

ОТЗЫВ официального оппонента
о диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук Скрябина Николая Николаевича
на тему: «Элементы линейно-оптических квантовых вычислений на
основе интегрально-оптических чипов»
по специальности 1.3.19. Лазерная физика

Актуальность темы.

Диссертационная работа Скрябина Н.Н. посвящена теме линейно-оптических квантовых вычислений, где применяются одиночные фотоны, линейный интерферометр, состоящий из светоделителей и фазовращателей, и детекторы фотонов. Интерферометры, которые выполняют основное преобразование, могут быть реализованы в виде интегрально-оптических чипов, что является весьма важным шагом для создания полномасштабных квантовых компьютеров. При этом особенно важно адекватно охарактеризовать точность выполняемых операций и приготавливаемых состояний. Кроме того, в многофотонных экспериментах потери в чипах становятся существенным ограничивающим фактором, поэтому оптимизация технологии изготовления чипов и разработка более компактных архитектур интерферометров с точки зрения уменьшения потерь является не менее важной задачей. Таким образом, актуальность выбранной темы не вызывает сомнений.

Общая характеристика и содержание работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка работ автора и списка литературы. Общий объем работы составляет 167 страниц, включая 65 рисунков и 16 таблиц. Список литературы содержит 178 источников.

Первая глава содержит вводную информацию по теме линейно-оптических квантовых вычислений с акцентом на реализацию элементов с помощью интегральной оптики, а также обзор литературы по технологии фемтосекундной лазерной записи и проведению квантово-вычислительных экспериментов на основе чипов, изготовленных по данной технологии.

Во второй главе приведены описания экспериментальных установок, а также рассматриваются используемые материалы и методы проведения экспериментов, в том числе для томографии квантовых состояний и квантовых процессов.

Третья глава посвящена изготовлению и характеристике программируемого двухкубитного линейно-оптического квантового процессора. Точность выполнения пассивного преобразования интегрально-оптического чипа, изготовленного по технологии фемтосекундной лазерной записи в кварцевом стекле, была оценена через матрицу квадратов модулей унитарной матрицы интерферометра и составила 99,18%. Качество однокубитных гейтов оценивалось как соответствие желаемой теоретической матрицы и экспериментально реализуемой. Точность однокубитных гейтов R_z в среднем составила не менее 99,98%, а однокубитных гейтов R_x – 98,92%. Для оценки качества двухкубитного гейта CNOT была проведена процедура полной томографии процесса с использованием двух неразличимых одиночных фотонов из источника на основе СПР. Фиделити между полученной экспериментально хи-матрицей процесса и теоретической составило 97,16%.

В четвёртой главе представлены результаты по экспериментальной реализации схемы генерации двухкубитного состояния с оповещением с произвольной запутанностью. Для этого использовалась недавно теоретически предложенная схема и четыре неразличимых фотона из источника на основе квантовой точки. Для изготовления подходящего интерферометра специально был разработан режим записи волноводов с низкими потерями. Генерация состояний продемонстрирована для трех разных степеней запутанности – от сепарабельного состояния с фиделити 92,3% до максимально запутанного состояния Белла с фиделити 98,5%.

Пятая глава посвящена разработке волноводов и различных делителей в кристалле ИАГ для целей создания ячейки квантовой памяти на основе фотонного эха. 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 .

В шестой главе теоретически исследуется архитектура перестраиваемого интерферометра на основе решеток прямых волноводов, где возможна перестройка постоянной распространения отдельных волноводов. Предложенная архитектура была протестирована на качество выполнения заданных унитарных преобразований, среди которых были случайные по мере Хаара унитарные матрицы, дискретное преобразование Фурье, матрицы Адамара и матрицы перестановок.

В заключении автор подводит итоги проведенных исследований и приводит основные результаты диссертационной работы.

Степень обоснованности положений, выносимых на защиту, и выводов работы

Защищаемые положения и выводы работы являются в достаточной мере обоснованными. Они напрямую следуют из результатов, полученных экспериментально и с использованием численных расчетов.

Достоверность и новизна результатов

Все результаты были получены с использованием современного оборудования и надежных измерительных методов, и обладают высокой степенью новизны. Достоверность и новизна результатов подтверждается публикациями в пяти высокорейтинговых (с импакт- фактором более 3.0) рецензируемых журналах и докладами на тематических конференциях.

Замечания по пунктам.

1. В формулу (1.45) для фиделити в разделе 1.2.8 (стр. 37) входят элементы унитарных матриц, задающие соответствующие амплитуды вероятностей переходов. В тоже время в конце раздела 2.4.5 (стр. 63) говорится, что эта же формула применяется и для матриц, составленных из соответствующих вероятностей переходов. Насколько корректно применять для матриц вероятностей ту же формулу, что и для амплитуд вероятностей?
2. В главе 3 при оценке качества однокубитных гейтов учитывается только неточность выставления фазы из-за дискретности тока, а неточность определения коэффициента пропорциональности α и коэффициентов деления светоделителей не учитывается.
3. Фиделити, получаемые экспериментально, основаны на случайных статистических выборочных значениях и, таким образом, сами являются случайными величинами, которые имеют соответствующие статистические разбросы. Однако, в главе 3 при оценке качества двухкубитного гейта CNOT, а также в главе 4 при оценке качества приготавливаемых состояний полученные экспериментальные результаты для фиделити указаны без каких-либо статистических разбросов.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационной работы. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московский государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.19. Лазерная физика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.

Ломоносова, и оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Скрябин Николай Николаевич безусловно заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник лаборатории физики квантовых компьютеров ОФТИ им. К.А. Валиева НИЦ «Курчатовский институт», доктор физ.-мат. наук по специальности 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы, комплексы программ

Ю.И. Богданов

28.04.2026

Юрий Иванович Богданов

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Лаборатория физики квантовых компьютеров Отделения физико-технологических исследований имени К.А. Валиева Центра перспективной микроэлектроники, главный научный сотрудник.

Адрес: 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д.1

Телефон: +7(499)129-63-66

E-mail: lab_phys_quant_comp@mail.ru

Подпись Ю.И. Богданова заверяю

Заместитель дире
НИЦ «Курчатовс

Алексеева О.А.