

Отзыв

Официального оппонента на диссертацию Дьяконова Иван Викторовича «Интегральные оптические структуры для задач линейно-оптических квантовых вычислений», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 «Лазерная физика»

В диссертационной работе Дьяконова И. В. представлены результаты по разработке методов создания и проектирования оптических систем, предназначенных для линейно-оптических вычислений с применением квантовых состояний света. Работа содержит четыре главы, из которых одна глава посвящена изложению вводной и обзорной информации и три главы описывают оригинальные результаты.

В **первой главе** автор излагает необходимые базовые сведения о линейно-оптических квантовых вычислениях и приводит краткий обзор литературы по теме технологий для создания интегрально-оптических компонентов. На основе информации во вводной части о линейно-оптических квантовых вычислениях делается вывод об основных критериях интегрально-оптических систем, предназначенных для решения задач в этой области. Обзор литературы охватывает принципы изготовления интегральной оптики с помощью литографической технологии и с помощью метода фемтосекундной лазерной записи.

Во **второй главе** описаны детали экспериментальной установки, реализующей метод фемтосекундной лазерной записи, и приведены результаты экспериментов по созданию одномодовых интегрально-оптических волноводов и направленных делителей, осуществляющих разделение поляризационных состояний света.

В **третьей главе** автор приводит описание процесса создания термооптически перестраиваемых интегральных интерферометров и результаты работы по созданию четырехпортового универсального интерферометра.

В **четвертой главе** приведены результаты разработки численной процедуры поиска конфигурации линейно-оптического интерферометра, выполняющего приготовление заданного квантового состояния с наиболее высокой вероятностью успеха.

Актуальность выбранной темы

Актуальность работы подтверждается растущим объемом исследований коммерческих предложений в области квантовых вычислений. Основным техническим препятствием в построении квантового компьютера является декогеренция, то есть случайное разрушение квантового состояния. Реализация квантовых вычислений на основе фоковских состояний света является одним из наиболее перспективных направлений поскольку фотоны отличаются слабым взаимодействием с окружающей средой, и поэтому фотонные фоковские состояния проще сохраняются. В частности, для гипотетического квантового фотонного компьютера не требуется охлаждения до криогенных температур.

Фотонный квантовый компьютер состоит из оптических чипов, то есть системы волноводных интерферометров. В основе технологии оптических чипов лежит литография – дорогой и многостадийный процесс. Поэтому весьма привлекательно применить для моделирования

оптических кантовых чипов значительно более дешёвую и гибкую технологию формирования волноводных интерферометров – прямую лазерную запись пучком фемтосекундного лазера.

Степень обоснованности положений, выносимых на защиту, и выводов работы

Положения, выносимые на защиту, и выводы диссертации обоснованы высоким техническим уровнем экспериментов, проведенных автором, и глубокими знаниями диссертанта современной теории квантовых алгоритмов.

Достоверность и новизна результатов

Автор проделал большой систематический объем работ по созданию оптических чипов на основе стекол по технологии прямой лазерной записи пучком фемтосекундного лазера. Экспериментальная установка для записи чипов выполнена на высоком уровне, соответствующем лучшим мировым образцам. Ввиду длительности процесса записи одного чипа автор уделил достойное внимание стабильности процесса записи и воспроизводимости результатов. Проведены исследования по выбору оптимального режима записи. Изготовленные оптические чипы соответствующим образом характеризованы.

Новизна результатов диссертации заключается в следующем

1. Разработаны методы изготовления пассивных и реконфигурируемых интегрально-оптических структур с использованием метода прямой лазерной записи, применимых для экспериментов по реализации линейно-оптических квантовых вычислений.
2. Построена экспериментальная установка для стабильной долговременной лазерной записи одномодовых интегрально-оптических волноводов с низкими оптическими потерями в многопроходном режиме.
3. Реализован режим записи одномодовых оптических волноводов с низкой анизотропией и достигнут режим сильной эванесцентной связи между волноводами, записанными методом прямой лазерной записи.
4. С помощью технологии фемтосекундной лазерной печати реализован интегрально-оптический реконфигурируемый интерферометр с универсальной архитектурой Клемента.
5. Разработана численная процедура для поиска конфигурации линейнооптического интерферометра, обеспечивающее приготовление заданного выходного состояния с оповещением с максимальной вероятностью.

Замечания

Глава 1

- 1) «Лазерная печать» - не общепринятый термин. В англоязычной литературе используется «Direct laser writing», что переводится как «прямая лазерная запись». Иногда используется вместо «writing» слово «inscription», но не «printing». Этому есть исторические основания. Термин «печать» предполагает мгновенное появление заранее подготовленного символа на носителе (информации), тогда как при лазерной модификации, этот процесс растянут во времени, аналогично, как при записи пером.
- 2) Ошибка в формуле (1.2) – отсутствует квадратный корень. Стр.24. Условие $V \gg 1$ для многомодовости чрезмерно. Для ступенчатого профиля показателя преломления световода уже при $V > 2.405$ появляются высшие собственные моды.

- 3) Стр.24. Создание волноводов возможно и с помощью технологии понижения показателя преломления, не только повышения.
- 4) Стр.28. Нелинейное поглощение (в частности, многофотонное) не имеет пороговой природы, но лазерная модификация имеет.
- 5) Напряженности электрического поля 10^9 В/м соответствует интенсивность 5×10^{16} Вт/м², а не 5×10^{20} Вт/м².
- 6) Цитирование. Стр.29. [58] – не первая работа, в которой была продемонстрирована запись в плавном кварце. Первая – [57]. [55] – не первая работа по записи волноводов в кристаллических материалах. Первая - S. Nolte, M. Will, B. N. Chichkov, and A. Tunnermann, "Waveguides produced by ultra-short laser pulses inside glasses and crystals," Proceeding SPIE, Phot. Process. Microelectron. PHOTONICS 4637, 188–196 (2002). Подпись под Рис.1.4. Ссылка в квадратных скобках не поставлена.
- 7) Стр.29. Неверно утверждение, что в случае записи оболочки волновода, светоделительные элементы получаются слишком длинные. Например, можно просто слить волноводы в Y-делителе, и длина участка связи получается нулевая. То есть первым типом модификации делители не ограничиваются. [S. Ringleb, K. Rademaker, S. Nolte, and A. Tünnermann, "Monolithically integrated optical frequency converter and amplitude modulator in LiNbO₃ fabricated by femtosecond laser pulses," Appl. Phys. B Lasers Opt. 102, 59–63 (2011).; Y. Liao, J. Xu, H. Sun, J. Song, X. Wang, and Y. Cheng, "Fabrication of microelectrodes deeply embedded in LiNbO₃ using a femtosecond laser," Appl. Surf. Sci. 254, 7018–7021 (2008)].
- 8) Стр.31. Накопительный характер модификации (обработки) - не есть отличительная черта режиме записи с высокой частотой повторения лазерных импульсов, накопление не обязательно тепла) происходит и при низких частотах (например накопление изменения показателя преломления). Главное в режиме модификации при высокой частоте повторения - высокая средняя температура, которая уменьшает вязкость стекла.
- 9) При лазерной фемтосекундной обработке объемных образцов мы имеем дело только с одной aberrацией - сферической. Она вызвана прохождением пучка плоской границы раздела образца и воздуха.
- 10) Стр. 32. Утверждение о низкой устойчивости к лазерному излучению объективов с коррекцией сферической aberrации может справедливо, если заниматься, например, резкой стекла. Но при записи волноводов в стеклах требуемая энергия импульса значительно ниже оптического пробоя.

Глава 2.

- 11) Стр.40. Формирование формы профиля волновода. При использовании спектроскопической щели контролируется не пространственное распределение фазы, а пространственное распределение амплитуды поля. А между тем это тоже стандартный способ. Стр.43. Верно отмечено, что на практике ширина щели подбирается эмпирически, но следовало бы указать причину (сложно учесть в расчетах нелинейность поглощения).
- 12) В параграфе про создание одномодовых волноводов сразу предлагается многопроходовая схема записи без обоснования в ее необходимости.
- 13) Стр.47. Следует указать, что для измерения профиля изменения показателя преломления еще используется метод QPm (Quantitative phase microscopy).
- 14) Формулы (2.2) и (2.3). Отсутствует расшифровка параметров/переменных "a" и "b".
- 15) Стр.51. Отсутствует обоснование выбора плавного кварца в качестве подложки. Почему он выбран? Например, изменение показателя в нем заметно ниже, чем в многокомпонентных стеклах.

- 16) Стр.51. Почему при направлении поляризации вдоль оси волновода получают максимально однородную структуру? Были сделаны тестовые записи? Почему проводилась запись волновода за один проход и не было дополнительной оптики для формирования профиля пучка?
- 17) Стр.52. В диссертации отсутствует раздел про теорию связанных мод, на который идет отсылка. Этот раздел действительно нужен.
- 18) Стр.53. Почему даже приблизительное выполнение равенства (2.4) обеспечивает высокую экстинкцию? Насколько приблизительное? Стр57. Не указано для какого делителя (его параметры) измерена экстинкция, и насколько хорошо выполнялось при этом равенство (2.4)
- 19) Оформление. Рис.2.3. Не указан режим микроскопа при съемке фотографий торцов волноводов. Как изменяется знак изменения показателя по сечению? При каких энергиях импульса записаны волноводы? Рис.2.7. Отсутствует нумерация портов делителя. Рис.2.8. Для сравнения следовало бы привести фото профиля волновода с высокой анизотропией. Рис.2.9. Следовало бы представить на осях графиков и символическое представление измеренных величин. Рис.3.2а. Следовало бы пояснить функции слоев чипа.

Глава 3.

- 20) Стр.69. Минимальная глубина залега ограничивается (снизу) не TTV, а плоскостностью поверхности, через которую проводится запись.
- 21) Стр.76. Было бы полезно провести численное моделирование тепловой релаксации, хотя бы для упрощенной модели – одного прямого волновода. Тем самым были бы оценены характерные временные параметры релаксации.
- 22) Рис.3.3. Рисунки б) и в) не позволяют оценить, насколько велик вклад теплового воздействия. Следовало бы также указать мощность на входе в волновод и максимально возможную мощность на выходе. Следует наложить импульс тока на рис а). На этом рисунке не оптическая мощность, как написано в тексте, а фазовый сдвиг!

Замечания по терминологии

Стр.28. «импульсный лазерный пучок» - не верное словосочетание. Верно «пучок фемтосекундного лазера». Стр. 45. «Протяженные дефекты» уместнее было бы назвать «треками измененного показателя преломления». Стр.46. Термин «потери при пропускании света» двусмысленный. В данном месте, по-видимому, нужно сказать «потери на распространение». Стр.47. «Пространственно одномодовый режим». Какой смысл в дополнении «пространственно»? Стр.53. Следует ввести понятие «экстинкции». Стр.73. Утверждать, что длина взаимодействия равна нулю неправильно. На кривых участках взаимодействие тоже происходит. Правильнее было бы сказать, что длина прямолинейного участка была нулевой. Стр.76. Что понимается под «стабильным режимом» переключения?

Встречаются нелитературные термины(жаргонные), хотя иногда и используемые в повседневном общении, и которые вполне можно заменить на литературные русские слова. Например:

- 1) «Фиделити» - жаргон, нужно заменить словом из русского языка.
- 2) Стр.26.,66 «Фабрикация»
- 3) Стр.51. «Субстрат» - жаргон (в русском языке - подложка).
- 4) «Цифровой фотодиод» - жаргон. Очевидно, он был подключен к компаратору?

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту

специальности 1.3.19 – «лазерная физика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Дьяконов Иван Викторович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «лазерная физика».

Официальный оппонент:

Охримчук Андрей Гордеевич, кандидат физ.-мат. наук по специальности 01.04.21 «Лазерная физика», заведующий лабораторией спектроскопии обособленного подразделения НЦВО ИОФ РАН.

Электронная почта: okhrim@fo.gpi.ru

Рабочий телефон: +7 499 783-5621

_____/Охримчук А. Г./

Дата: 10/11/2022

Подпись А. Г. Охримчука удостоверяю:

ВРИО ученого секретаря

д.ф.-м.н. В.В.Глушков