ОТЗЫВ

научного руководителя, кандидата физ.-мат. наук С.С. Страупе на диссертационную работу Кузьмина Сергея Сергеевича «Методы машинного обучения для характеризации квантовых состояний и программирования линейно-оптических интерферометров», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Диссертационная работа С.С. Кузьмина выполнена на кафедре квантовой электроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Научной работой на кафедре Сергей Кузьмин начал заниматься ещё на втором курсе бакалавриата и последовательно развивал её в период обучения в аспирантуре. Тематика его диссертации связана с одной из наиболее актуальных задач современной квантовой оптики и квантовых технологий – разработкой эффективных методов характеризации квантовых состояний и программирования сложных линейно-оптических устройств. В последние годы квантовые технологии быстро продвигаются от лабораторных демонстраций к созданию масштабируемых и программируемых физических платформ для обработки информации. Среди таких платформ важное место занимают линейно-оптические интерферометры и интегральные фотонные схемы, используемые для реализации многомодовых квантовых преобразований, задач фотонных вычислений, генерации и анализа сложных квантовых состояний. Однако практическое использование таких систем связано с рядом фундаментальных и инженерных трудностей. С одной стороны, программирование реальных интерферометрических схем осложняется технологическими отклонениями, потерями, паразитными связями и дрейфами параметров, из-за чего аналитические процедуры настройки, известные для идеализированных архитектур, часто оказываются недостаточными. С другой стороны, задача полной характеризации квантовых состояний стандартными томографическими методами требует ресурсов, растущих экспоненциально с размером системы, что существенно ограничивает применимость традиционных подходов в устройствах промежуточного масштаба. Именно на решение этих проблем направлена диссертационная работа С.С. Кузьмина. В ней методы машинного обучения и современные подходы к параметризации сложных квантовых систем используются для решения двух задач: построения цифровых моделей реконфигурируемых линейно-оптических интерферометров и эффективного описания многокубитных квантовых состояний по ограниченному набору измерительных данных.

Первая глава диссертации носит обзорный характер и содержит детальное изложение теоретических и экспериментальных основ, необходимых для последующего рассмотрения оригинальных результатов. В ней обсуждаются математическое описание линейно-оптических интерферометров, стандартные архитектуры универсальных многомодовых схем, технологии их изготовления, а также методы томографии реализуемых преобразований. Этот материал не только даёт необходимый контекст, но и ясно подводит к формулировке задач, решаемых в последующих главах. Во второй главе диссертации рассматривается задача обучения цифровой модели реконфигурируемого линейно-оптического интерферометра по экспериментальной выборке, состоящей из пар «управляющие параметры – реализуемое унитарное преобразование». Автором предложен архитектурно-независимый подход, основанный на представлении интерферометра в виде

чередования фиксированных модосмешивающих блоков и диагональных фазовых слоёв. Для используемого функционала невязки получены аналитические выражения для градиентов по параметрам модели, что позволило применять эффективные градиентные методы оптимизации. Важным достоинством этого подхода является то, что он не требует наличия явной аналитической процедуры декомпозиции целевого преобразования в параметры конкретной физической схемы и потому применим к широкому классу программируемых фотонных устройств. В третьей главе эти идеи получают дальнейшее развитие. Автором предложена и исследована эффективная параметризация цифровой модели интерферометра, использующая признаковое описание модосмешивающих элементов, в котором модель интерферометра сводится к линейной. В работе детально исследованы различные режимы оптимизации, а также показано, что предложенные алгоритмы пригодны для работы с интерферометрическими схемами сложной структуры. Существенно, что развитые в диссертации методы были не только исследованы численно, но и использованы при обработке экспериментальных данных для реального фотонного процессора. Четвёртая глава диссертации носит в основном теоретический и обзорный характер и посвящена современным подходам к компактному описанию сложных квантовых состояний с использованием тензорных сетей. В ней рассматриваются основные идеи и математический аппарат тензорно-сетевых представлений, а также обсуждаются их возможности для параметризации многокубитных состояний. Тем самым четвёртая глава подготавливает теоретическую основу для оригинальных результатов, представленных далее. Пятая глава содержит оригинальные результаты диссертационной работы, связанные с применением методов машинного обучения к задаче характеризации многокубитных квантовых состояний. В этой части работы автор рассматривает обучение тензорно-сетевой модели квантового состояния по данным факторизованных однокубитных измерений. Предложенный подход позволяет по ограниченному набору измерений строить предиктор для вероятностей исходов новых измерений, не прибегая к полному восстановлению матрицы плотности. Особый интерес представляет продемонстрированное в работе благоприятное масштабирование необходимого объёма обучающих данных с числом кубитов в рассмотренных сценариях. Полученные результаты представляют значительный интерес в контексте задач верификации, бенчмаркинга и эффективной характеризации квантовых устройств промежуточного масштаба.

Представленные в диссертации результаты обладают как научной новизной, так и практической значимостью. К числу наиболее важных результатов работы следует отнести разработку архитектурно-независимого алгоритма обучения цифровой модели линейно-оптического интерферометра, разработку более эффективной признаковой модели для его программирования, а также применение методов машинного обучения и тензорных сетей к задаче предсказания результатов измерений многокубитных квантовых состояний по ограниченным экспериментальным данным. Все эти результаты соответствуют современному мировому уровню исследований в области квантовой оптики, квантовой информатики и фотонных квантовых технологий. Высокий уровень работы подтверждается публикацией основных результатов в авторитетных международных журналах, включая Optics Express, Physical Review A и Physical Review Applied. Результаты диссертации прошли апробацию на ряде российских и международных конференций, в том числе HOLOEXPO, ICQT и других научных мероприятиях, а также неоднократно докладывались на научных семинарах кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ и Российского квантового центра.

Следует особо отметить личный вклад С.С. Кузьмина в выполненную работу. Сергей Сергеевич принимал непосредственное участие в постановке задач, разработке математических моделей и алгоритмов, их программной реализации, выполнении численных симуляций, обработке и анализе экспериментальных данных. В ходе работы над диссертацией он проявил себя как зрелый и самостоятельный исследователь, обладающий высоким уровнем теоретической, математической и вычислительной подготовки. Важной чертой Сергея Сергеевича является умение соединять фундаментальное понимание физических задач с современными методами вычислительного моделирования и анализа данных. Он хорошо ориентируется как в вопросах квантовой оптики и теории квантовых измерений, так и в методах машинного обучения, применяя их строго, содержательно и с хорошим пониманием границ применимости соответствующих моделей. Можно с уверенностью сказать, что за время выполнения диссертационной работы он сформировался как полностью самостоятельный исследователь, способный ставить и решать актуальные исследовательские задачи на высоком профессиональном уровне.

Диссертация С.С. Кузьмина рекомендуется к защите по специальности 1.3.19. Лазерная физика (физико-математические науки).

Кандидат физ.-мат. наук,

с.н.с. Центра квантовых технологий 22.06.2026

физического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова С.С. Страупе

Подпись С.С. Страупе заверяю

Учёный секретарь Учёного совета

физического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова, доцент С.Ю. Стремоухов