

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Института лазерной

физики Сибирского отделения
Российской академии наук,
академик



С.Н. Багаев

марта 2015 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Достовалова Александра Владимировича «Создание периодических структур фемтосекундным излучением внутри световодов и на поверхности металлов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

В настоящее время для решения принципиально новых научных и технологических задач широко используется фемтосекундное лазерное излучение. Одной из важнейших особенностей этого излучения является короткая длительность и высокая напряженность электрического поля в лазерном импульсе, позволяющие не только исследовать различные процессы с высоким временным и пространственным разрешением, но и создавать экстремальные состояния вещества и осуществлять микрообработку твердотельных сред: диэлектриков, полупроводников и металлов.

Особо следует отметить фемтосекундную модификацию структуры оптически прозрачных сред, приводящую к изменению показателя преломления, и применение данного процесса для разработки технологий создания известных и новых оптических элементов. Наряду с этим актуальным является также поверхностная модификация оптически непрозрачных сред и материалов и создание лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИПС), изучение которых важно для понимания механизма их образования и практического применения.

Диссертационная работа А.В. Достовалова посвящена разработке методов создания фемтосекундным излучением периодических структур внутри волоконных световодов и на поверхности металлов. Выполнено расчетно-теоретическое изучение процесса модификации фемтосекундным излучением световодов из плавленого кварца; экспериментально исследована запись этим излучением в волоконных световодах длиннопериодных и брегговских решеток и формирование самоориентирующихся поверхностных решеток на поверхности металлов: никеля и титана.

Основное содержание диссертации изложено в пяти главах.

В глава 1 дается описание физических процессов, лежащих в основе взаимодействия фемтосекундного излучения с материальными средами и фемтосекундной модификации оптически прозрачных диэлектриков и металлов.

В главе 2 представлено численное моделирование процесса образования каналов в плавленом кварце при филаментации фемтосекундных импульсов иттербиевого лазера и его второй гармоники. Показано, что эффективность поглощения излучения при фемтосекундной лазерной объемной модификации плавленого кварца для второй гармоники выше, чем для основного излучения, а размер области модификации меньше при длине волны 1030 нм из-за более высокой степени нелинейности процесса модификации. Исследовано влияние дисперсии третьего порядка на процесс образования каналов при филаментации лазерного излучения с длиной волны 800 нм. Показано, что при ненулевой дисперсии увеличивается плотность плазмы в области модификации.

В главе 3 представлены исследования записи длиннопериодных волоконных решеток (ДПВР) показателя преломления в телекоммуникационном световоде SMF-28e+ с помощью фемтосекундного излучения с длиной волны 1026 нм методом компенсации асимметрии поперечного сечения волноводов при фокусировке пучка с несимметричным поперечным сечением, образованным щелью. Показано, что за счет более равномерной модификации внутри сердцевины волокна данная схема позволяет записать ДПВР с нерезонансными потерями менее 0,2 дБ при амплитуде резонансного пика выше, чем в случае записи пучком с гауссовым профилем.

Глава 4 посвящена разработке метода создания волоконных брэгговских решеток (ВБР) показателя преломления первого и второго порядка фемтосекундным излучением с длиной волны 1026 нм через полиимидное защитное покрытие в волоконных световодах с легированной сердцевиной и чисто кварцевой сердцевиной. Показано, что у ВБР второго порядка амплитуда пика отражения составила 86,5% со спектральной шириной 0,18 нм. При этом решетки, полученные данным методом, имеют температурную стойкость до 350 °С и предел прочности по растяжению в 2 раза выше по сравнению с ВБР, записанными со снятием оболочки.

В главе 5 представлены исследования особенностей формирования лазерно-индуцированных периодических структур (ЛИПС) на поверхности металлов: никеля и титана. С помощью основной и второй гармоники фемтосекундного иттербиевого лазера подтверждена интерференционная природа образования ЛИПС. Показано, что наблюдаемый поворот штрихов решеток ЛИПС относительно направления поляризации излучения зависит от расстояния между треками записи 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.

К наиболее значимым результатам диссертационной работы можно отнести следующее:

1. Развитие методики записи длиннопериодных волоконных решеток в нефоточувствительных световодах фемтосекундным излучением ближнего ИК диапазона с длиной волны 1026 нм с ограниченным щелью пучком, которая понижает нерезонансные потери решеток до 0,2 дБ.

2. Разработка метода поточечной записи волоконных брэгговских решеток показателя преломления первого и второго порядка фемтосекундным излучением через полиимидное защитное покрытие волоконных световодов и результаты их исследования, в том числе при высоких температурах.

3. Экспериментальное обнаружение поворота штрихов периодических структур, сформированных при облучении фемтосекундным излучением поверхности никеля, относительно направления поляризации излучения в зависимости от расстояния между треками и направления движения пучка в смежных треках и формирование двумерных периодических структур.

4. Экспериментальное обнаружение формирования фемтосекундным излучением на поверхности титана различных по качеству упорядоченных периодических решеток при направлении движения фемтосекундного луча вдоль или поперек направления поляризации фемтосекундного излучения.

К замечаниям по диссертации необходимо отнести следующее:

1. В расчетной модели (глава 2) дисперсия плавленого кварца учитывается только до второго порядка для импульсов длительностью 250 фс на центральной длине волны 1030 нм и 50 фс на центральной длине волны 800 нм. Если влияние последующих порядков дисперсии слабое, автору необходимо обосновать это приближение (особенно для импульсов с центральной длиной волны 1030 нм, так как область нулевой дисперсии k_2 в плавленом кварце $1000 < \lambda_{k_2} < 1500$ нм). В работе на аналогичную тему были использованы более высокие порядки [Couairon A., Sudrie L., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A. Filamentation and damage in fused silica induced by tightly focused femtosecond laser pulses //Physical Review B. – 2005. – Т. 71. – №. 12. – С. 125435].

2. В модели расчета нет учета рамановского отклика в плавленом кварце, которое может изменить фокусировку фемтосекундных импульсов.

3. Несмотря на то, что в первой главе автор декларирует, что в расчетах будут использоваться и туннельная, и многофотонная ионизации (модель Келдыша), при моделировании (глава 2) рассматривается только многофотонная ионизация. Как показано в работе, ссылка на которую приведена в предыдущем пункте замечаний, в такой ситуации скорость многофотонной ионизации может измениться на четыре порядка при вариации пиковой интенсивности от 10^{12} до $5 \cdot 10^{13}$ Вт/см².

4. При моделировании филаментации (глава 2) в уравнении для плазмы пренебрегается членом, связанным с электронной рекомбинацией, характерное время которой в плавленом кварце составляет величину менее 150 фс. Поэтому для импульсов длительностью 250 фс релаксационный член следует учитывать, так как он может изменить ход филаментации заднего фронта импульса, особенно в случае импульса с дисперсией третьего порядка, который анализируется в разделе 2.2.

5. В главе 2 (раздел 2.2) проведено численное моделирование влияния модификации плавленого кварца фемтосекундным импульсом длительностью 50 фс с центральной длиной волны 800 нм и с асимметричной временной формой (дисперсия третьего порядка). Результаты моделирования, представленные на рисунках 2.2, 2.3, 2.7, 2.8, показывают, что в некоторых случаях плотность плазмы превышает критическую величину и, таким образом, результаты моделирования при достижении критической плотности не являются верными. Можно предположить, что код численного моделирования реализован некорректно.

6. В главе 2 на рис. 2.10, по-видимому, представлены сценарии развития множественной филаментации. В этом случае расчет в цилиндрической симметрии дает неверные результаты.

7. Глава 3, стр.69, последняя строка. Некорректная фраза: «...продемонстрировано улучшение характеристик создаваемых решеток за счет применения предложенного метода записи». Метод компенсации асимметрии поперечного сечения волноводов при фокусировке пучка с несимметричным поперечным сечением, образованным щелью, был предложен другими исследователями, на что указывает автор в главе 1, [6]. Автор диссертации использовал и исследовал данный метод для записи длиннопериодных решеток в волоконных световодах.

8. Глава 4, раздел 4.1. Не описаны экспериментальные условия проведения высокотемпературных исследований полученных брегговских решеток и не указаны точности поддержания температур в процессе экспериментальных исследований.

9. В главе 5, разделе 5.1. Нет описания процедуры измерения углов поворота периодических структур на поверхности никеля, и программы обработки экспериментальных данных, представленных на рисунках 5.3;5.4. На графиках рисунка 5.5 отсутствует разброс экспериментальных значений.

10. В главе 5, разделе 5.2. Показано, что при острой фокусировке фемтосекундного излучения формирование периодических структур на пленках титана происходит различным образом и с разным качеством при движении вдоль направления поляризации излучения и в поперечном направлении. При этом в первом случае образуются высокоупорядоченные термохимические решётки, а во втором - решётки имеют неоднородную структуру со слабовыраженной периодичностью и переменным знаком изменения высоты рельефа по отношению к исходному, что предположительно объяснено конкуренцией абляционного и термохимического механизмов. Но в экспериментах на пленках хрома периодическая структура высокого качества была получена именно при использовании поляризации, перпендикулярной направлению движения луча фемтосекундного излучения (ссылка в диссертации на работу [119]). По-видимому, вопрос о механизмах образования периодических решеток на пленках титана требует более детального анализа.

11. Четвертое защищаемое положение требует уточнения, так как из его формулировки следует вывод, что данное утверждение применимо к любым средам, хотя в диссертации по этому положению речь идет только о металлах: никеле и титане.

12. Несколько замечаний по тексту:

- не приведены ссылки на источники данных, приведенных в таблице 2.1, стр.49;
- значения критической плотности плазмы в таблице 2.1 “занижены на 54 порядка” (должно быть 10^{27} м^{-3} , а не 10^{-27} м^{-3} , опечатка);
- в формуле на стр.50 энергия импульса указана с точностью до 2л;
- в тексте стр. 8 без объяснения смысла введен термин - «серые потери».

Однако отмеченные замечания не снижают значимости диссертационной работы А.В. Достовалова. Диссертация представляет собой цельное научное исследование, содержащее решение актуальных научных задач. Она представляет также значительный интерес для развития различных приложений. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК. Автореферат правильно отражает ее содержание. Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается апробацией их на многочисленных конференциях и семинарах и публикациями в рецензируемых научных журналах.

Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы в исследованиях и разработках оптических элементов, сенсоров и лазерных систем различного назначения в НГУ, ИФП СО РАН, ИЛФ СО РАН, МГУ, ИОФ РАН, ФИАН, ИПЛИТ РАН, ООО «НТО «ИРЭ-Полюс», ООО «Авеста Проект» и других учреждениях и предприятиях.

Доклад А.В. Достовалова по материалам диссертационной работы был заслушан и обсужден на семинаре ИЛФ СО РАН 13 марта 2015 года.

Диссертационная работа А.В. Достовалова «Создание периодических структур фемтосекундным излучением внутри световодов и на поверхности металлов», отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения научным и научно-педагогическим работникам ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 –оптика.

Заведующий лабораторией ИЛФ СО РАН,
кандидат физ.-мат.наук

Е.В. Пестряков

Секретарь семинара ИЛФ СО РАН,
кандидат физ.-мат.наук

В.В. Петров

13 марта 2015 г.