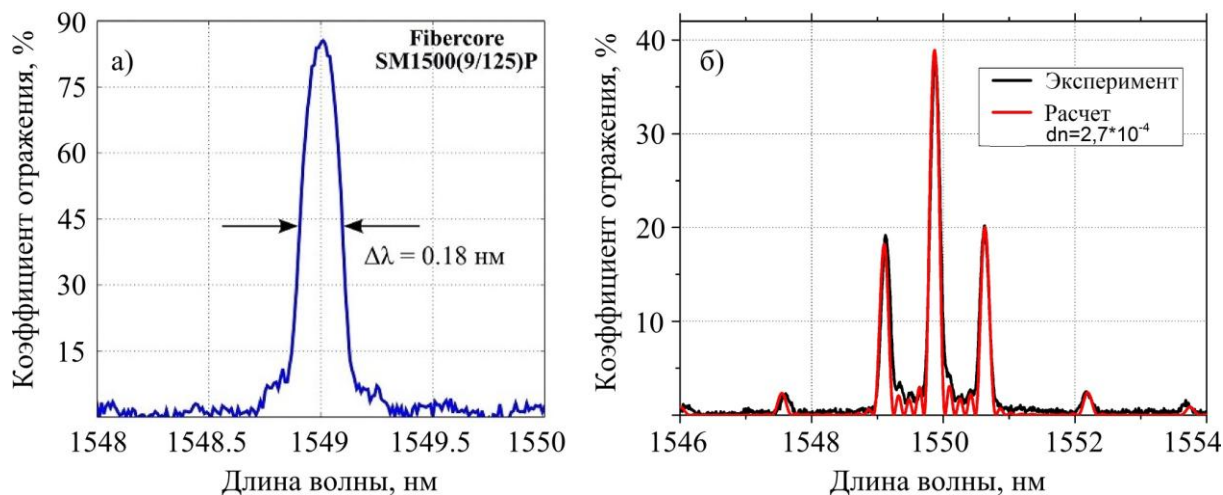


Рис. 3 а) Спектр отражения ВБР второго порядка, записанной через полиимидное защитное покрытие в волокне SMP1500(9/125)P со следующими параметрами $E_p = 160$ нДж, $L = 11$ мм, $\Lambda_{FBG} = 1.07$ мкм, б) Спектр суперструктурированной ВБР первого порядка ($L = 5,35$ мм, $\Lambda_{FBG} = 0.535$ мкм, $\Lambda_S = 1,07$ мм): расчет и эксперимент.

Пятая глава посвящена исследованию особенностей формирования лазерно-индуцированных периодических структур (ЛИПС) на поверхности никеля и титана. В первом разделе представлены результаты по созданию абляционных ЛИПС на поверхности никеля (рис. 4). Представлено сравнение образования ЛИПС с помощью основной и второй гармоники иттербиевого лазера, из которого видно, что период ЛИПС изменяется в 2 раза, что подтверждает интерференционную природу образования ЛИПС. Также показано, что наблюдаемый поворот штрихов решеток (рис. 4б) относительно направления поляризации излучения зависит от расстояния между треками и направлением движения пучка в смежных треках. Обнаружено формирование двумерных периодических решеток при двойном проходе лазерного пучка по одной и той же траектории, но с небольшой разницей в направлении поляризации между проходами. Предложено объяснение данного эффекта.

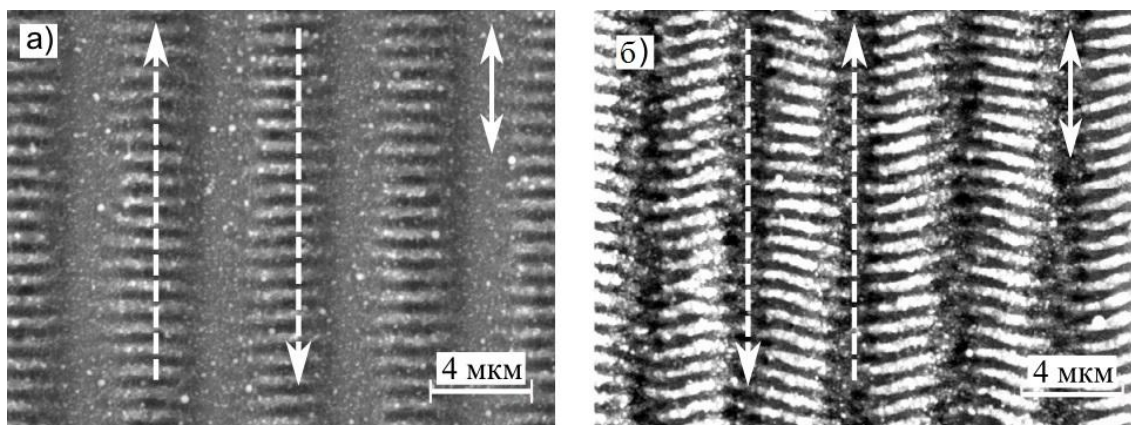


Рис. 4 а) СЭМ-микроизображения ЛИПС, записанных линейным сканированием фемтосекундного лазерного пучка с шагом между треками 5 мкм, $E_p=107$ нДж, $V=0.5$ мм/с (а), и шагом 4 мкм, $E_p=107$ нДж, $V=0.2$ мм/с (б).

Во втором разделе представлены результаты по созданию высокоупорядоченных термохимических ЛИПС на титане при острой фокусировке фс излучения с различными направлениями сканирования относительно направления поляризации излучения. Продемонстрирована возможность записи ЛИПС с азимутальным и радиальным направлением структуры. Также как и в случае модификации никеля, был обнаружен поворот направления структуры в области схождения треков относительно направления поляризации излучения. Кроме того, показано, что формирование ЛИПС происходит различным образом при движении вдоль направления поляризации излучения и в поперечном направлении, при этом во втором случае ЛИПС имеют неоднородную структуру со слабовыраженной периодичностью в направлении перпендикулярном поляризации излучения (см. рис. 5), что объясняется одновременным действием абляционного и термохимического механизмов.

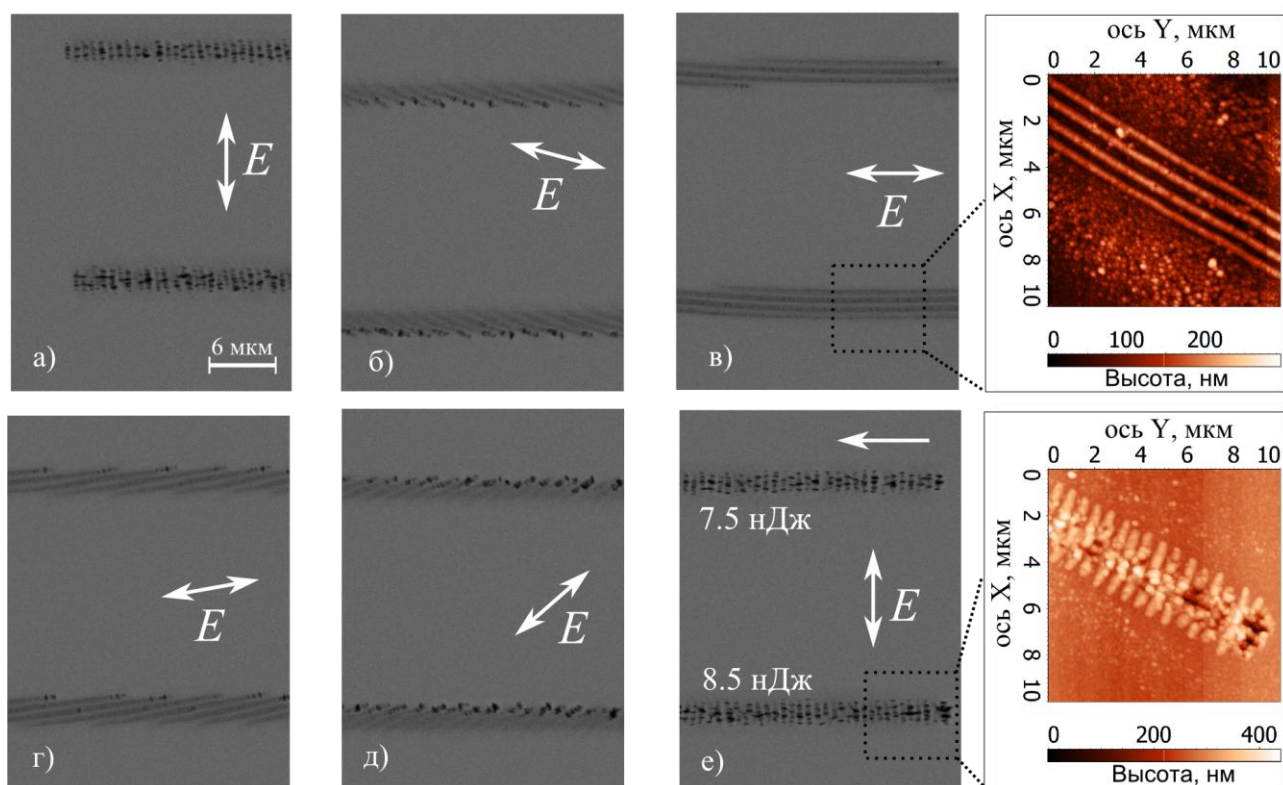


Рис. 5 Вид высокоупорядоченных ЛИПС при записи с поворотом поляризации и энергии импульсов 7.5 нДж (вверху) 8.5 нДж (внизу) На врезках показаны карта высот выделенных участков.

Заключение содержит формулировку результатов данной работы.

Основные результаты

1. Проведен сравнительный анализ модификации плавленого кварца на основной (1030 нм) и второй гармонике иттербиевого лазера. Моделирование показало, что поглощенная энергия для длины волны 515 нм больше, чем для 1030 нм при одинаковой энергии импульса (в диапазоне 10-100 нДж), а при большей энергии поглощение не зависит от длины волны. При этом размер области модификации меньше для 1030 нм из-за более высокой степени нелинейности. Показано, что использование импульсов с асимметричной временной формой приводит к лучшей по сравнению с симметричными импульсами локализации области поглощения в процессе фемтосекундной модификации.
2. Продемонстрирована возможность записи длиннопериодных волоконных решеток в нефоточувствительных световодах фс излучением с ограниченным щелью пучком. За счет более равномерной модификации показателя преломления внутри сердцевины волокна данный метод

позволяет записать длиннопериодные волоконные решетки с нерезонансными потерями $\leq 0,2$ дБ, при этом амплитуда резонансного пика заметно выше, чем в случае записи пучком с гауссовым профилем. Также показано, что амплитуду пика длиннопериодной волоконной решетки можно увеличить посредством многократной записи (>18 дБ).

3. Реализована поточечная запись волоконных брэгговских решеток 2-го порядка фемтосекундным излучением с длиной волны 1026 нм через защитное пластиковое покрытие германо-силикатного волоконного световода (SMP1500-9/125-P) и волоконного световода с чисто кварцевой сердцевиной (SMP1500SC-9/125-P). Показано, что данный метод позволяет также записывать однородные и суперструктурированные волоконные брэгговские решетки 1-го порядка через защитное покрытие, в том числе полиимидное. Теоретические расчеты спектров согласуются с полученными экспериментальными результатами.
4. Обнаружена зависимость поворота штрихов решеток на поверхности никеля относительно направления поляризации излучения от расстояния между треками и направления движения пучка в смежных треках. Продемонстрировано формирование двумерных периодических решеток при двойном проходе лазерного пучка по одной и той же траектории, но с небольшой разницей в направлении поляризации излучения между проходами.
5. Показано, что формирование периодических структур на пленках титана при острой фокусировке фс излучения происходит различным образом и с различным качеством при движении вдоль направления поляризации излучения и в поперечном направлении. При этом в первом случае образуются высокоупорядоченные термохимические решетки, а во втором - решетки имеют неоднородную структуру со слабовыраженной периодичностью и переменным знаком изменения высоты рельефа по отношению к исходному, что может быть объяснено одновременным действием абляционного и термохимического механизмов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- A1. Dostovalov A. V., Babin S.A., Dubov M., Varegheh M. and Mezentsev V. Comparative numerical study of energy deposition in femtosecond laser microfabrication with fundamental and second harmonics of Yb-doped laser // *Laser Phys.* - 2012. - Т. 22. - № 5 . - С. 930–936.
- A2. Достовалов А.В., Вольф А.А., Бабин С.А., и др. Численное исследование влияния временной формы импульса на модификацию плавленого кварца фемтосекундными импульсами // *Квантовая электроника.* - 2012. - Т. 9. - № 42 . - С. 799–804.
- A3. Достовалов А.В., Корольков В.П., Голубцов С.К., и др. Особенности формирования самоиндуцированных решеток на металлических фольгах при сканировании острорасфокусированным фемтосекундным лазерным пучком // *Квантовая электроника.* - 2014. - Т. 44. - № 4 . - С. 330–334.
- A4. Dostovalov A. V., Korolkov V.P., Babin S.A. Simultaneous formation of weakly and highly ordered laser-induced periodic surface structures on Ti film at femtosecond irradiation // *Laser Phys. Lett.* - 2015 . – Т. 12. - № 3 . - С. 036101 1–6
- A5. Dostovalov A., Babin S., Varegheh M., и др. Comparative numerical study of efficiency of energy deposition in femtosecond microfabrication with fundamental and second harmonics of Yb-doped fiber laser // *Proc. SPIE.* - 2011. - Т. 7914. - № 791432 . - С. 1–6.
- A6. Dostovalov A. V, Babin S.A., Wolf A.A., и др. Laser pulse shaping in femtosecond inscription in fused silica // 15th International Conference «Laser Optics 2012» (Saint Petersburg, June 25-29, 2012), 2012. - p. ThR5–26.
- A7. Dostovalov A. V., Wolf A.A., Babin S.A. Fabrication of long-period fiber gratings with 1026 nm femtosecond radiation using slit beam shaping method // *Fundamentals of Laser Assisted Micro – & Nanotechnologies* (Saint Petersburg, June 24-28, 2013), 2013. - p. PS1–35.
- A8. Dostovalov A. V, Babin S.A., Korolkov V.P., и др. Comparative analysis of LIPSS formed on Ni surface with IR and green fs lasers // *Fundamentals of Laser Assisted Micro – & Nanotechnologies* (Saint Petersburg, June 24-28, 2013), 2013. - p. PS1–36.
- A9. Dostovalov A. V., Wolf A.A., Babin S.A., и др. Femtosecond laser writing of Bragg and long-period fiber gratings at the wavelengths of 1026 and 513 nm //

23th International Laser Physics Workshop (Sofia, July 14-18, 2014), 2014, p.8.2.3

- A10. Достовалов А.В., Вольф А.А., Дубов М.В., Мезенцев В.К., Бабин С.А. Запись длиннопериодных и брэгговских волоконных решеток фемтосекундным излучением с длиной волны 1026 и 513 нм // Материалы российского семинара по волоконным лазерам, Новосибирск, 2014. С. 117-118.

Список цитируемых работ

1. Gattass R.R., Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials // *Nat. Photonics*. - 2008. - Т. 2. - № 4 . - С. 219–225.
2. Kondo Y., Nouchi K., Mitsuyu T., и др. Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses // *Opt. Lett.* - 1999. - Т. 24. - № 10 . - С. 646–648.
3. Martinez A., Dubov M., Khrushchev I., and Bennion I. Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser // *Electron. Lett.* – 2004. – Т. 40. - № 19. – С. 19–20.
5. Ams M., Marshall G.D., Withford M.J. Study of the influence of femtosecond laser polarisation on direct writing of waveguides // *Opt. Express*. - 2006. - Т. 14. - № 26 . - С. 13158–13163.
6. Zhang N., Yang J.-J., Wang M., и др. Fabrication of Long-Period Fibre Gratings Using 800 nm Femtosecond Laser Pulses // *Chin. Phys. Lett.* - 2006. - Т. 23. - № 12 . - С. 3281–3284.
7. Vorobyev A.Y., Guo C. Direct femtosecond laser surface nano/microstructuring and its applications // *Laser Photon. Rev.* - 2012. - Т. 7. - № 3 . - С. 385–407.
8. Öktem B., Pavlov I., Ilday S., и др. Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femtosecond pulses // *Nat. Photonics*. - 2013. - Т. 7. - № 11 . - С. 897–901.
9. Feit M., Fleck J. Effect of refraction on spot size dependence of laser-induced breakdown // *Appl. Phys. Lett.* - 1974. - Т. 24. - № 4 . - С. 4–7.