

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Дьяконов Иван Викторович

**Интегральные оптические структуры для задач
линейно-оптических квантовых вычислений**

Специальность 1.3.19 —
«Лазерная физика»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена на кафедре квантовой электроники физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Кулик Сергей Павлович

Официальные оппоненты: **Гольцман Григорий Наумович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБОУ ВО "Московский педагогический государственный университет
заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики

Биленко Игорь Антонович,
доктор физико-математических наук, доцент,
Кафедра физики колебаний физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,
профессор

Охримчук Андрей Гордеевич,
кандидат физико-математических наук,
ИОФ РАН, обособленное подразделение
НЦВО РАН,
заведующий лабораторией спектроскопии

Защита состоится 17 ноября 2022 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета МГУ.013.4 Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу: 119992, Москва, ул. Академика Хохлова, дом 1, Корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова. E-mail: diss.sov.31@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА» по ссылке <https://istina.msu.ru/dissertations/496387372/>.

Автореферат разослан ____ октября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МГУ.013.4,
к. ф.-м. н.

Коновко Андрей Андреевич

Общая характеристика работы

Современный прогресс в области экспериментального создания квантовых вычислительных систем ускоряет развитие соответствующих технологических подходов, задействуемых в процессе изготовления отдельных элементов квантовых систем. Одним из наиболее перспективных подходов в настоящий момент является линейно-оптическая платформа [1]. В этой системе физическими носителями квантовой информации являются одиночные фотоны, а преобразования квантовых состояний света осуществляются с помощью линейных оптических интерферометров - устройств, состоящих из светоделительных и фазовращательных элементов. Несмотря на возникающие в силу особенностей физической реализации проблемы - вероятностные двухкубитные гейты, разрушающие измерения кубитов, потеря кубитов - разработан способ формирования устойчивого к ошибкам линейно-оптического квантового компьютера [2].

Преобразователи квантовых состояний наиболее удобно создавать, пользуясь технологиями изготовления интегрально-оптических компонентов. В основе интегрально-оптических технологий лежит принцип волноводного распространения оптического излучения в среде: свет распространяется вдоль области с повышенным показателем преломления относительно величины показателя преломления окружающего вещества. Наиболее развитым подходом к созданию таких элементов в настоящее время является литографический комплекс технологий. Инструменты литографии позволяют формировать волноводные элементы сложной формы, используя разнообразные материалы, что позволяет добиться высокой степени миниатюризации создаваемых интегральных схем. Единственными недостатками этого подхода является высокая стоимость и сложность изготовления интегральных оптических структур. По этим причинам получила развитие более простая и дешевая технология, обеспечивающая возможность быстрого прототипирования интегральной оптики - фемтосекундная лазерная печать [3]. В основе технологии лежит принцип локальной модификации показателя преломления вещества посредством его облучения жестко сфокусированными фемтосекундными лазерными импульсами. Реализовать такую технологию можно в стенах стандартной оптической лаборатории, что позволяет крайне быстро изготавливать интегрально-оптические устройства для экспериментальных задач. Преимуществами данной технологии является возможность использования для создания волноводов любого материала оптически прозрачного в диапазоне длин волн генерации обрабатывающего лазера, а также способность создавать волноводные структуры с трехмерной геометрией.

Интегральные оптические схемы сравнительно недавно нашли применение в квантовой оптике. С помощью схемы, созданных по технологии

литографии, были продемонстрированы двухкубитные квантовые операции [4], реализации алгоритмов квантовых вычислений [5], квантовые случайные блуждания [6] и множество других экспериментов. Оптические схемы, созданные о технологии фемтосекундной лазерной печати, оказалась подходящими для выполнения операций над поляризационными состояниями фотонов, что крайне сложно реализуется в литографических схемах. В основном, это связано с существенно разным уровнем оптических потерь на распространение для волноводных мод ТЕ и ТМ типа. Фемтосекундная лазерная печать позволяет создавать волноводы не чувствительные к поляризации излучения и, следовательно, способные обрабатывать поляризационные состояния света без внесения существенных искажений. Кроме того, в технологии фемтосекундной лазерной печати присутствует возможность контроля степени анизотропии волновода, благодаря чему удастся создавать компоненты для точного преобразования поляризационных состояний света. С помощью чипов, изготовленных по технологии фемтосекундной лазерной печати, были продемонстрированы базовые одно- и двухкубитные квантовые операции в поляризационном базисе [7]. Помимо преимуществ в обработке поляризационных состояний фемтосекундная лазерная печать пригодна для создания оптических систем с низкими потерями и высокой размерностью, что помогло впервые продемонстрировать бозонный сэмплинг в эксперименте [8].

Цель диссертационной работы состоит в разработке экспериментальных методов изготовления реконфигурируемых интегрально-оптических структур с характеристиками, отвечающими требованиям современных экспериментов по реализации алгоритмов квантовых вычислений на линейно-оптической платформе, и созданию методов проектирования структуры оптических интерферометров для реализации заданных квантовых преобразований оптических кубитов. Основные критерии пригодности интегрально-оптических систем включают низкие потери на распространение, высокую точность и реализации заданных унитарных преобразований на оптических модами и возможность реконфигурации интегрально-оптического чипа. В диссертации рассматриваются методы достижения приемлемых характеристик интегрально-оптических структур в рамках трех озвученных критериев, пользуясь технологией фемтосекундной лазерной печати.

В рамках поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

- Исследование режимов формирования одномодовых в ближнем инфракрасном диапазоне волноводных структур в объеме оптического стекла посредством метода фемтосекундной лазерной печати.

- Создание поляризационно-чувствительных интегрально-оптических компонентов методом фемтосекундной лазерной печати в плавленом кварце.
- Создание реконфигурируемых интегрально-оптических интерферометров и исследование методов их прецизионной настройки.
- Исследование алгоритмов поиска оптимальных линейно-оптических преобразований, обеспечивающих максимальную вероятность успешного срабатывания, и проектирование оптимальной схемы приготовления трехфотонного состояния Гринбергера-Хорна-Цайлингера.

Объектом исследования являются интегрально-оптические структуры, создаваемые в прозрачных диэлектрических материалах методом фемтосекундной лазерной печати. **Предметом исследования** являются способы формирования интегральных оптических схем, пригодных для экспериментов по реализации линейно-оптических квантовых вычислений, и численные методы поиска оптимизированных конфигураций линейно-оптических квантовых операций, адаптированных под реализацию с помощью интегрально-оптических компонентов.

Актуальность работы обусловлена как фундаментальным интересом к новым методам создания реконфигурируемой интегральной оптики, так и возможностью практического применения результатов исследований к задачам реализации алгоритмов квантовых вычислений с помощью одиночных фотонов и реконфигурируемых интегрально-оптических структур.

Научная новизна заключается в следующих положениях:

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

Степень разработанности является достаточно высокой, поскольку исследования фундаментального и прикладного характером в области

микромодификации оптических диэлектрических материалов активно ведутся с начала 1990х годов. Метод фемтосекундной лазерной печати является распространенным способом формирования волноводных структур внутри оптических материалов различной природы: аморфных материалов, кристаллических материалов, полимерных материалов и многих других. Однако, этот метод в основном применялся для создания пассивных интегральных структур. Работа, выполненная в данной диссертации, нацелена на исследование методов создания реконфигурируемых интегрально-оптических устройств с большим количеством перестраиваемых компонентов, а также уделяет внимание аспекта прецизионного проектирования интегрально-оптических компонентов с учетом требований современных квантово-оптических экспериментов.

Научная и практическая значимость заключается в возможном использовании разработанных методов создания интегрально-оптических систем и методов поиска оптимальных линейно-оптических преобразований для решения задач реализации алгоритмов квантовых вычислений с помощью линейно-оптической платформы.

Методология диссертационного исследования основана на широко распространенных и проверенных методах проведения экспериментальных работ и выполнения численного эксперимента. Создание волноводных структур выполнялось по методу фемтосекундной лазерной печати, обширно применяемому для записи волноводных структур в объеме прозрачных диэлектрических материалов. Измерение оптических потерь на пропускание и сопряжение выполнялось с использованием cut-back метода, являющимся стандартным способом оценки такого типа потерь в интегрально-оптических структурах. Тестирование многопортовых интегрально-оптических компонентов выполнялось с помощью общепринятых методов сопряжения интегрально-оптических структур с помощью массивов волокон и управления нагревательными элементами термооптических модуляторов посредством приложения постоянного тока. Численный эксперимент проводился с использованием известной оптимизационной процедуры Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Технология фемтосекундной лазерной печати пригодна для записи одномодовых интегрально-оптических волноводов в многопроходном режиме с оптическими потерями 0.86 дБ/см и потерями на сопряжение с внешним одномодовым оптическим волокном 1.12 дБ для горизонтальной поляризации и 1.10 дБ для вертикальной поляризации.
2. Технология фемтосекундной лазерной печати позволяет создавать одномодовых оптических волноводов с низкой анизотропией $\sim 10^{-6} \text{ мм}^{-1}$ и одновременно достигать высокой величины константой связи между волноводами 3 мм^{-1} , что обеспечивает условия для

создания компактного поляризационного делителя с длиной взаимодействия 3.7 мм, обеспечивающего коэффициент экстинкции 20 дБ для вертикальной поляризации и 16 дБ для горизонтальной поляризации.

3. Технология фемтосекундной лазерной печати позволяет создавать реконфигурируемый интегрально-оптический интерферометр с универсальной архитектурой Клементса, обеспечивающий среднюю фиделити генерации заданных выходных распределений мощности 0.9996 и рекордное на момент публикации время переключения интегрального термооптического модулятора, составившее 13 мс при включении и нагреве элемента и 10 мс при выключении и остывании.
4. Линейно-оптический интерферометр, состоящий из 10 мод, на вход которого подается 6 неразличимых фотонов, обеспечивает генерацию трехфотонных состояний Гринбергера-Хорна-Цайлингера без использования принципа связи с опережением с вероятностью $P = 1/54$, превышающей известные по литературным данным значения.

Достоверность результатов полученных в эксперименте обеспечена использованием современного измерительного и аналитического оборудования. Наблюдалась воспроизводимость режимов записи волноводных структур, а также экспериментально измеренных величин. Достоверность численных расчетов опирается на использование протестированных библиотек для численной оптимизации, а также аналитической проверкой полученных численным методом результатов.

Во всех опубликованных работах **личный вклад** автора является определяющим. Автор принимал активное участие в сборке и настройке установки для реализации метода фемтосекундной лазерной печати волноводных структур в прозрачных диэлектрических материалах. Им была проделана работа по определению оптимальных режимов записи волноводных структур для каждой из задач. Автором был реализован метод гравировки электрических резисторов и контактов на поверхности чипа с учетом совмещения с оптическими волноводными структурами внутри чипа. Автор принимал активное участие в постановке экспериментов по измерению характеристик записанных интегрально-оптических структур как оптическими методами, так и методами микроскопии. Автор принимал определяющее участие в получении экспериментальных данных и их анализе. В работе по поиску оптимального линейно-оптического преобразования для реализации трехфотонного состояния Гринбергера-Хорна-Цайлингера автором была поставлена задача, реализован первичный код для численного моделирования и получены субоптимальные результаты для конфигурации линейно-оптического преобразования. Также автор принимал активное участие в анализе данных, полученных другими участниками

работы. Автором была проведена значительная работа по составлению и редактированию текстов статей, ответу на вопросы рецензентов и переписке с редакциями журналов.

Апробация результатов работы проводилась на международных конференциях:

1. 24th Central European Workshop on Quantum Optics (CEWQO), Люнгбю, Дания, 2017 год,
2. International Conference on Integrated Quantum Photonics, Рим, Италия, 2017 год,
3. International Conference on Integrated Quantum Photonics, Париж, Франция, 2018 год,
4. Quantum technology international conference QTECH, Париж, Франция, 2018 год,

а также на семинарах кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова.

Основные результаты работы являются оригинальными и опубликованы в следующих статьях в изданиях, индексируемых в Web of Science:

1. **Low-loss single-mode integrated waveguides in soda-lime glass.** / I. Dyakonov, A. Kalinkin, M. Saygin, A. Abroskin, I. Radchenko, S. Straupe and S. Kulik. // Applied Physics B — 2016 — Т. 122 — № 9 — С. 1-7 (Impact factor (2021) 2.171, Web of Science)
2. **Laser-written polarizing directional coupler with reduced interaction length.** / I. V. Dyakonov, M. Yu. Saygin, I. V. Kondratyev, A. A. Kalinkin, S. S. Straupe and S. P. Kulik. // Optics letters — 2017 — Т. 42 — № 20 — С. 4231-4234 (Impact factor (2021) 3.560, Web of Science).
3. **Reconfigurable photonics on a glass chip.** / I. V. Dyakonov, I. A. Pogorelov, I. B. Bobrov, A. A. Kalinkin, S. S. Straupe, S. P. Kulik, P. V. Dyakonov and S. A. Evlashin. // Physical Review Applied — 2018 — Т. 10 — С. 044048 (Impact factor (2021) 4.931, Web of Science).
4. **Improved heralded schemes to generate entangled states from single photons.** / F. V. Gubarev, I. V. Dyakonov, M. Yu. Saygin, G. I. Struchalin, S. S. Straupe and S. P. Kulik. // Physical Review A — 2020 — Т. 102 — № 1 — С. 012604 (Impact factor (2021) 2.971, Web of Science).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из четырех глав и заключения. Полный объем диссертации **124** страницы текста с **28** рисунками и 4 таблицами. Список литературы содержит **118** наименований.

Содержание работы

Первая глава содержит обзор литературы, охватывающий области линейно-оптических квантовых вычислений и экспериментальной интегральной квантовой фотоники. В обзоре содержится вводная информация о принципах реализации квантовых алгоритмов с помощью одиночных фотонов и линейных оптических схем: описывается наиболее эффективный способ кодирования кубитов, метод реализации однокубитных операций и основные подходы к выполнению двухкубитных операций. В этой части обзора выделяются ключевые сложности технической реализации линейно-оптических квантовых устройств и подчеркивается необходимость оптимизации дизайна интерферометров в силу особенностей реализации многокубитных преобразований в линейно-оптической платформе.

Во второй части обзора излагаются основные достижения в области применения интегрально-оптических технологий в задачах квантовой оптики и оптической обработки квантовой информации. Сперва вводятся основные понятия интегральной оптики, упрощающие дальнейшее понимание особенностей различных технологических подходов к созданию интегрально-оптических компонентов. Приводится подробный обзор и сравнение наиболее распространенной технологии изготовления интегральной оптики — литографии — и доступного аналога в виде фемтосекундной лазерной печати, который используется при решении задач диссертации. Особое внимание в обзоре уделяется преимуществам и недостаткам каждой из технологий применительно к вопросам выполнения экспериментов с одиночными фотонами.

Во второй главе приводятся оригинальные результаты по разработке технологии создания пассивных интегрально-оптических устройств с помощью метода фемтосекундной лазерной печати. В ходе работы были получены результаты касательно режимов записи одномодовых оптических волноводов с низкими потерями на распространение и сопряжение с внешними оптоволоконными устройствами и разработки интегрально-оптических направленных делителей с поляризационной чувствительностью.

В ходе работы была собрана экспериментальная установка, реализующая метод фемтосекундной лазерной печати (далее ФЛП). Схема установки представлена на рисунке 1. Принцип работы установки основан на локальной модификации показателя преломления в объеме изначально однородного оптического материала с помощью жестко сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов. В качестве облучающего лазера используется иттербиевый волоконный фемтосекундный лазер. Формирование протяженных структур с повышенным показателем преломления осуществляется путем перемещения образца относительно фокального объема обрабатывающего пучка. Для перемещения применяется сверхточный позиционер на воздушной подушке. Излучение иттербиевого волоконного

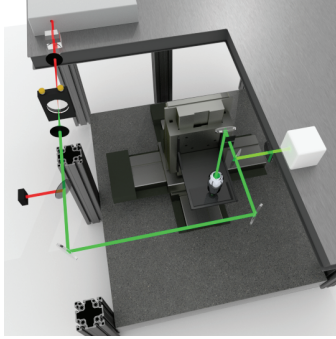
фемтосекундного лазера Menlo Systems Bluecut на длине волны 1030 нм фокусируется с помощью линзы Л1 с фокусным расстоянием 250 мм в нелинейном кристалле ВВО толщиной 800 мкм, вырезанном под углом 29° для замыкания коллинеарного вырожденного синхронизма типа I, используемом для генерации второй гармоники на центральной длине волны 515 нм. Толщина кристалла оптимизирована в соответствии с шириной спектра лазерного излучения, генерируемого лазером. Эффективность конверсии достигает $\approx 50\%$ при максимальной мощности излучения 4 Вт на частоте повторения 1 МГц. Излучение на фундаментальной длине волны выводится из схемы с помощью дихроичного зеркала ДЗ и с помощью системы зеркал 31,32 (после 32 установлено ещё одно зеркало 33, не нанесённое на схему, отражающее пучок вертикально вниз) направляется к фокусирующей оптике. Зеркало 33 обладает диэлектрическим покрытием с высоким коэффициентом отражения как на длине волны 515 нм, так и на длине волне 1030 нм, что при необходимости может быть использовано как для переключения между различными длинами волн обрабатываемого излучения, так и для обработки пучками одновременно на двух длинах волн. После зеркала, отражающего пучок вертикально вниз, установлена щель с настраиваемой шириной, которая может быть использована для модификации профиля пучка в фокусе.

В качестве первого результата был подобран режим многопроходной записи одномодовых на длине волны 808 нм оптических волноводов в кальциево-натриевом стекле. Удельные потери на распространение в созданных волноводах составили 0.86 дБ/см. Многопроходный режим позволил повысить контраст показателя преломления сердцевин волноводов, а также скорректировать геометрию сердцевин, чтобы добиться высокой степени сопряжения собственной моды волноводов и собственной моды одномодового оптического волокна. Кроме того, в используемом режиме удалось добиться низкой степени наведенной анизотропии в волноводах.

Вторая часть работы по созданию пассивных элементов была направлена на изучение способов создания поляризационно-чувствительных интегральных компонентов. Основные усилия были направлены на создание поляризационного направленного делителя. Направленный светоделитель представляет собой интегрально-оптическую структуру, состоящую из пары волноводов, расположенных близко друг к другу. Стандартная геометрия направленного делителя изображена на рисунке 2. Эванесцентная связь обеспечивает взаимную перекачку излучения между волноводами. Преобразование, осуществляемое НС, описывается аналогично стандартному светоделителю с помощью матрицы

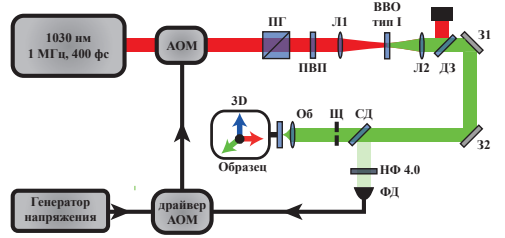
$$\begin{pmatrix} \sqrt{\eta} & i\sqrt{1-\eta} \\ i\sqrt{1-\eta} & \sqrt{\eta} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Общий вид



а)

Схема установки



б)

Рис. 1 — На рисунке представлены изображения экспериментальной установки, реализующей метод ФЛП. На рисунке а) представлена иллюстрация общего вида всей системы. Реализованная система ФЛП подразумевает запись волноводов в поперечной геометрии, поэтому необходима принципиально трехмерная оптическая схема. Оптическая система располагается на горизонтальной плите, лазерный пучок опускается к образцу через отверстие в оптической плите.

Горизонтальная конфигурация обеспечивает удобство настройки оптической системы и достаточно большую площадь для размещения оптических компонентов. На рисунке б) представлена оптическая схема системы ФЛП. АОМ - акусто-оптический модулятор, ПГ – призма Глана, ПВП – полуволновая пластина, Л – линза, ДЗ – дихроичное зеркало, З – зеркало, СД – светоделитель, Щ – щель, НФ 4.0 – нейтральный фильтр с оптической плотностью равной 4.0, ФД – фотодиод, Об - объектив. связывающей входные и выходные моды светоделителя

$$b_1 = \sqrt{\eta}a_1 + i\sqrt{1-\eta}a_2, \quad (2)$$

$$b_2 = i\sqrt{1-\eta}a_1 + \sqrt{\eta}a_2, \quad (3)$$

где η - эффективный коэффициент отражения направленного делителя. Для того, чтобы создать направленный светоделитель с выбранным коэффициентом отражения, необходимо предварительно измерить зависимость η от геометрических параметров области взаимодействия. Поскольку величина η пропорциональна величине интеграла перекрытия между собственными волноводными модами, реальная зависимость коэффициента отражения от геометрической конфигурации сильно зависит от конкретных параметров оптических волноводов, созданных в соответствующем режиме записи.

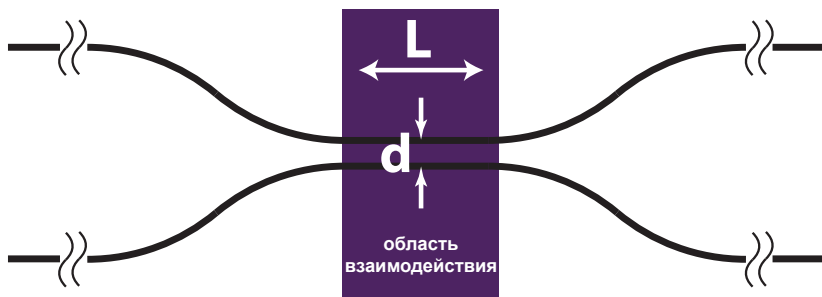


Рис. 2 — Геометрия направленного светоделителя. Основная перекачка излучения происходит в области взаимодействия - участке направленного светоделителя, на котором волноводы располагаются параллельно и близко друг к другу. Основные параметры направленного светоделителя d_{int} и L_{int} - расстояние между волноводами в области взаимодействия и длина области взаимодействия.

Для оценки поляризационных характеристик направленных светоделителей использовался простой способ, основанный на измерении картины перекачки излучения в структурах с различной длиной взаимодействия. В самом простом случае двух прямых волноводов, взаимодействующих с константой связи C , излучение периодически перераспределяется между волноводами по мере распространения в такой структуре. В паре одинаковых волноводов с идентичными постоянными распространения β_1 и β_2 наблюдается полная перекачка излучения из одного волновода в другой при длине взаимодействия $L_{int} = 2 * \pi / C$. В случае различных β_1 и β_2 полного переноса излучения между волноводами не происходит. В результате работы были выбраны параметры геометрии направленных делителей d_{int} и L_{int} , соответствующие реализации направленного светоделителя, разделяющего поляризационные состояния в различные пространственные моды. Коэффициент экстинкции составил $PER_H = 16$ дБ для горизонтальной поляризации и $PER_H = 20$ дБ для вертикальной поляризации. Основным отличием разработанного режима печати такого устройства стала высокая наведенная анизотропия в области взаимодействия направленного делителя. За счет этого удалось реализовать поляризационное разделение в устройстве с длиной взаимодействия $L_{int} = 3.7$ мм, что в несколько раз короче аналогичных устройств, описанных в литературе.

Третья глава посвящена разработке метода создания многоканального программируемого интегрально-оптического интерферометра с помощью фемтосекундной лазерной печати. Архитектура интерферометра выбрана в соответствии с работой Уильяма Клементса и соавторов [9], в которой показано преимущество симметричного расположения системы светоделителей с перестраиваемым коэффициентом деления по сравнению с оригинальной работой Микаэля Река и соавторов [10], предложивших

размещать светоделители в соответствии с треугольной структурой. Симметричная схема, во-первых, позволяет уменьшить глубину схемы, а, во-вторых, улучшает качество преобразования, осуществляемого интерферометром, которое снижается в следствие асимметрично распределенных потерь в более ранней треугольной схеме. Каждый из светоделителей представляет собой интерферометр Маха-Цандера с двумя нагревательными элементами, осуществляющими настройку коэффициента деления светоделителя и разности фаз между выходными модами. Полная геометрия интегрально-оптической схемы, составленной в соответствии с архитектурой Клементса, представлена на рисунке 3.

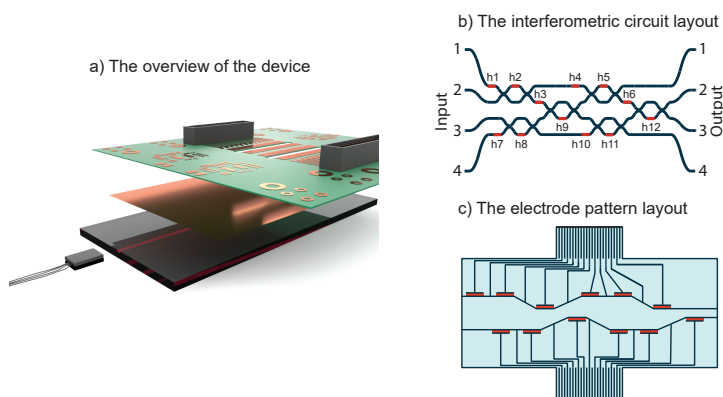


Рис. 3 — Схема перестраиваемого 4x4 интерферометра. На рисунке а) представлена трехмерная модель реконфигурируемого интегрально-оптического чипа, иллюстрирующая три основных компонента системы — пассивную интегрально-оптическую систему, металлическую пленку и печатную интерфейсную плату. На рисунке б) представлена схема оптической части реконфигурируемого интерферометра с указанием участков, над которыми расположены нагревательные элементы. На рисунке в) схематично изображена гравированная на поверхности металлической пленки структура, содержащая тонкие проводники с высоким сопротивлением и разводящие провода, соединяющие нагреватели с контактными площадками.

Процесс создания интерферометра Клементса состоит из серии шагов: печать волноводной структуры интерферометра, нанесение меток для последующего выравнивания чипа, осаждение металлической пленки на поверхности чипа, установка чипа с металлической пленкой в систему для фемтосекундной лазерной печати и выравнивание его положения относительно системы координат позиционера и гравировка нагревательных элементов, разводящих проводов и контактных электродов. Изготовление

программируемого интерферометра полностью выполняется в лаборатории, кроме единственного шага - осаждения металлической пленки на поверхность чипа. После выполнения всех технологических этапов чип устанавливается на металлическую платформу и совмещается с печатной платой с подпружиненными электродами, обеспечивающими электрический интерфейс между чипом и внешним источником постоянного тока.

Для тестирования реконфигурируемого интегрально-оптического устройства использовалась простая экспериментальная установка: лазерное излучение на длине волны 808 нм подавалось на вход чипа с помощью массива одномодовых волокон, геометрически сопряженных с торцами волноводов на входной грани чипа. На выходе излучение собиралось с помощью многомодового массива оптических волокон, подключенных к цифровым фотодиодам. Для характеристики устройства использовались следующие метрики:

- качество воспроизведения заданного распределения интенсивности в выходных каналах интерферометра,
- время переключения t_1 одного термооптического модулятора,
- время переключения t_2 между различными распределениями интенсивности, пользуясь подобранными настройками для токов, протекающих через нагреватели.

Измерение времени переключения t_1 выполнялось путем перевода контроллера тока в режим импульсной подачи тока на нагреватель h8 (рисунок 3б) и измерении временной зависимости интенсивности на выходе канала номер 4. Временная зависимость регистрировалась с помощью аналогового фотодиода с предусилителем сигнала, подключенного к осциллографу. Сигнал с детектора (рисунок 4 а)) позволяет определить временную характеристику t_1 при отклике интерферометра на термооптическое воздействие с помощью одного модулятора. Время переключения t_1 определяется по интервалу времени, требующемуся для переключения между уровнями 10% и 90%. Это время отличается для процессов связанных с включением нагревателя (нагревом) и выключением нагревателя (охлаждением) и составляет $t_1^h = 13$ мс и $t_1 = 10$ мс. Время t_1 оказалось значительно меньше, нежели результаты опубликованные в работах [11;12].

Поскольку технология лазерной печати не позволяет создавать волноводные структуры с высоким контрастом показателя преломления и располагать нагревательные элементы оптимальным образом, то в реконфигурируемых многоканальных структурах наблюдается сильное влияние кросс-воздействия нагревательных элементов на участки интерферометра, которые не должны быть затронуты используемым нагревателем. В связи с этим стандартный способ настройки, основанный только на калибровке зависимости фазы, вносимой термооптическим элементом, от пропускаемого тока, оказывается недостаточно точным. Чтобы повысить точность

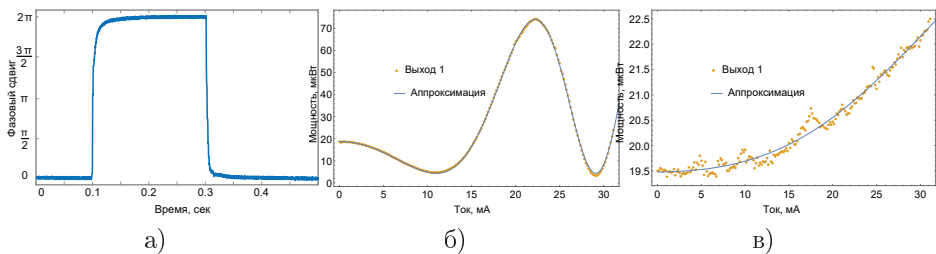


Рис. 4 — На рисунке а) представлена зависимость оптической мощности на выходе номер 4 при воздействии на нагреватель h8 прямоугольным импульсом тока. На рисунке б) представлена зависимость оптической мощности на выходе канала 3 от тока, подаваемого на нагреватель h8. На рисунке в) представлена картина зависимости мощности на выходе канала 1 от тока, подаваемого на нагреватель h1, отражающая эффект кросс-воздействия в реконфигурируемом интерферометре.

настройки мы прибегли к оптимизационной процедуре настройки. Чтобы проверить качество реконфигурируемого интерферометра, мы провели две серии экспериментов: настройка интерферометра для воспроизведения случайно выбранных выходных распределений мощности и настройка интерферометра в режим переключения излучения из заданного входного канала в заданный выходной канал. Результат настройки для генерации случайных распределений показан на рисунке 5 б). Подбор фазовых сдвигов в этом случае оказался достаточно простой задачей и, как видно из гистограммы, большинство распределений удалось настроить с высокой точностью. В основном такая высокая средняя точность связана с тем, что случайным образом достаточно сложно выбрать конфигурации мощности на выходе, которые действительно существенно зависят от дефектов изготовления оптической схемы. В частности к таким распределениям относятся те, в которых встречается нулевой или близкий к нулю элемент. По этой причине мы провели дополнительный тест на переключение между каналами. Выполнение переключения с высоким качеством требует, чтобы все интерферометры Маха-Цандера в схеме функционировали с высокой видимостью. Результат настройки интерферометра в режим переключателя представлен на рисунке 5 в). В этом эксперименте уже не удастся достигать низких значений инфиделити на уровне $10^{-3} - 10^{-4}$.

В **четвертой главе** изложен метод проектирования линейно-оптических интерферометров, реализующих заданную квантовую операцию с максимальной вероятностью. На текущий момент наиболее удобным способом кодирования квантовой информации с помощью одиночных фотонов является двуххрельсовая кодировка: логическое состояние кубита кодируется с помощью двух различных оптических мод, в каждой из которых фотон может находиться с заданной амплитудой вероятности. Такая кодировка

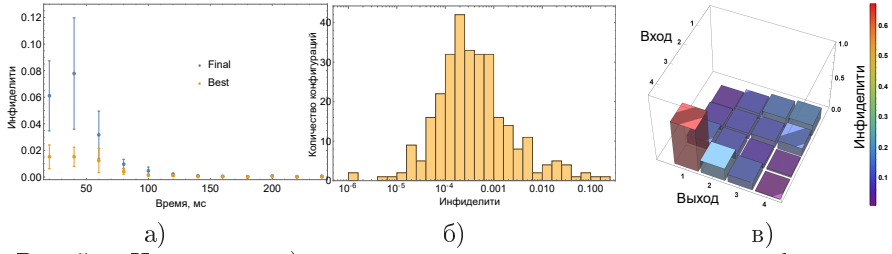


Рис. 5 — На рисунке а) представлена зависимость величин инфиделити, полученных в ходе выполнения оптимизационной процедуры и при установлении найденной оптимальной конфигурации токов по истечению процедуры от времени между переключениями тока в ходе процедуры оптимизации. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что время установления стабилизированного распределения температуры в чипе оказывается больше времени переключения одиночного интерферометра Маха-Цандера, измеренного по уровню 10% — 90%. Для выполнения дальнейших экспериментов по настройке на основе полученных данных было выбрано время между последовательными переключениями равное 180 мс. На рисунке б) представлена гистограмма величины инфиделити $1 - F$, измеренная при настройке интерферометра для генерации случайных распределений мощности на выходе. На рисунке в) представлена двумерная гистограмма величины инфиделити $1 - F$, отвечающая качеству переключения мощности излучения, подаваемого в один из входных каналов и перенаправляемого в выбранный выходной канал.

обеспечивает линейный рост числа необходимых оптических мод с числом кубитов, а также удобную реализацию однокубитных гейтов. Однако в такой кодировке двухкубитные операции всегда выполняются с конечной вероятностью успеха [13]. Повышение вероятности известных квантовых операций или разработка новых эффективных квантовых преобразований над одиночными фотонами может способствовать уменьшению объема дополнительных ресурсов необходимых для коррекции ошибок универсального линейно-оптического квантового компьютера, связанных с конечной вероятностью многокубитных операций.

Нами был рассмотрен оптимизационный метод поиска унитарных преобразований линейно-оптического интерферометра, отвечающих реализации требуемой операции с максимально возможной вероятностью. Преобразование $\mathcal{U}$ в фокковском пространстве состояний фотонов в схеме связано с унитарной матрицей U линейно-оптического интерферометра, преобразующей операторы рождения фотонов в модах интерферометра. Матричные элементы оператора $\mathcal{U}$ зависят от перманентов подматриц, построенных из элементов матрицы U [14].

Количественное описание процесса генерации заданного состояния на выходе строится с помощью двух величин:

$$\begin{aligned} P_a &= \sum_m |\langle m, a | \mathcal{U} | \psi_{in} \rangle|^2, \\ \mathcal{M}_{t,a} &= P_a^{-1} |\langle t, a | \mathcal{U} | \psi_{in} \rangle|^2, \\ |m, a\rangle &= |m_1, \dots, m_N, a_1, \dots, a_M\rangle. \end{aligned} \quad (4)$$

Величина P_a обозначает вероятность возникновения состояния $|a\rangle$ в выходных модах M . Выражение $\mathcal{M}_{t,a}$ отражает степень перекрытия состояния, возникающего в модах N при регистрации вспомогательного состояния $|a\rangle$. Число детектируемых фотонов во вспомогательной подсистеме равно $M_{ph} = \sum_i a_i$. Генерация с вероятностью P_a заданного целевого состояния соответствует нахождению в a -ом столбце матрицы $\mathcal{M}$ единственного единичного элемента, остальные элементы столбца равны нулю. Если целевых состояний несколько, то результирующая вероятность равна сумме соответствующих вероятностей P_a . Итак, задача сводится к определению набора допустимых вспомогательных состояний $\mathcal{A}(U)$ и унитарного преобразования U , которые

$$\begin{aligned} \mathcal{A}(U) &= \{a | \exists t^* : \mathcal{M}_{t^*,a}(U) = 1\}, \\ U &= \arg \max_V \sum_{a \in \mathcal{A}(V)} P_a(V). \end{aligned} \quad (5)$$

В качестве примера квантовой операции было рассмотрено приготовление трехфотонного состояния Гринбергера-Хорна-Цайлингера с оповещением. Поставленная оптимизационная задача решалась с помощью стандартного алгоритма оптимизации Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно. В результате удалось разработать линейно-оптический интерферометр с 10 модами, на вход которого подаются 6 одиночных фотонов в различные 6 мод интерферометра. Детектирование трех из 6 фотонов на выходе интерферометра в определенной конфигурации гарантирует генерацию трехфотонного состояния Гринбергера-Хорна-Цайлингера в двухрельсовой кодировке с вероятностью $1/54$. полученная величина вероятности превосходит наилучший известный результат для генерации таких состояний без использования связи с опережением [15].

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Разработаны методы изготовления пассивных и реконфигурируемых интегрально-оптических структур с использованием метода ФЛП, применимых для экспериментов по реализации линейно-оптических квантовых вычислений.
2. Разработана технология записи одномодовых интегрально-оптических волноводов с оптическими потерями 0.86 дБ/ см в многопроходном режиме записи. Многопроходная запись позволяет управлять пространственным распределением показателя преломления в поперечном сечении волновода, за счет чего достигнуты

потери на сопряжении с внешним одномодовым оптическим волокном 1.12 дБ для горизонтальной поляризации и 1.10 дБ для вертикальной поляризации.

3. Реализован режим записи одномодовых оптических волноводов с низкой анизотропией $\sim 10^{-6}$ и достигнут режим сильной эванесцентной связи между волноводами, записанными методом ФЛП, превышающей $C > 3 \text{ мм}^{-1}$. В разработанном режиме реализован поляризационный светоделитель с малой длиной взаимодействия между волноводами $L_{int} = 3.7 \text{ мм}$ на базе эванесцентно связанных волноводов, обеспечивающий коэффициент экстинкции 20 дБ для вертикальной поляризации и 16 дБ для горизонтальной поляризации.
4. С помощью технологии фемтосекундной лазерной печати реализован интегрально-оптический реконфигурируемый интерферометр с универсальной архитектурой Клементса. Интерферометр протестирован с использованием классического излучения и продемонстрировал среднюю фиделити генерации заданных выходных распределений мощности $F \sim 4 * 10^{-4}$. Была достигнута рекордная на момент публикации результатов скорость переключения интегральных термооптических модуляторов $t_h = 13 \text{ мс}$ при включении и нагреве термооптического элемента и $t_c = 10 \text{ мс}$ при выключении и охлаждении термооптического элемента.
5. Разработана численная процедура для поиска конфигурации линейно-оптического интерферометра, обеспечивающее приготовление заданного выходного состояния с оповещением с максимальной вероятностью. Схема апробирована на примере приготовления трехфотонных состояний типа Гринбергера-Хорна-Цайлингера, и с ее помощью построена схема генерации таких состояний без использования принципа связи с опережением с вероятностью $P = \frac{1}{54}$, превышающей известные по литературным данным значения.

Литература

1. Universal linear optics / J. Carolan, C. Harrold, C. Sparrow et al. // *Science*. — 2015. — . — Vol. 349, no. 6249. — Pp. 711–716. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.aab3642>.
2. From Three-Photon Greenberger-Horne-Zeilinger States to Ballistic Universal Quantum Computation / Mercedes Gimeno-Segovia, Pete Shadbolt, Dan E. Browne, Terry Rudolph // *Physical Review Letters*. — 2015. — . — Vol. 115, no. 2. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.115.020502>.

3. Hirao K, Miura K. Writing waveguides and gratings in silica and related materials by a femtosecond laser // *Journal of Non-Crystalline Solids*. — 1998. — . — Vol. 239, no. 1-3. — Pp. 91–95. — URL: [https://doi.org/10.1016/s0022-3093\(98\)00755-8](https://doi.org/10.1016/s0022-3093(98)00755-8).
4. Silica-on-Silicon Waveguide Quantum Circuits / A. Politi, M. J. Cryan, J. G. Rarity et al. // *Science*. — 2008. — . — Vol. 320, no. 5876. — Pp. 646–649. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.1155441>.
5. Towards quantum chemistry on a quantum computer / B. P. Lanyon, J. D. Whitfield, G. G. Gillett et al. // *Nature Chemistry*. — 2010. — . — Vol. 2, no. 2. — Pp. 106–111. — URL: <https://doi.org/10.1038/nchem.483>.
6. Anderson localization of entangled photons in an integrated quantum walk / Andrea Crespi, Roberto Osellame, Roberta Ramponi et al. // *Nature Photonics*. — 2013. — . — Vol. 7, no. 4. — Pp. 322–328. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.26>.
7. Integrated photonic quantum gates for polarization qubits / Andrea Crespi, Roberta Ramponi, Roberto Osellame et al. // *Nature Communications*. — 2011. — . — Vol. 2, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1038/ncomms1570>.
8. Integrated multimode interferometers with arbitrary designs for photonic boson sampling / Andrea Crespi, Roberto Osellame, Roberta Ramponi et al. // *Nature Photonics*. — 2013. — . — Vol. 7, no. 7. — Pp. 545–549. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.112>.
9. Optimal design for universal multiport interferometers / William R. Clements, Peter C. Humphreys, Benjamin J. Metcalf et al. // *Optica*. — 2016. — . — Vol. 3, no. 12. — P. 1460. — URL: <https://doi.org/10.1364/optica.3.001460>.
10. Experimental realization of any discrete unitary operator / Michael Reck, Anton Zeilinger, Herbert J. Bernstein, Philip Bertani // *Physical Review Letters*. — 1994. — . — Vol. 73, no. 1. — Pp. 58–61. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.73.58>.
11. Thermally reconfigurable quantum photonic circuits at telecom wavelength by femtosecond laser micromachining / Fulvio Flamini, Lorenzo Magrini, Adil S Rab et al. // *Light: Science & Applications*. — 2015. — . — Vol. 4, no. 11. — Pp. e354–e354. — URL: <https://doi.org/10.1038/lsa.2015.127>.
12. Design and fabrication of reconfigurable laser-written waveguide circuits / Zachary Chaboyer, A. Stokes, J. Downes et al. // *Optics Express*. — 2017.

- . — Vol. 25, no. 26. — P. 33056. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.25.033056>.
13. *Knill E.* Quantum gates using linear optics and postselection // *Physical Review A*. — 2002. — . — Vol. 66, no. 5. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.66.052306>.
 14. Quantum Information Processing / Ed. by Thomas Beth, Gerd Leuchs. — Wiley, 2005. — . — URL: <https://doi.org/10.1002/3527606009>.
 15. *Varnava Michael, Browne Daniel E., Rudolph Terry.* How Good Must Single Photon Sources and Detectors Be for Efficient Linear Optical Quantum Computation? // *Physical Review Letters*. — 2008. — . — Vol. 100, no. 6. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.100.060502>.

Дьяконов Иван Викторович

Интегральные оптические структуры для задач линейно-оптических квантовых
вычислений

Автореф. дис. на соискание ученой степени к. ф.-м. н.

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____

