

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Белинского Леонида Владимировича «Разработка методов и алгоритмов высокоточной томографии квантовых состояний», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Диссертационная работа Л.В. Белинского посвящена методам статистического восстановления квантовых состояний и процессов на основе экспериментальных данных. Используемые методы носят достаточно общий характер, но основная часть работы посвящена решению конкретных задач, связанных со спецификой обработки данных в реальных квантово-оптических экспериментах. В частности, рассмотрены эксперименты по генерации поляризационных трёхфотонных состояний в средах с кубической нелинейностью, преобразования поляризационных состояний в средах с дисперсией и эксперименты по восстановлению квантового состояния оптического поля при помощи квадратурных измерений.

Актуальность работы не вызывает сомнений. В последнее время квантовые технологии обработки информации претерпевают бурный расцвет. Усилия большого количества экспериментальных групп и технологических лабораторий направлены на создание прототипов квантовых вычислительных систем. Такие прототипы создаются на основе физических систем различной природы, однако совершенно очевидно, что вне зависимости от конкретной реализации методы отладки и оптимизации квантовых логических вентилей неизбежно будут основаны на процедуре квантовой томографии. Требования, предъявляемые к отдельным компонентам элементной базы будущих квантовых компьютеров, чрезвычайно высоки и находятся на грани возможностей современной технологии. В связи с этим экспериментаторам и разработчикам особенно важно иметь в своем распоряжении методы измерения и анализа, обеспечивающие максимально возможную точность восстановления параметров квантового состояния или квантового процесса и наиболее полно использующие информацию, заложенную в конечной выборке экспериментальных данных. Именно этим вопросам и посвящена диссертационная работа.

Научная и практическая значимость результатов диссертационной работы подтверждается тесной связью разрабатываемых статистических методов с реальными физическими экспериментами. Практически все главы работы основаны на анализе

экспериментальных данных, полученных в квантово-оптических измерениях. Автор на практических примерах демонстрирует преимущества используемого корневого подхода к восстановлению квантовых состояний и процессов, показывая, что он позволяет значительно увеличить точность оценок при фиксированном объеме статистики.

Достоверность положений и результатов диссертации обеспечивается использованием хорошо обоснованных статистических методов и тщательным анализом адекватности используемых моделей.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, списка рисунков, списка таблиц и приложения. Работа содержит 138 страниц, 39 рисунков, 19 таблиц и список цитируемой литературы из 166 наименований.

Первая глава диссертационной работы посвящена квантовой томографии трехфотонных поляризационных состояний. Тройки фотонов могут рождаться в процессе спонтанного параметрического рассеяния в средах с кубической нелинейностью или быть получены путем условного приготовления из четырехфотонных состояний, генерируемых с помощью каскадного спонтанного параметрического рассеяния. Основной сложностью в экспериментах по наблюдению трехфотонных состояний является низкая эффективность их генерации, а, следовательно, и малый объем выборки, доступный для статистического анализа. В этом контексте очень уместным становится применение автором подхода к томографии, основанного на восстановлении очищенного состояния. Этот метод позволяет оптимальным образом выбрать ранг модели для восстанавливаемого состояния и тем самым избежать потерь точности, вызванных использованием неадекватной модели. В работе убедительно продемонстрировано, что точность восстановления состояния при фиксированном объеме выборки при этом многократно возрастает.

Во второй главе рассмотрена оптимизация измерений, используемых в протоколе квантовой томографии состояний. Предложен новый метод выбора оптимального набора измерений, основанный на численном решении оптимизационной задачи для целевой функции, связанной с расстоянием между векторами, задающими проекционные измерения в томографическом протоколе. Весьма интересен тот факт, что полученные в результате оптимизации наборы состояний включают в себя полные наборы несмещенных базисов (для тех размерностей пространства состояний где они существуют) и так называемые симметричные информационно-полные наборы состояний (SIC-POVM). Это свидетельствует о мощности предложенного численного метода. В ряде случаев, например, для восьми и двадцати проекторов, полученные автором протоколы превосходят по точности лучшие известные до этого протоколы на основе правильных многогранников.

Третья глава работы посвящена томографии квантовых процессов. В качестве физической ситуации, требующей описания эволюции квантового состояния в терминах общего квантового процесса, автор выбрал преобразование поляризации света с широким спектром в анизотропной среде с дисперсией показателя преломления. Разработанные методы также позволяют учесть наведенную механическими напряжениями анизотропию, практически неизбежную в реальной экспериментальной установке с механически зафиксированными оптическими элементами. Методы томографии квантового процесса были применены к анализу результатов эксперимента по наблюдению эффекта поляризационного эха.

В четвертой главе диссертации рассматривается принципиально иной тип измерений. Если в предыдущих главах для описания рассматриваемых физических систем было достаточно конечномерных гильбертовых пространств, то в четвертой главе автор рассматривает состояния квантованного электромагнитного поля с неопределенным числом фотонов. Основным экспериментальным инструментом здесь является гомодинное детектирование, и построенные методы квантовой томографии опираются на результаты квадратурных измерений, полученных этим методом. В случае формально бесконечномерного пространства состояний особенно важным становится правильный выбор модели – ранга восстанавливаемого состояния и набора базисных функций. Отталкиваясь от типичной экспериментальной ситуации, автор предлагает использовать в качестве базисных функций набор смещенных и сжатых фоковских состояний. По сути, в большинстве экспериментальных ситуаций такой выбор будет соответствовать наиболее «компактному» представлению восстанавливаемого состояния. Главный вопрос, возникающий при анализе данных квадратурных измерений – как ограничить размерность пространства для реконструкции восстанавливаемого состояния без потери точности? На основе стандартного критерия хи-квадрат автором разработан метод оценки минимальной размерности гильбертова пространства, отвечающего адекватной статистической модели. Разработанный метод с успехом применен к анализу данных реального эксперимента и продемонстрировано значительное увеличение точности восстановления по сравнению со стандартным подходом – восстановлением в базисе фоковских состояний.

В пятой главе диссертационной работы общие методы восстановления состояний по результатам квадратурных измерений применяются к тепловым состояниям с несколькими отщепленными фотонами. Показано, что такие состояния допускают описание в терминах компаунд-распределения Пуассона, и проведена оценка параметров этого распределения на основе экспериментальных данных. Рассмотрены случаи состояний с отщеплением до 10 фотонов, параметры соответствующих распределений оценены с помощью метода

максимального правдоподобия, получены оценки доверительных областей в пространстве параметров.

В приложение вынесено подробное описание методов оценки адекватности моделей состояния, восстанавливаемого по результатам квадратурных измерений, основывающихся на применении критериев Пирсона и Смирнова.

Следует отметить, что работа в целом выполнена на хорошем научном уровне, основные положения и выводы работы хорошо обоснованы и находят подтверждение в представленных результатах. В особенности хотелось бы отметить оригинальный подход к оптимизации томографических протоколов, использованный во второй главе диссертационной работы. Предложенный оптимизационный подход может дать значительные преимущества в задачах, где класс доступных измерений ограничен, что часто встречается в реальных экспериментах. Поэтому представленные результаты обладают практической значимостью.

Диссертационная работа не лишена недостатков, приведем некоторые возникшие замечания.

1. Название работы не совсем удачно и не полностью отражает содержание, поскольку в ней рассматривается не только томография состояний, но и томография процессов – этому, например, целиком посвящена третья глава.
2. На мой взгляд, работе не хватает отдельной обзорной главы или расширенного введения, посвященного общему описанию задач квантовой томографии, существующим протоколам измерений и методам статистического восстановления параметров состояний и процессов. Это помогло бы лучше вписать представленные результаты в контекст исследований в области и подчеркнуть новизну результатов. В представленном тексте необходимые сведения рассредоточены по нескольким главам, что затрудняет чтение.
3. В первой главе утверждается, что правильный выбор ранга модели для восстанавливаемого состояния позволяет существенно (в 80 раз для рассмотренного примера) увеличить точность восстановления. Однако критерии адекватности не обсуждаются и никаких рецептов для выбора адекватной модели на основе экспериментальных данных не приводится. Хотелось бы видеть здесь анализ, подобный проведенному в четвертой главе.
4. При обсуждении оптимизационной задачи во второй главе следовало бы привести для наглядности иллюстрацию ландшафта оптимизационной функции для какого-то простейшего случая.

5. В таблице 4 приводятся в том числе и результаты для протоколов на многогранниках. Не вполне ясно, что из себя представляют эти протоколы при размерности пространства больше двух. Здесь требуются дополнительные пояснения.
6. В третьей главе вывод о хорошем согласии теоретической модели с экспериментом делается на основе единственной экспериментальной точки (точка 1 на рисунке 3.11). На мой взгляд, это не вполне корректно. При этом не приводится никаких комментариев о причинах отсутствия на графике экспериментальной точки для толщины кварцевой пластинки 10092 мкм. Также не указаны погрешности измеренных значений толщин использованных в эксперименте пластинок и не обсуждается их влияние на точность восстановления состояния.
7. Одним из результатов третьей главы является вывод о необходимости учета анизотропии, индуцированной механическими напряжениями в оптических элементах, для уменьшения связанных с ней систематических ошибок в измерениях. Однако из текста не ясно, был ли такой учет проделан для приведенных далее в той же главе экспериментов, и действительно ли получено увеличение точности восстановления.
8. В четвертой главе не вполне ясно, как именно производилась оптимизация по параметрам сдвига α и сжатия ξ . Считались ли они независимыми переменными в процессе решения уравнения правдоподобия (4.6)?
9. В четвертой главе делается вывод о неадекватности моделей слишком высокой размерности. Непонятно, как этот вывод делается, например, на основании данных на рисунке 4.7, на котором все модели с размерностью более 6 соответствуют выбранному критерию адекватности.
10. В пятой главе и во введении повторяется неверное утверждение: «несмотря на то, что тепловые состояния света являются практически классическими объектами, они обладают квантовыми корреляциями, в частности их нормированная автокорреляционная функция в нуле $g^{(2)}(0) = 2$ ». На самом деле, значение $g^{(2)}(0) = 2$ не имеет никакого отношения к квантовым корреляциям и никак не может служить критерием их наличия.
11. В списке литературы отсутствуют некоторые важные источники. Например, на мой взгляд, следовало бы добавить ссылку на работу Z. Hradil, Phys. Rev. A, 55, R1561 (1997), в которой статистический метод максимального правдоподобия был впервые применен к задачам восстановления квантового состояния. Также вызывает удивление отсутствие основополагающей работы по квантовой томографии процессов I.L. Chuang, M.A. Nielsen, Journal of Modern Optics, 44, 2455-2467 (1997).

12. В работе встречаются неудачные формулировки, например, на стр. 18: «распределение числа девяток в вероятности совпадения фиделити». В данном случае «фиделити» и «вероятность совпадения» – это одно и то же. На стр. 19 предлагается «восстанавливать чистое состояние как абсолютно смешанное», очевидно, имеется ввиду состояние полного ранга, т.к. абсолютно смешанное состояние единственно и его матрица плотности пропорциональна единичной. Некоторые обозначения встречаются в тексте до их определения, например, ρ_x для матрицы плотности состояния Чоя-Ямиолковского в уравнении (3.1).

Приведенные замечания не имеют принципиального характера и не снижают научную значимость диссертационной работы. По результатам работы опубликовано 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, результаты докладывались на российских и международных конференциях.

Автореферат диссертации правильно и полно отражает её содержание.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Л.В. Белинского «Разработка методов и алгоритмов высокоточной томографии квантовых состояний» соответствует всем требованиям ВАК РФ, а её автор Л.В. Белинский присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,

старший научный сотрудник кафедры квантовой электроники

физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,

кандидат физ.-мат. наук

эл. почта: straups@yandex.ru,

раб. тел. +7(495)9394372



С.С. Страупе

Подпись С.С. Страупе удостоверяю.

Декан физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,

доктор физ.-мат. наук, профессор



Н.Н. Сысоев



Сведения об официальном оппоненте

на диссертационную работу Белинского Леонида Владимировича «Разработка методов и алгоритмов высокоточной томографии квантовых состояний», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Фамилия, имя, отчество	Страупе Станислав Сергеевич
Гражданство	РФ
Ученая степень (с указанием шифра специальности, по которой защищена докторская/кандидатская)	Кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.21
Полное наименование организации, в которой работает оппонент	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»
Сокращенное наименование организации, в которой работает оппонент	МГУ имени М.В. Ломоносова
Подразделение	Физический факультет, кафедра квантовой электроники
Должность	старший научный сотрудник
Ведомственная принадлежность организации	Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Почтовый индекс и адрес организации	119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1
Официальный сайт организации	http://www.msu.ru/
Адрес электронной почты	info@physics.msu.ru
Телефон организации	+7 (495) 939 11 04
Электронная почта оппонента	straups@yandex.ru

Список основных публикаций официального оппонента, составляющего отзыв, за последние пять лет по теме диссертации:

1. I. A. Pogorelov, G. I. Struchalin, S. S. Straupe et al. / Experimental adaptive process tomography // Physical Review A — 2017. — Vol. 95, no. 1. — P. 012302.
2. E. V. Kovlakov, I. B. Bobrov, S. S. Straupe, S. P. Kulik / Spatial Bell-state generation without transverse mode subspace postselection // Physical Review Letters. — 2017. — Vol. 118, no. 3. — P. 030503–030503.
3. Straupe S. S. / Adaptive quantum tomography // JETP Letters. — 2016. — Vol. 104, no. 7. — P. 510–522.
4. G. I. Struchalin, I. A. Pogorelov, S. S. Straupe et al. / Experimental adaptive quantum tomography of two-qubit states // Physical Review A — 2016. — Vol. 93, no. 1. — P. 012103.
5. I. B. Bobrov, E. V. Kovlakov, A. A. Markov et al. / Tomography of spatial mode detectors // Optics Express. — 2015. — Vol. 23, no. 2. — P. 649–654.

6. Kulik S. P., Straupe S. S. / Entanglement of biphoton-based qutrits and ququarts // Laser Physics. — 2014. — Vol. 24. — P. 094007.
7. K. S. Kravtsov, S. S. Straupe, I. V. Radchenko et al. / Experimental adaptive bayesian tomography // Physical Review A — 2013. — Vol. 87. — P. 062122.
8. S. S. Straupe, D. P. Ivanov, A. A. Kalinkin et al. / Self-calibrating tomography for angular Schmidt modes in spontaneous parametric down-conversion // Physical Review A — 2013. — Vol. 87. — P. 042109

Официальный оппонент
к.ф.-м.н.



С.С. Страупе

Декан физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова,
доктор физ.-мат. наук, профессор




Н.Н. Сысоев

