

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Скрябин Николай Николаевич

**Элементы линейно-оптических квантовых вычислений
на основе интегрально-оптических чипов**

1.3.19. Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре квантовой электроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

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

Официальные оппоненты: **Охримчук Андрей Гордеевич**,
кандидат физико-математических наук,
Федеральный исследовательский центр «Институт
общей физики им. А.М. Прохорова Российской
академии наук», Научный центр волоконной
оптики им. Е.М. Дианова, ведущий научный
сотрудник

Богданов Юрий Иванович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт», отделение Физико-
технологических исследований им. К.А. Валиева,
лаборатория физики квантовых компьютеров,
главный научный сотрудник

Андрияш Александр Викторович,
доктор физико-математических наук, член-
корреспондент Российской академии наук,
Всероссийский научно-исследовательский
институт автоматики им. Н.Л. Духова, научный
руководитель

Защита диссертации состоится «03» июня 2026 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.4 Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 62, 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 портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3868>

Автореферат разослан «__» апреля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.013.4,
кандидат физико-математических наук

Коновко Андрей Андреевич

Общая характеристика работы

За последние 10 лет квантовые вычисления пережили бурное развитие, во время которого на базе научных лабораторий и университетов, а также в отделах исследований технологических гигантов образовались подразделения или стартапы, нацеленные на коммерциализацию квантовых вычислений, и насчитывающие к настоящему моменту больше сотни по всему миру. Поскольку до сих пор нет лидирующей платформы, их развитие носит «гоночный» характер, а среди конкурирующих можно выделить сверхпроводящие цепи, ионы и атомы в ловушках, а также фотоны. При этом уже продемонстрировано квантовое превосходство на среднемасштабных вычислителях, содержащих от 50 до 1000 кубитов, хотя и характеризуемых высоким уровнем шума и ошибок. Несмотря на свои ограничения, такие вычислители считаются важным шагом на пути к созданию полноценных отказоустойчивых квантовых компьютеров.

Актуальность темы исследования обусловлена фундаментальным и прикладным интересом научного сообщества в области разработки элементов квантовых вычислений. Такие элементы позволяют исследователям получать практический опыт работы с реальными квантовыми аппаратными средствами и разрабатывать новые алгоритмы, которые смогут раскрыть весь потенциал квантовых вычислений в будущем. Дальнейшие шаги для разработки полноценных отказоустойчивых квантовых компьютеров связаны с доведением технологических процессов производства до чрезвычайно высокого уровня.

Фотонная платформа квантовых вычислений – одна из тех, которые достигли порога квантового превосходства. Эта платформа обладает рядом уникальных преимуществ, таких как малая декогеренция, работа при комнатных температурах, доступность нескольких степеней свободы для кодирования квантовых состояний, совместимость с волоконно-оптическими линиями связи. Кроме того, есть уже наработанный и наиболее перспективный подход линейно-оптических квантовых вычислений, который позволяет генерировать запутанные состояния из отдельных одиночных фотонов используя интерферометр, состоящий только из линейно-оптических элементов. А для масштабирования и повышения стабильности таких вычислителей уместно упомянуть такую быстро развивающуюся область, как интегральная квантовая фотоника, преимущественно основанная на современных линиях производства комплементарных структур металл-оксид-полупроводник (КМОП), которая может позволить разместить все элементы фотонных квантовых вычислений на единый твердотельный интегрально-оптический чип.

Однако для тех же научных целей наиболее привлекательны более дешевые и простые технологии для быстрого прототипирования и проверки новых идей и концепций. Наиболее подходящим для этих целей в части изготовления интерферометров является технология фемтосекундной лазерной записи, которая стояла у истоков квантовых вычислительных экспериментов с интерферометрами на чипе. Это технология локального изменения показателя преломления прозрачного диэлектрического материала под действием сильно сфокусированных ультракоротких лазерных импульсов. Метод позволяет быстро и в одну стадию изготавливать волноводы внутри широкого круга материалов, таких как оптические стекла, кристаллы, керамика, алмазы и полимеры. Многофотонные события в сильной степени зависят от оптических потерь в чипе, что делает этот параметр определяющим фактором для масштабирования более сложных экспериментов с большим числом фотонов. С этой точки зрения оптимизация режима записи с целью снижения потерь становится актуальной задачей.

Квантовые запоминающие устройства являются важным компонентом для квантовых вычислений и коммуникаций; особое внимание привлекают системы, обладающие потенциалом для создания твердотельных квантовых запоминающих устройств. На сегодняшний день единственными твердотельными системами с большими временами когерентности, необходимыми для реализации фотонных квантовых повторителей, являются кристаллы, легированные редкоземельными ионами. Поскольку ячейка квантовой памяти на основе фотонного эха является важнейшим компонентом квантового ретранслятора, необходимо разработать процедуру изготовления кристаллических волноводов с редкоземельными ионами и включить легированный редкоземельными элементами кристалл в интегрированную квантовую коммуникационную платформу.

В последние годы наблюдается большой интерес к перестраиваемым линейно-оптическим универсальным многоканальным интерферометрам. Такой интерферометр является необходимым инструментом для систем квантовой обработки информации: для квантовых симуляторов, реализующих бозонный сэмплинг с дискретными фотонами или с непрерывными переменными состояниями света, и для более требовательных квантовых компьютеров, в которых многоканальные преобразования используются для приготовления квантовых состояний и для реализации операций квантовой логики. Таким образом, разработка архитектуры универсальных многоканальных интерферометров также является важной задачей.

Степень разработанности темы диссертации является крайне высокой, поскольку квантовые вычисления на фотонах являются одной из лидирующих платформ. Первые

эксперименты по квантовым вычислениям с использованием интегральных интерферометров были продемонстрированы в 2008-2009 гг. группой проф. О'Брайена из Бристольского университета [1–3], за которым последовали работы группы проф. Сциаррино из Римского университета [4,5]. Примечательно, что 3 из 5 интегральных чипов были изготовлены по технологии фемтосекундной лазерной записи группами проф. Уитфорда из университета Маккуории [3] и проф. Озелламе из Миланского технического университета [4,5]. Именно эти группы стали лидирующими в области разработок интегрально-оптических чипов для квантовых вычислений. Подробный обзор литературы с анализом приведён в первой главе диссертации.

Цель диссертационной работы заключается в разработке и характеристике элементов линейно-оптических квантовых вычислений на основе интегрально-оптических чипов, созданных с помощью технологии фемтосекундной лазерной записи.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработка и характеристика двухкубитного линейно-оптического квантового процессора на основе интегрально-оптического чипа, созданного с помощью технологии фемтосекундной лазерной записи волноводов в кварцевом стекле.
2. Разработка режима фемтосекундной лазерной записи волноводов в кварцевом стекле с низкими потерями на распространение и на согласование с оптическим волокном.
3. Разработка и характеристика интегрально-оптического чипа для генерации двухкубитных состояний с оповещением, и генерация состояний с различной степенью запутанности в нём.
4. Разработка технологии фемтосекундной лазерной записи волноводов и направленных ответвителей в кристалле иттрий-алюминиевого граната (ИАГ).
5. Исследование архитектуры многоканального интерферометра на основе решеток связанных волноводов.

Объектом исследования являются экспериментальные элементы линейно-оптических квантовых вычислений на основе интегрально-оптических чипов, созданных с помощью технологии фемтосекундной лазерной записи. **Предметом** исследования являются методы разработки и улучшения различных частей элементов, таких как источники одиночных фотонов и интегрально-оптические чипы, а также качественные характеристики элементов, такие как точности квантовых гейтов и приготовления состояний.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Впервые с помощью технологии фемтосекундной лазерной записи волноводов в кварцевом стекле изготовлен программируемый двухкубитный линейно-оптический квантовый процессор и охарактеризованы его гейты.
2. Впервые детально исследован и апробирован метод многопроходного сканирования при фемтосекундной лазерной записи волноводов в кварцевом стекле для минимизации потерь на распространение и на согласование с оптическим волокном.
3. Продемонстрирована экспериментальная генерация двухкубитных состояний с оповещением и регулируемой степенью запутанности в интегрально-оптическом чипе с проведением квантовой томографии состояния.
4. С помощью технологии фемтосекундной лазерной записи разработаны волноводы в кристалле ИАГ и продемонстрированы направленные ответвители на их основе для задач квантовых запоминающих устройств.
5. Впервые предложена и исследована архитектура многоканального интерферометра на основе решеток связанных волноводов для приготовления квантовых состояний и для реализации операций квантовой логики.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Созданный программируемый двухкубитный линейно-оптический квантовый процессор способен подготавливать произвольное двухкубитное состояние и выполнить измерение состояний в произвольном базисе. Процессор позволяет реализовать двухкубитные квантовые алгоритмы и решать задачи квантовой химии по вычислению основных уровней двухатомных молекул.
2. Разработанный режим фемтосекундной лазерной записи волноводов в кварцевом стекле с низкими потерями на распространение и на согласование с оптическим волокном позволяет создавать различного рода интегрально-оптические чипы с низкими потерями в широком диапазоне длин волн от 400 нм до 1550 нм.
3. Продемонстрированный генератор двухкубитных состояний с оповещением позволяет генерировать состояния с различной степенью запутанности от сепарабельного состояния до максимально запутанного состояния Белла, которые могут служить в качестве ресурсов для генерации кластерных состояний. Немаксимально запутанные состояния также представляют интерес для квантовой телепортации.

4. Разработанные направленные ответвители в кристалле ИАГ могут стать основой для создания интегрированной платформы, включающей в себя логическое управление входным и выходным квантовыми состояниями и процесс хранения информации на едином оптическом чипе.
5. Предложенная архитектура многоканального интерферометра на основе решеток связанных волноводов позволит создавать миниатюрные интерферометры с низкими вносимыми потерями в следствие отсутствия каких-либо изогнутых участков. Архитектура также может стать основой для проектирования реконфигурируемых решеток и других более сложных архитектур на основе решеток, включая трёхмерные схемы.

Методология и методы исследования. Для фемтосекундной лазерной записи волноводов использовался иттербиевый волоконный фемтосекундный лазер ANTAUS (Авеста). Образцы для исследований: кварцевое стекло JGS1 (AGOptics) и кристалл YAG легированный ионами Tm^{3+} . Изготовленные структуры исследовались с помощью светлопольного оптического микроскопа Axio Scope A1. Поддерживаемые моды волноводов были исследованы построением изображения выходного торца образца на CMOS камеру Beamage-4M (Gentec-EO). Мощности измерялись с помощью измерителя мощности PM100D (Thorlabs). Для численной оптимизации использовался алгоритм глобальной оптимизации Basin-hopping реализованный с помощью локального оптимизатора BFGS из стандартной библиотеки SciPy языка программирования Python.

Положения, выносимые на защиту:

1. Высокие значения среднего фиделити однокубитных гейтов ($R_x - 99,45\%$, $R_z - 99,98\%$) и двухкубитного гейта CNOT (97,16%) достигнуты в программируемом двухкубитном линейно-оптическом квантовом процессоре, реализованном на основе интерферометра интегрально-оптического чипа из кварцевого стекла, изготовленного по технологии фемтосекундной лазерной записи.
2. Низкие потери на распространение (0,07 дБ/см) и на согласование с одномодовым волокном (0,2 дБ/торец) реализованы на длине волны 920 нм в волноводах из кварцевого стекла, изготовленных по технологии фемтосекундной лазерной записи в первом режиме модификации с применением метода многопроходного сканирования.
3. Генерация двухкубитных запутанных состояний с оповещением и регулируемой степенью запутанности – от сепарабельного состояния с фиделити 92,3% до максимально запутанного состояния Белла с фиделити 98,5% – реализована с

использованием интерферометра интегрально-оптического чипа из кварцевого стекла, изготовленного по технологии фемтосекундной лазерной записи.

4. Коэффициент связи между двумя волноводами с депрессированной оболочкой, изготовленных по технологии фемтосекундной лазерной записи в кристалле ИАГ, увеличен до $2,7 \text{ см}^{-1}$ путем удаления нескольких треков из оболочек волноводов в области взаимодействия, что позволило создать направленные ответвители.
5. Архитектура N-канального интерферометра на основе прямых решеток связанных волноводов, состоящая из N-1 слоев, где возможна регулировка постоянной распространения отдельных волноводов, реализует случайные по Хаару унитарные матрицы с фиделити не менее 99,99% для $N = 2 - 12$.

Достоверность результатов обеспечивается воспроизводимостью режимов записи волноводов и их характеристик, реализацией на их основе интегрально-оптических элементов и действующих экспериментальных установок, в которых показывается хорошее соответствие экспериментальных и теоретических результатов.

Личный вклад автора. Все представленные в диссертационной работе результаты получены автором лично либо при его непосредственном участии. Автором были собраны и модифицированы установки по фемтосекундной лазерной записи, источник фотонов на основе СПР и пространственный демультиплексор на 6 каналов. Все интегрально-оптические чипы для экспериментов, в том числе для разработки режима фемтосекундной лазерной записи волноводов методом многопроходного сканирования, были изготовлены и охарактеризованы автором лично. Автор принимал участие в сборке экспериментальных стендов и необходимых компонентов, предварительной настройке источников фотонов, в том числе на основе квантовой точки. Экспериментальные исследования, анализ и обработка результатов проводились автором лично или при его непосредственном участии. Помимо этого, автором лично проведено численное исследование предложенной архитектуры многоканального интерферометра на основе решеток связанных волноводов. Автором лично были проведены работы по написанию и редактированию текстов статей, ответу на вопросы рецензентов и редакторов при публикации статей в журналах.

Апробация работы. Основные результаты, представленные в диссертационной работе, докладывались в следующих международных и всероссийских конференциях:

1. International Conference on Laser Optics 2018 (Россия, Санкт-Петербург, июнь 2018).
2. 2-я Российская школа по квантовым технологиям (Россия, Сочи, март 2019).
3. European Conference on Integrated Optics 2019 (Бельгия, Гент, апрель 2019).

4. Nonlinear Optics (США, Гавайи, июль 2019).
5. 5th International Conference on Quantum Technologies (Россия, Москва, июль 2019).
6. 9th Week of the Young Researcher (Россия, Москва, сентябрь 2019).
7. International Conference on Laser Optics 2020 (Россия, Санкт-Петербург, ноябрь 2020).
8. 7th International Conference on Quantum Technologies (Россия, Москва, июль 2023).
9. XX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям «HOLOEXPO 2023» (Россия, Сочи, сентябрь 2023).
10. 18-я международная специализированная выставка лазерной, оптической и оптоэлектронной техники «ФОТОНИКА. Мир лазеров и оптики-2024» (Россия, Москва, март 2024).
11. International Symposium Fundamentals of laser-assisted micro and nanotechnologies «FLAMN-2025» (Россия, Санкт-Петербург, июнь 2025).

Результаты, представленные в диссертационной работе, также докладывались автором на научных семинарах Центра Квантовых Технологий МГУ им. Ломоносова и Российского Квантового Центра.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 5 печатных работах, в том числе в 5 статьях рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих «Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова».

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, из 6 глав и заключения. Объём диссертации составляет 167 страниц, в том числе 65 рисунков и 16 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 178 наименований.

Основное содержание работы

В первой главе, которая является обзором литературы, вначале приводятся базовые понятия квантовых вычислений в общем виде, такие как: кубит, однокубитные и многокубитные операции (гейты), запутанные состояния, проекционные измерения, матрица плотности, хи-матрица квантового процесса и квантовые вычислительные схемы. Во втором разделе более подробно рассмотрены линейно-оптические квантовые вычисления, с уклоном на фотонную платформу: базовые элементы линейной оптики, такие как фазовращатель и светоделитель, и их математическое описание, квантовая интерференция Хонга-Оу-Манделя (ХОМ) [6], кодировка кубита в базисе двух мод, устройство однокубитных гейтов и их применение для приготовления и измерения

состояний, устройство двухкубитного гейта CNOT, методы постселектирования и оповещения для корректного срабатывания гейтов, схемы многоканальных программируемых интерферометров, и модели линейно-оптических квантовых вычислений. В третьем разделе приводятся основные интегрально-оптические элементы и их математическое описание, используемое для реализации линейно-оптических квантовых вычислений: оптический волновод, направленный ответвитель, термооптический фазовращатель, интерферометр Маха-Цандера, решетка связанных волноводов. Четвёртый раздел посвящён технологии фемтосекундной лазерной записи волноводов и интегрально-оптических элементов в прозрачных диэлектриках, где вначале вводятся три основных типа формирования волноводов: Тип-I – непосредственная запись сердцевинки волновода, Тип-II – запись двух треков, между которыми образуется стресс-индуцированный волновод, Тип-III – запись депрессированной оболочки волновода. Затем рассмотрены режимы модификации кварцевого стекла, где в 1-ом режиме за счёт локального плавления происходит слабое изотропное изменение показателя преломления, а во 2-ом режиме добавляется образование нанорешеток, которое приводит к более сильному анизотропному изменению показателя преломления. Далее приводится анализ работ по созданию интегрально-оптических элементов в стеклах для экспериментальной реализации линейно-оптических квантовых вычислений, и по созданию интегрально-оптических элементов в кристаллах. Приводится формула для вычисления фиделити между унитарными матрицами:

$$F(U, U_0) = \frac{|\text{Tr}(U^\dagger U_0)|^2}{\text{Tr}(U_0^\dagger U_0)\text{Tr}(U^\dagger U)} = \frac{1}{N^2} |\text{Tr}(U^\dagger U_0)|^2. \quad (1)$$

Во **второй главе** приводятся основные методы и материалы исследования: описаны параметры установки и процесс фемтосекундной лазерной записи волноводов, и используемые образцы кварцевого стекла (AGOptics, JGS1) и кристалла $\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$. В качестве источника лазерных импульсов использовалась первая (1030 нм, 1 МГц, 220 фс) или вторая гармоника (ГВГ, 515 нм, 1 МГц, 270 фс) иттербиевого волоконного фемтосекундного лазера (Авеста ANTAUS). Мощность лазера регулировалась с помощью выходного акустооптического модулятора и держалась постоянной с помощью системы стабилизации с обратной связью на основе фотодетектора, на который светоделителем отводилось около 2% мощности. Излучение фокусировалось внутрь образца асферической линзой с числовой апертурой $\text{NA} = 0,55$ (Thorlabs, C230TMD-B) на глубину z_w под поверхностью образца. Для полного заполнения всей входной апертуры фокусирующей линзы лазерный пучок был расширен в 2,25 раза с помощью перестраиваемого телескопа.

Так как сама асферическая линза была рассчитана на глубину фокусировки 450 мкм, после линзы при необходимости устанавливалось покровное стекло разной толщины для полной или частичной компенсации сферических aberrаций. Образец помещался на трех-осевую систему передвижения на воздушной подушке (AeroTech FiberGlide3D), которая управлялась через компьютер.

Дополнительно описываются методы моделирования волноводов в программе Ansys Lumerical MODE, расчёт их собственных мод и перекрытия с модой оптических волокон. Подробно описаны методы исследования и характеристики интегрально-оптических структур, такие как микроскопия, измерение профиля моды и потерь волноводов, измерение коэффициентов деления направленных ответвителей и матрицы преобразования многоканальных интерферометров. Описаны процессы создания и калибровки термооптических фазовращателей, сборки программируемых интерферометров. Перечислено необходимое оборудование для термостабилизации и управления интегрально-оптическими чипами, а также для регистрации одиночных фотонов и их совпадений. Приведены методы томографии квантового состояния и квантового процесса, а также оптимизационные алгоритмы.

В третьей главе приводятся оригинальные результаты по разработке и характеристике двухкубитного линейно-оптического квантового процессора на основе двух фотонов и программируемого интегрально-оптического чипа. Первый раздел посвящён сборке двухфотонного источника на основе спонтанного параметрического рассеяния (СПР) с частотой совпадений 80 кГц и неразличимостью фотонов 95,7%. Второй раздел посвящён изготовлению программируемого интегрально-оптического чипа. Процессор состоит из двух последовательностей однокубитных гейтов $R_X(\varphi)$ и $R_Z(\varphi)$, которые приготавливают произвольные однокубитные состояния из начального состояния $|0\rangle$, а также двухкубитного гейта CNOT, за которым следуют две последовательности тех же однокубитных гейтов, но в обратном порядке $R_Z(\varphi)$ и $R_X(\varphi)$, которые реализуют однокубитные проекционные измерения. Схема волноводной структуры интегрально-оптического чипа показана на рисунке 1а. Однокубитные гейты $R_X(\varphi)$ выполнены в виде интерферометра Маха-Цандера, $R_Z(\varphi)$ – в виде одиночного фазовращателя, а двухкубитный гейт CNOT сделан по 6-модовой схеме из 5 светоделителей [7]. Волноводная структура чипа была создана с помощью технологии фемтосекундной лазерной записи волноводов во 2-ом режиме модификации в кварцевом стекле (см. рисунок 1б). Варьируя параметры лазерной системы, был подобран оптимальный режим записи одномодовых волноводов (на длине волны 515 нм, на частоте 1 МГц, с длительностью импульсов 270 фс, с энергией в импульсе 80 нДж и с фокусирующей оптикой с числовой апертурой 0,55)

внутри кварцевого стекла на глубине 15 мкм. Для реализации фазовращателей на поверхность оптического чипа прямо над волноводами были созданы нагревательные элементы посредством лазерной абляции изолирующих дорожек на напылённом слое металла на поверхности чипа (см. рисунок 1в).

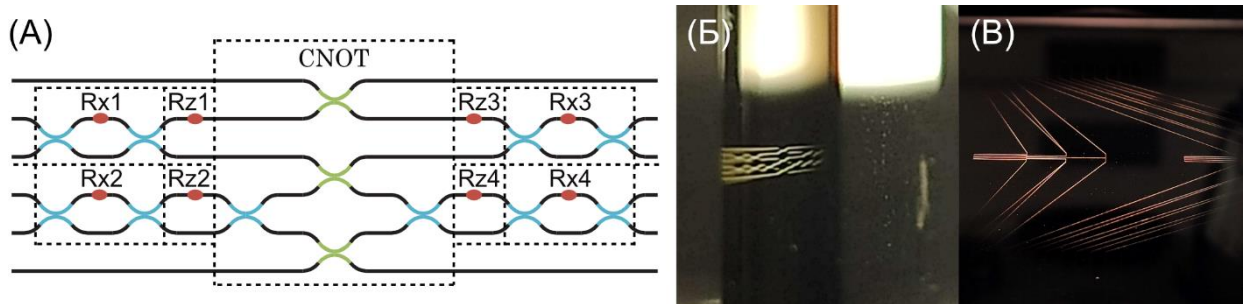


Рисунок 1 – (а) Волноводная схема интегрально-оптического чипа двухкубитного процессора. Синий и зеленый цвет направленных ответвителей обозначают коэффициенты деления 50:50 и 33:67 соответственно, красные овалы обозначают фазовращатели. (б) Фотография изготовленной волноводной структуры внутри чипа из кварцевого стекла. (в) Фотография выгравированных структур в слое нихрома, нанесенном на поверхность чипа.

Третий раздел посвящён характеристике квантового процессора. Для этого сначала была охарактеризована изготовленная волноводная структура внутри интегрально-оптического чипа с помощью непрерывного диодного лазера с длиной волны 808 нм, излучение которого по очереди заводилось во все входные каналы чипа, и шести самодельных измерителей мощности. Таким образом была измерена матрица преобразования чипа в пассивном режиме (когда не подаются токи). Применяв алгоритм Синкхорна-Кноппа [8] на измеренную матрицу, можно получить дважды стохастическую матрицу, которая является матрицей квадратов модулей унитарной матрицы интерферометра $M_{exp} = |U_{ij}|^2$. Фиделити между полученной матрицей преобразования с теоретической составила 99.18%, рассчитанное по формуле (1). Данное измерение также показало, что потери довольно однородны в схеме. Полные потери по всем входным каналам лежали в диапазоне 6.8–6,9 дБ.

Для калибровки фазовращателей лазерное излучение заводилось во входные каналы и снимались мощности со всех 6-и выходных каналов во время подачи тока на нагреватели от 0 до 1100 у.е. с шагом 10 у.е., что соответствует току от 0 до $\approx 8,6$ мА с шагом $\approx 0,078$ мА. Снятые калибровочные данные были аппроксимированы формулой

$$A + B \cos(\varphi_0 + \alpha I^2), \quad (2)$$

из которых были получены матрица воздействия нагревателей A и вектор начальных фаз $\vec{\Phi}_0$, где α_{ij} – элемент матрицы A показывает коэффициент на набег фазы на i -ом

фазовращателе φ_i при подаче тока на j -ый нагреватель, а φ_{0i} – элемент вектора $\vec{\Phi}_0$ показывает начальную фазу при нулевом токе.

Качество однокубитных гейтов $R_z(\varphi) = P(\varphi)$ и $R_x(R_1, R_2, \varphi) = U_{MZI}(R_1, R_2, \varphi)$ оценивалось как соответствие желаемой теоретической матрицы $U_t(\varphi_t)$ и экспериментально реализуемой $U_e(\varphi_e)$, и рассчитывалось как фиделити между ними $F(U_t(\varphi_t), U_e(\varphi_e))$ по формуле (1). Точность однокубитных гейтов R_z в среднем составила не менее 99,98%, а однокубитных гейтов R_x – 98,92%.

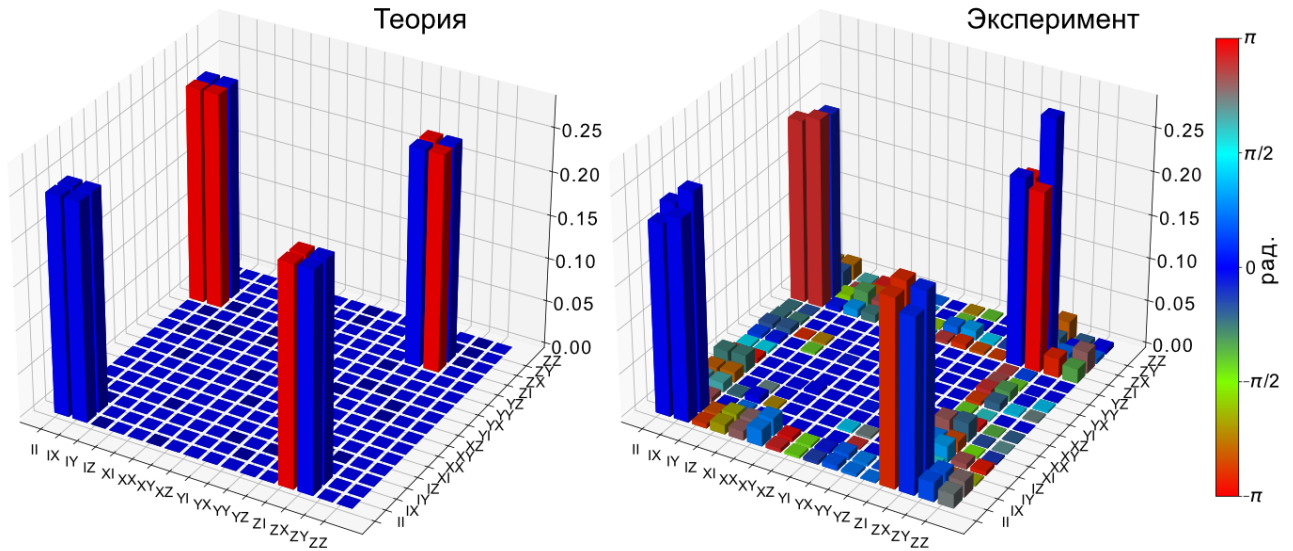


Рисунок 2 – Теоретическая хи-матрица процесса двухкубитного гейта CNOT (слева) и экспериментально полученная (справа). Фиделити между матрицами составляет $F = 97,16\%$.

Так как действие двухкубитного гейта CNOT полностью описывается хи-матрицей квантового процесса, то качество гейта было оценено сравнением экспериментально полученной хи-матрицы процесса χ_e с теоретической χ_t . Экспериментальная матрица χ_e была восстановлена процедурой квантовой томографии процесса путём восстановления хи-матрицы процесса методом максимального правдоподобия [9]. Фиделити между матрицами рассчитывалось по формуле:

$$F = \text{Tr}(\chi_t \chi_e). \quad (3)$$

Для выполнения процедуры томографии процесса два неразличимых одиночных фотона из источника СПР были заведены в процессор для инициализации логического состояния $|00\rangle$. Детекторы одиночных фотонов и старт-стоп схема регистрировали двухфотонные совпадения в различных конфигурациях. Количество совпадений, соответствующих состояниям $|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle$, за определённое время накопления обозначались как C_1, C_2, C_3, C_4 . Вероятности для преобразованного состояния с учётом искомой хи-матрицы считались как:

$$P_{s,v,r}^{target}(\vec{t}) = Tr\left(\hat{M}_{v,r}\mathcal{E}\left(\hat{\rho}_s,\chi(\vec{t})\right)\right), \quad (4)$$

в то время как экспериментальные вероятности считаются из количества совпадений как:

$$P_{s,v,r}^{exp} = \frac{C_r}{\sum_r C_r}. \quad (5)$$

Полученная экспериментальная хи-матрица процесса в сравнении с теоретической показана на рисунке 2. Фиделити между матрицами составило $F = 97,16\%$.

В **четвёртой главе** представлены результаты по экспериментальной реализации схемы генерации двухкубитного состояния с оповещением с произвольной запутанностью [10]. Первый раздел посвящен многофотонному источнику на основе квантовой точки и пространственного демультимплексора. Второй раздел посвящен исследованиям по созданию многопроходных волноводов квадратного сечения в плавленом кварце с низкими потерями на распространение и на ввод в оптическое волокно.

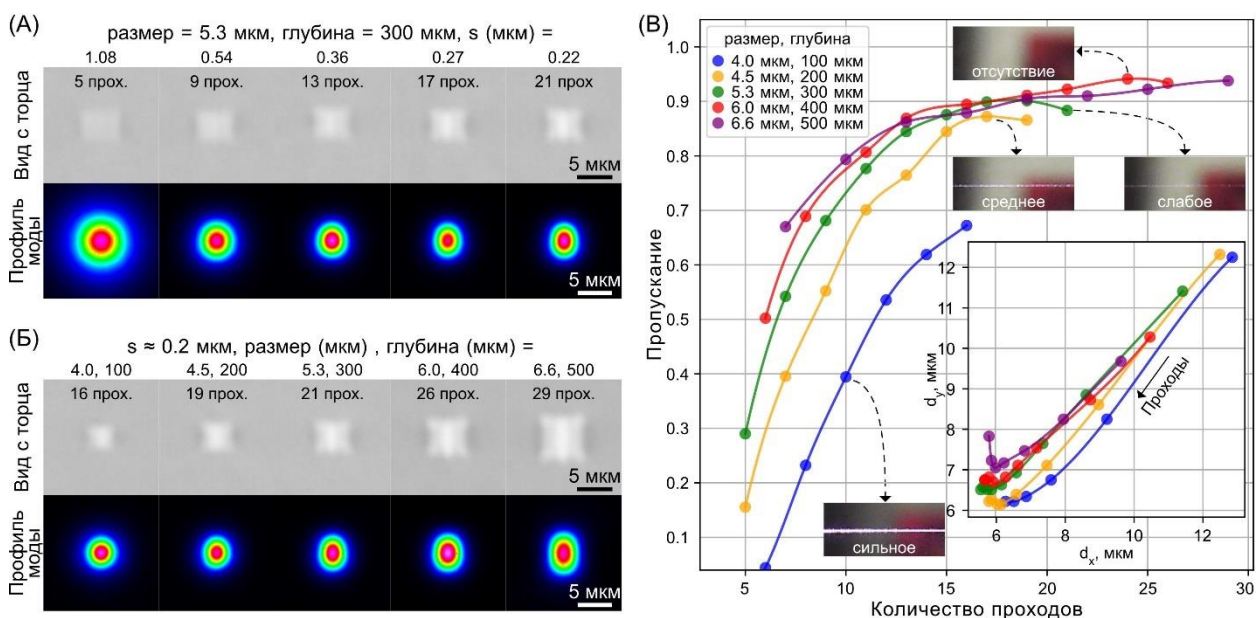


Рисунок 3 – (а) Микрофотографии торцов квадратных волноводов размером $w_m = 5.3$ мкм записанных на глубине 300 мкм с различным числом проходов, снятые в режиме ДИК-микроскопии, и соответствующие профили мод волноводов для горизонтальной поляризации. (б) Аналогичные изображения для квадратных волноводов разных размеров на соответствующих глубинах со смещениями $s \approx 0,2$ мкм. (в) Зависимость пропускания волноводов от количества проходов. В вставке показаны зависимости размеров мод (диаметры) для каждой глубины. Стрелка показывает направление увеличения числа проходов. Вставные рисунки показывают исчезновение свечения волноводов (белая линия по центру изображений) с увеличением глубины.

Сначала исследуются режимы записи волноводов с одним проходом на разных глубинах и энергиях, чтобы понять, многопроходные волноводы с какими размерами можно записать далее. Затем проводится моделирование эффективности заведения излучения из волокна в такие квадратные волноводы с реализуемыми размерами 4,0–6,5 мкм от контраста показателя преломления $\Delta n = 1-6 \times 10^{-3}$. Далее с помощью метода

многопроходного сканирования со смещением были записаны квадратные волноводы на глубинах 100, 200, 300, 400 и 500 мкм с размерами 4,0×4,0 мкм, 4,5×4,5 мкм, 5,3×5,3 мкм, 6,0×6,0 мкм и 6,6×6,6 мкм, соответственно, на образце длиной 3 см с различным числом проходов N . Для того, чтобы ширина волновода оставалась постоянной, менялось смещение между волноводами s по формуле:

$$w_m = w_s + (N - 1) \times s, \quad (6)$$

где w_m – ширина многопроходного волновода, а $w_s = 1$ мкм – ширина однопроходного волновода. Так как ширины волноводов в зависимости от глубины разные, то и диапазон количества сканов был разным и выбирался таким, чтобы смещение оставалось в диапазоне $0,2 \text{ мкм} < s < w_s = 1 \text{ мкм}$. Энергии записи E_p слегка варьировались вокруг энергий записи однопроходных пограничных волноводов 1-го режима модификации. Микрофотографии торцов квадратных волноводов размером $w_m = 5,3$ мкм, записанных на глубине 300 мкм с увеличивающимся числом проходов $N = 5 - 21$ и их соответствующие профили мод показаны на рисунке 3а. Аналогичные изображения для квадратных волноводов со смещением $s \approx 0,2$ мкм на разных глубинах 100–500 мкм с соответствующими размерами показаны на рисунке 3б.

Затем было измерено пропускание каждого волновода. Экспериментально измеренные зависимости пропускания через образец для волноводов с квадратным сечением на разных глубинах записи от количества проходов показаны на рисунке 3в. Там же на вставке показаны зависимости размеров мод с увеличением количества проходов. Заметно, что с увеличением количества проходов контраст показателя преломления растет, что приводит к уменьшению размера моды, и увеличению пропускания волноводов, как следствие улучшения согласования мод волновода и волокна. Максимальные значения пропускания оказались выше 90% (0,5 дБ потерь) для волноводов на глубине 400 мкм и 500 мкм для случаев с большим числом проходов $N > 20$ при записи. Такая величина пропускания получена несмотря на то, что размер моды в этом случае чуть больше, чем у волноводов на глубине 200 мкм, где наблюдается минимальный размер моды волноводов 5,8×6,2 мкм (в то время как у волокна 5,8×5,8 мкм), что говорит о низких потерях на распространение на глубинах 400 мкм и 500 мкм. Другим косвенным подтверждением понижения потерь на распространения является угасание свечения волновода с увеличением глубины записи (см. вставные изображения на рисунке 3в, яркая линия вдоль центра изображений – это светящийся волновод). Свечение волновода присуще волноводам во 2-ом режиме модификации, при котором происходит сильное рассеяние

распространяющегося излучения на нанорешетках, приводящее к дополнительным потерям.

Третий раздел посвящен генерации двухкубитных состояний с регулируемой степенью запутанности с оповещением, схема которой недавно теоретически была предложена в работе [10] (см. рисунок 4, фон с голубым оттенком). При заведении в схему четырех одиночных фотонов в фоковском состоянии $|\phi_{in}\rangle = |11101\rangle_f$ генерируется следующее двухкубитное состояние в базисе двух мод в первых четырех выходных модах, когда два фотона регистрируются в пятой выходной моде:

$$|\Phi(\alpha)\rangle = \cos \alpha |00\rangle + \sin \alpha |11\rangle,$$

где α – параметр, контролирующий степень запутанности. Вероятность генерации состояния определяется выражением:

$$p(\alpha) = \frac{1}{6(1 + \sin^2(\alpha))}, \quad (0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{4}). \quad (7)$$

Параметр α выставляется, используя внутренний фазовращатель θ_α входного интерферометра Маха-Цендера, который действует как светоделитель с регулируемым пропусканием:

$$T(\alpha) = \frac{1}{1 + 2 \tan^2 \alpha}. \quad (8)$$

Для оценки качества генерируемых состояний на логические моды были добавлены интерферометры Маха-Цендера для выполнения однокубитных проекционных измерений для томографии квантового состояния (см. рисунок 4, фон с зеленым оттенком).

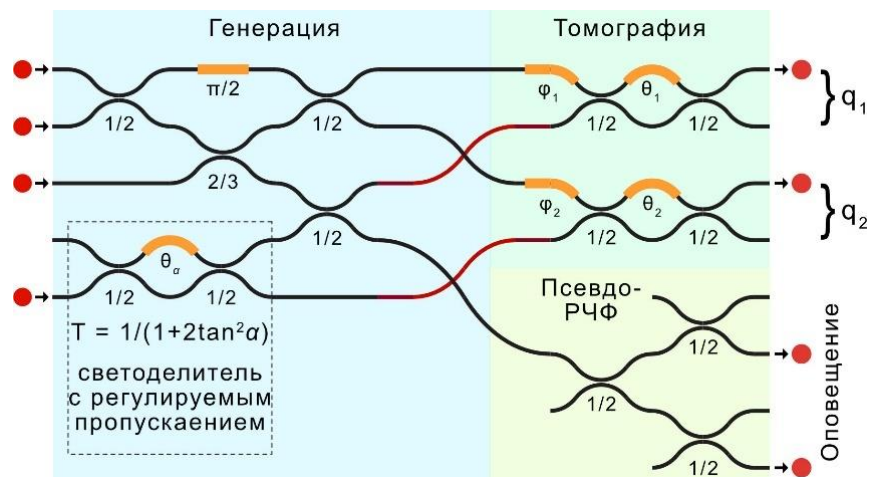


Рисунок 4 – Линейно-оптическая схема для генерации двухкубитных запутанных состояний с оповещением (фон с голубым оттенком). Под светоделителями и фазовращателями указаны коэффициенты пропускания и фазы соответственно.

В силу того, что имеющиеся детекторы одиночных фотонов были без разрешения по числу фотонов (РЧФ), пятая выходная мода, для которой нужно было зарегистрировать два фотона для оповещения, была разделена каскадом из трех сбалансированных

светодетекторов на четыре моды. При подключении детекторов на каждый из них, реализуется псевдо-РЧФ детектирование (см. рисунок 4, фон с желтым оттенком).

С помощью разработанного режима фемтосекундной лазерной записи волноводов с многократным сканированием с низкими потерями был создан набор из пяти 8-канальных интегрально-оптических структур в образце кварцевого стекла длиной 5 см. Волноводы были записаны фемтосекундными импульсами второй гармоники волоконного иттербиевого лазера на длине волны 515 нм, длительностью 270 фс, с энергией 47 нДж и частотой 1 МГц, сфокусированными с помощью асферической линзы с числовой апертурой $NA = 0,55$ на глубине 15 мкм под поверхностью образца. Волноводы получены в результате многократного ($N = 21$) сканирования со смещением $s = 0,2$ мкм, которые записывались со скоростью 4 мм/с.

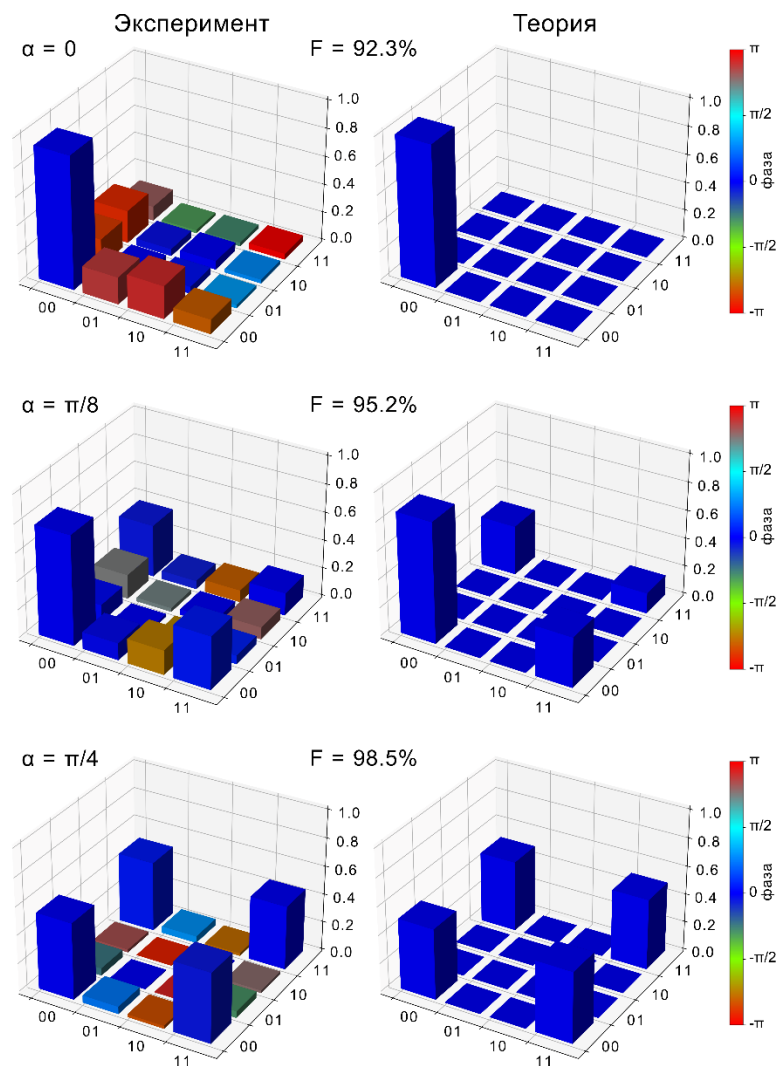


Рисунок 5 – Реконструированные матрицы плотности сгенерированных состояний для трех значений параметра $\alpha = 0, \pi/8$ и $\pi/4$ (слева) и их теоретические аналоги (справа). Соответствующие фиделити между ними показаны сверху.

Чтобы продемонстрировать способность схемы генерировать двухкубитные состояния с регулируемой степенью запутанности, были выбраны три значения параметра

$\alpha = 0, \pi/8$ и $\pi/4$, соответствующие факторизованному состоянию $|00\rangle$, частично запутанному состоянию и максимально запутанному состоянию Белла $\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle)$. Для всех трех значений $\alpha = 0, \pi/8$ и $\pi/4$ были выставлены необходимые фазы $\theta_{\pi/2}, \theta_{\alpha} = (0,44\pi; 0,03\pi), (0,57\pi; -0,27\pi), (0,54\pi; -0,56\pi)$, и проводилась томография квантового состояния и восстанавливалась матрица плотности генерируемого состояния $\rho_{exp} = |\psi_{Gen}\rangle\langle\psi_{Gen}|$. Полученные матрицы плотности сгенерированных состояний для трех значений параметра $\alpha = 0, \pi/8$ и $\pi/4$ и их идеальные теоретические аналоги показаны на рисунке 5. Полученные фиделити между ними представлены сверху, где фиделити F определялось как:

$$F(\rho_{exp}, \rho_{th}) = \left(\text{Tr} \sqrt{\sqrt{\rho_{exp}} \rho_{th} \sqrt{\rho_{exp}}} \right)^2. \quad (9)$$

Видно, что фиделити растёт с увеличением α и достигает величины $F = 98,5\%$ для состояния Белла. Дополнительно была оценена общая эффективность установки из анализа частоты четырёхфотонных событий во время эксперимента во всех конфигурациях. Было получено значение $p = 1,45\%$, которое включает в себя эффективности сбора излучения из квантовой точки в волокно, демультиплексора и интегрально-оптического чипа, включая эффективность заведения излучения из волоконного массива в чип, и регистрации фотонов на сверхпроводящих детекторах. Чтобы оценить эффективность оповещения, успешные события были разделены на сумму всех событий, где два фотона были зарегистрированы в каналах оповещения, и было получено значение $p_2 = 8,3 \pm 3,2 \times 10^{-5}$. В конце приводится сравнение достигнутой частоты совпадений многофотонных событий и точности сгенерированного состояния Белла с другими работами по генерации ресурсных состояний.

В **пятой главе** экспериментально продемонстрировано создание светоделительных элементов в кристалле $\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$ на основе волноводов с депрессированной оболочкой. В первом разделе производится выбор режима для записи одиночного трека, а также оптимальных параметров депрессированной оболочки одномодового волновода. Вместо симметричного гауссового пучка была использована методика астигматической фокусировки [11,12], где перетяжка по направлению сканирования была растянута в 3,3 раза. Это было достигнуто сжатием фокусируемого пучка с помощью цилиндрического телескопа 10:3, который устанавливался перед фокусирующей линзой. Трек, записанный при энергии импульса 450 нДж и имеющий размеры поперечного сечения $a = 2$ мкм и $b = 8$ мкм, был выбран для создания волноводов с депрессированной оболочкой. Затем был записан ряд волноводов с различными диаметрами сердцевины (с 12 до 32 мкм с шагом 4 мкм) и плотностью оболочки $\rho = D/K$ (определенный как отношение диаметра сердцевины

на количество треков в оболочке). Далее измерены вносимые потери (включаются потери на ввод, на распространение и на изгиб) на длине волны 810 нм. Волноводы поддерживали обе ортогональные Н и V поляризации и вносимые потери не зависели от них. С увеличением диаметра сердцевины волновода вносимые потери падали, но волновод становился многомодовым (см. рисунок 6а). Также вносимые потери падали с увеличением плотности оболочки (см. рисунок 6б) из-за уменьшения вытекания моды. В качестве оптимальных параметров оболочки для одномодового волновода с минимальными потерями были выбраны диаметр $D = 16$ мкм и количество треков $K = 18$ (плотность оболочки $\rho = 0,89$ мкм).

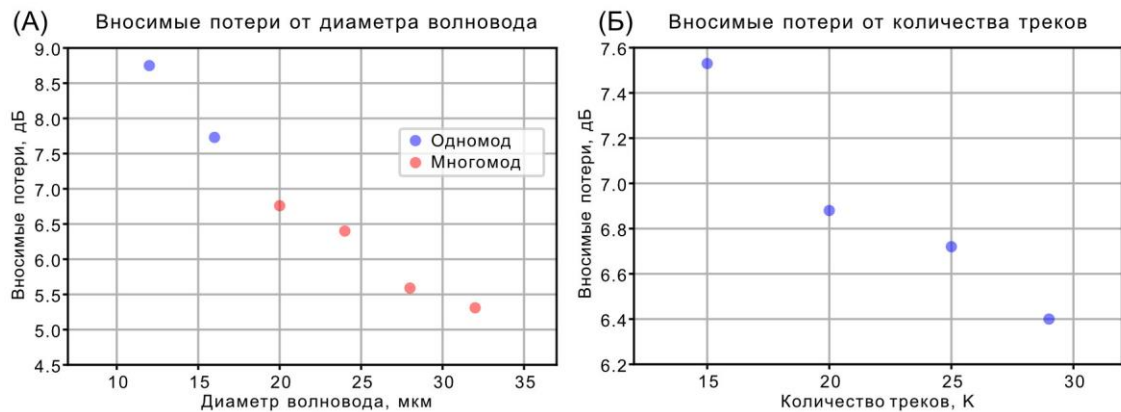


Рисунок 6 – (а) Вносимые потери волноводов с разным диаметром. Количество треков в оболочке варьировалось так, чтобы плотность оболочки оставалась фиксированным $\rho \approx 0.86$ мкм для всех волноводов. (б) Зависимость вносимых потерь от количества треков в оболочке с фиксированным диаметром $D = 24$ мкм.

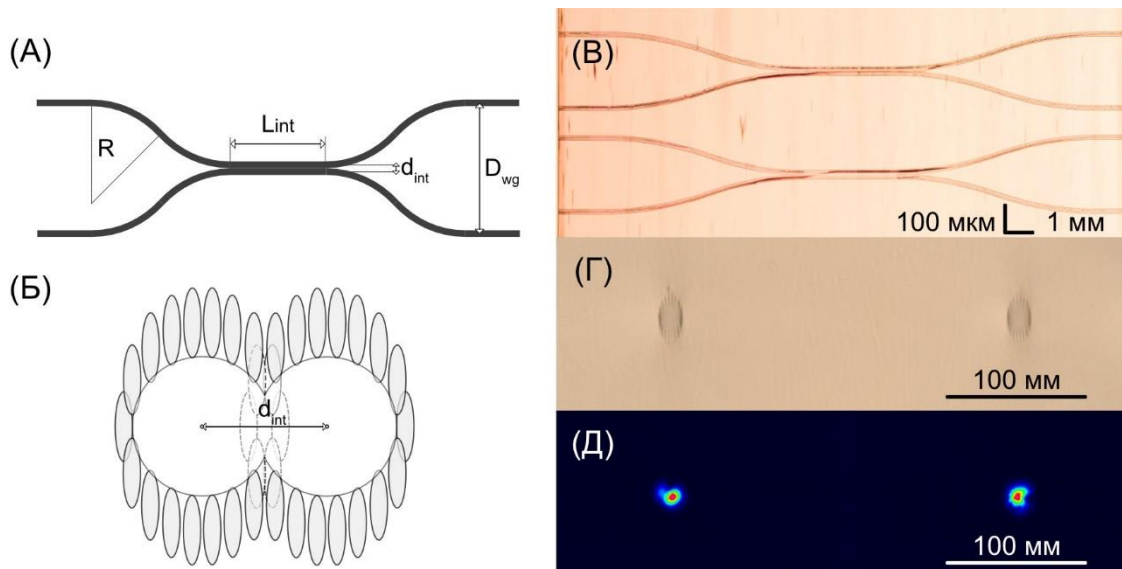


Рисунок 7 – (а) Геометрия направленного ответвителя 2×2 . (б) Схематическое изображение среза области взаимодействия, где несколько треков оболочки пропущены. (в) Микрофотография направленного ответвителя 2×2 (вид сверху), изображение получено путем склеивания нескольких фотографий один за другим. (г) Микрофотография торца направленного ответвителя 2×2 . (д) Картина распределения интенсивности на выходе ответвителя 2×2 с коэффициентом деления 48:52.

Второй раздел посвящен решению проблемы малой связи в волноводах с депрессированной оболочкой, а также созданию 2D 2×2 , 1×2 и 3D 3×3 направленных ответвителей. Направленный ответвитель 2×2 состоял из двух волноводов, которые начинаются на расстоянии $D_{wg} = 250$ мкм, сходятся на протяжении длины взаимодействия $L_{int} = 3$ мм на близкое расстояние d_{int} , а потом волноводы обратно расходятся (см. рисунок 7а). Расстояние $D_{wg} = 250$ мкм было выбрано для согласования ответвителя со стандартными массивами волокон, где волокна лежат на v-образных канавках на расстоянии как раз 250 мкм. Радиус кривизны остался таким же $R = 100$ мм, как и в ранее записанных волноводах. В области зоны взаимодействия между волноводами возникает связь и происходит перекачка излучения. Первым делом был записан ответвитель на минимально возможном расстоянии между волноводами d_{int} равной диаметру волноводов $D = 16$ мкм. При заведении излучения в один из каналов перекачки излучения не было обнаружено и было решено пропускать треки при записи (выключать лазерное излучение) в области пересечения оболочек и одновременно сближать расстояние между волноводами. Схематическое изображение среза области взаимодействия показано на рисунке 7б.

Направленный ответвитель с близким к сбалансированному делению 48:52, который наиболее интересен с точки зрения практического применения, был получен при расстоянии между волноводами $d_{int} = 14$ мкм и при 5 пропущенных треков в оболочках волноводов. При этом оцененная величина коэффициента связи была равна $C = 2,7 \text{ см}^{-1}$, что в 4 раза выше, чем у направленного ответвителя, записанного в ниобате лития [13]. Микрофотографии элементов (вид сверху и вид с торца), а также картина распределения интенсивностей на выходе с ответвителя, близкого к сбалансированному, показаны на рисунке 7в–д. Средние вносимые потери на элемент составили 7,8 дБ. Аналогичным образом были сделаны направленные ответвители 1×2 и 3×3 , суммарные вносимые потери в которых составили 6,1 дБ и 8,6 дБ, соответственно.

В шестой главе теоретически исследуется архитектура перестраиваемого интерферометра на основе решеток прямых волноводов. В первом разделе описывается предлагаемая архитектура и выводится её матрица преобразования. Перестройку интерферометра предлагается осуществить путем регулировки постоянной распространения отдельных волноводов. Предлагаемая архитектура N -канального интерферометра на основе решеток волноводов показана на рисунке 8. Решетка волноводов состоит из N связанных волноводов с постоянной связью между соседними волноводами C . Каждый волновод разделен на $N - 1$ участков равной длины l , где постоянная распространения может регулироваться на малую величину δ_{mj} относительно постоянной

распространения волноводов β_0 , а постоянная распространения последнего волновода не регулируется и равна β_0 .

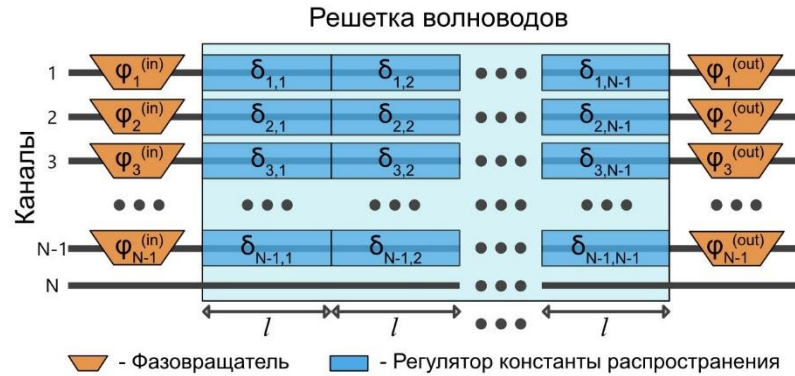


Рисунок 8 – Предлагаемая архитектура N -канального интерферометра на основе решеток волноводов, состоящих из N связанных волноводов с постоянным коэффициентом связи C между соседними волноводами.

Во втором разделе предлагаемая архитектура тестируется методами численной оптимизации на качество выполнения заданных преобразований: унитарных матриц случайных по Хаару, дискретному преобразованию Фурье (ДПФ). На рисунке 9 приведены результаты процедуры численной оптимизации. Гистограммы наименьших достигнутых инфиделити между матрицами U_0 и U при разных размерах матриц N показаны слева.

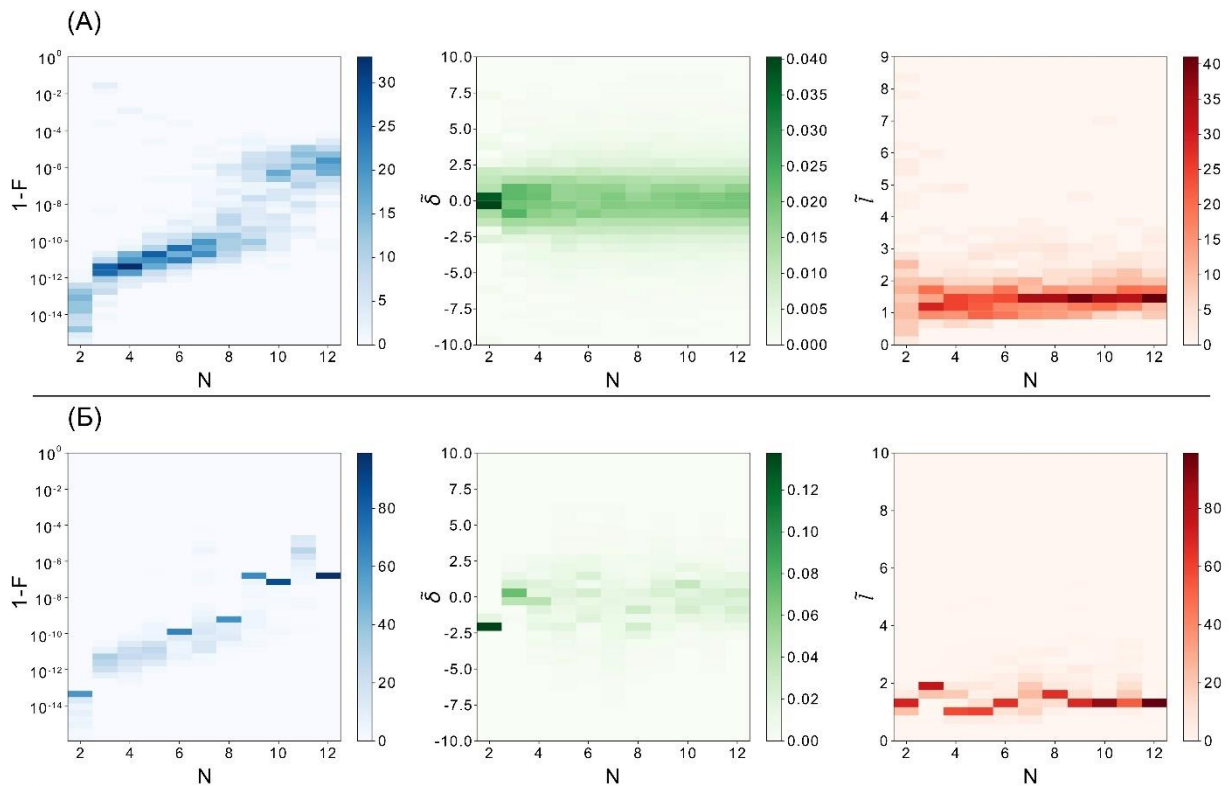


Рисунок 9 – Гистограммы инфиделити между матрицами U_0 и U (слева), безразмерных величин константы распространения $\tilde{\delta}_{mj}$ (в центре) и длины слоя \tilde{l} (справа) для различных целевых матриц: (а) набор из 100 случайных по Хаару унитарных матриц для каждого N , (б) 100 запусков для матриц ДПФ.

В третьем разделе производится анализ полученных результатов тестирования и даются рекомендации для возможной экспериментальной реализации с использованием доступных в настоящее время технологий интегральной оптики.

В **заключении** приводятся основные научные результаты, которые состоят в следующем:

1. Изготовлен интегрально-оптический чип из кварцевого стекла программируемого двухкубитного линейно-оптического квантового процессора с помощью технология фемтосекундной лазерной записи. Проведена оценка точности операций, которая показала, что среднее фиделити однокубитных гейтов R_x составляет 99,45%, гейтов R_z составляет 99,98%, двухкубитного гейта CNOT – 97,16%.
2. Разработан режим фемтосекундной лазерной записи волноводов с применением метода многопроходного сканирования на основе первого режима модификации в кварцевом стекле с низкими потерями на согласования с одномодовым волокном Nufern PM780-HP 0,2 дБ/торец и потерями на распространение 0,07 дБ/см на длине волны 920 нм.
3. Экспериментально реализована схема генерации двухкубитных запутанных состояний с оповещением с различной степенью запутанности от сепарабельного состояния с фиделити 92,3% до максимально запутанного состояния Белла с фиделити 98,5%.
4. Продемонстрировано решение проблемы малой связи между волноводами с депрессированной оболочкой путем пропускания записи нескольких треков оболочек волноводов в области взаимодействия. Такой подход позволил увеличить коэффициент связи между двумя волноводами с депрессированной оболочкой до $2,7 \text{ см}^{-1}$ и создать направленные ответвители 2×2 , 1×2 и 3×3 на основе волноводов с депрессированной оболочкой в кристалле $\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$.
5. Предложена архитектура многоканального интерферометра на основе прямых решеток связанных волноводов, где перестройка интерферометра осуществляется путем регулировки константы распространения участков отдельных волноводов. Предложенная архитектура была протестирована на качество выполнения заданных унитарных преобразований, среди которых были случайные по Хаару унитарные матрицы, дискретное преобразование Фурье, матрицы Адамара и матрицы перестановки.

Статьи по теме диссертации, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук

1. N.N. Skryabin, I.V. Kondratyev, I.V. Dyakonov, O.V. Borzenkova, S.P. Kulik, S.S. Straupe. Two-qubit quantum photonic processor manufactured by femtosecond laser writing // *Applied Physics Letters* – 2023. – Vol. 122, № 12. – p. 121102, Импакт-фактор 3,6 (JIF) / 0.4375 п.л. / вклад соискателя: 40%, EDN: BFMPSR.
2. M.V. Rakhlin, A.I. Galimov, I.V. Dyakonov, N.N. Skryabin, G.V. Klimko, M.M. Kulagina, Yu.M. Zadiranov, S.V. Sorokin, I.V. Sedova, Yu.A. Guseva, D.S. Berezina, Yu.M. Serov, N.A. Maleev, A.G. Kuzmenkov, S.I. Troshkov, K.V. Taratorin, A.K. Skalkin, S.S. Straupe, S.P. Kulik, T.V. Shubina, A.A. Toropov. Demultiplexed single-photon source with a quantum dot coupled to microresonator // *Journal of Luminescence* – 2023. – Vol. 253. – p. 119496, Импакт-фактор 3,6 (JIF) / 0.3125 п.л. / вклад соискателя: 10%, EDN: GKVXKB.
3. N.N. Skryabin, S.A. Zhuravitskii, I.V. Dyakonov, S.S. Straupe, A.A. Kalinkin, S.P. Kulik. Femtosecond-laser-written low-loss multiscan waveguides in fused silica // *Physical Review Applied* – 2024. – Vol, № 6. – p. 064079. Импакт-фактор 4,4 (JIF) / 0.8125 п.л. / вклад соискателя: 80%, EDN: NYUKIO.
4. N.N. Skryabin, I.V. Dyakonov, M.Yu. Saygin, S.P. Kulik. Waveguide-lattice-based architecture for multichannel optical transformations // *Optics Express* – 2021. – Vol. 29, № 16. – p. 26058–26067, Импакт-фактор 3,3 (JIF) / 0.625 п.л. / вклад соискателя: 60%, EDN: XVEBNU.
5. N.N. Skryabin, A.A. Kalinkin, I.V. Dyakonov, S.P. Kulik. Femtosecond Laser Written Depressed-Cladding Waveguide 2×2 , 1×2 and 3×3 Directional Couplers in Tm^{3+} :YAG Crystal // *Micromachines* – 2020. – Vol. 11, № 1. – p. 26058, Импакт-фактор 3,0 (JIF) / 0.75 п.л. / вклад соискателя: 60%, EDN: FMABPD.

Литература

1. Politi A. и др. Silica-on-Silicon Waveguide Quantum Circuits // *Science* (1979). American Association for the Advancement of Science, 2008. Т. 320, № 5876. С. 646–649.
2. Politi A., Matthews J.C.F., O'Brien J.L. Shor's Quantum Factoring Algorithm on a Photonic Chip // *Science* (1979). American Association for the Advancement of Science, 2009. Т. 325, № 5945. С. 1221.
3. Marshall G.D. и др. Laser written waveguide photonic quantum circuits // *Opt Express*. Optica Publishing Group, 2009. Т. 17, № 15. С. 12546–12554.
4. Sansoni L. и др. Polarization Entangled State Measurement on a Chip // *Phys Rev Lett*. American Physical Society, 2010. Т. 105, № 20. С. 200503.
5. Crespi A. и др. Integrated photonic quantum gates for polarization qubits // *Nat Commun*. 2011. Т. 2, № 1. С. 566.
6. Hong C.K., Ou Z.Y., Mandel L. Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference // *Phys Rev Lett*. American Physical Society, 1987. Т. 59, № 18. С. 2044–2046.
7. Ralph T.C. и др. Linear optical controlled-NOT gate in the coincidence basis // *Phys Rev A*. 2002. Т. 65, № 6.
8. Knight P.A. The Sinkhorn–Knopp Algorithm: Convergence and Applications // *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2008. Т. 30, № 1. С. 261–275.
9. Baumgratz T. и др. A scalable maximum likelihood method for quantum state tomography // *New J Phys*. IOP Publishing, 2013. Т. 15, № 12. С. 125004.
10. Fldzhyan S.A., Saygin M.Yu., Kulik S.P. Programmable heralded linear optical generation of two-qubit states // *Phys Rev Appl*. American Physical Society, 2023. Т. 20, № 5. С. 54030.
11. Okhrimchuk A.G. и др. Waveguide-saturable absorber fabricated by femtosecond pulses in YAG:Cr⁴⁺ crystal for Q-switched operation of Yb-fiber laser // *Opt Lett*. Optica Publishing Group, 2009. Т. 34, № 24. С. 3881–3883.
12. Cerullo G. и др. Femtosecond micromachining of symmetric waveguides at 1.5 μm by astigmatic beam focusing // *Opt Lett*. Optica Publishing Group, 2002. Т. 27, № 21. С. 1938–1940.
13. Zhang Q. и др. Reconfigurable directional coupler in lithium niobate crystal fabricated by three-dimensional femtosecond laser focal field engineering // *Photonics Res*. Optica Publishing Group, 2019. Т. 7, № 5. С. 503–507.