

В диссертационный Совет Д 212.232.45 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертационной работе Т.Ю. Голубевой

"Генерация, передача и хранение широкополосного яркого излучения в квантовой оптике и квантовой информатике ", представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05. - оптика.

Предсказание, а затем и экспериментальная реализация состояний света с неклассической статистикой – сжатого и перепутанного – сделали его объектом пристального внимания в связи с фундаментальными проблемами квантовой физики, например, в связи с вопросом о нелокальности квантовой теории или проблемой измерений. Помимо этого, использование неклассического света открыло широкие возможности в таких новых областях, как квантовая криптография, телепортация квантовых состояний, прецизионная квантовая метрология, новые методы передачи, хранения и обработки информации. Технологические перспективы развития этих направлений существенным образом зависят от качества используемых в них источников излучения. По этой причине большое число научных групп во всем мире занято поиском и анализом наиболее эффективных и надежных физических механизмов, способных стать основой соответствующих устройств. Особое внимание уделяется разработке источников многомодового неклассического света, что связано с его значительными преимуществами в квантово-информационных приложениях.

Еще одной важной задачей, решение которой необходимо для эффективного применения уникальных корреляционных свойств неклассического излучения, особенно широкополосного, является задача поиска адекватных квантовых алгоритмов, при которых его квантовые статистические свойства использовались бы в максимальной степени. Наконец, широкое распространение квантовых информационных технологий невозможно без создания ячеек квантовой памяти. Такие ячейки являются ключевым элементом для любой квантово-информационной сети, создаваемой с целью засекречивания информации, передачи квантовых сигналов на большие расстояния или проведения квантовых вычислений.

Таким образом, диссертационная работа Т.Ю. Голубевой, посвященная исследованию интенсивных многомодовых полей в сжатом и перепутанном состояниях и анализу их применения к задачам квантовой информатики, является несомненно **актуальной**. В ней рассмотрены все важнейшие аспекты данной проблемы – генерация таких полей, их использование в квантовых информационных каналах и сохранение состояний многомодового излучения с неклассической статистикой в ячейках квантовой памяти.

Наиболее интересными и значимыми новыми результатами, полученными в работе, являются следующие:

1. Построена квантовая теория вискела – полупроводникового лазера на квантовых ямах, учитывающая поляризационные свойства света, а также двулучепреломление и дихроизм активной среды. Исследованы статистические свойства излучения для основных конфигураций вискела, реализуемых в экспериментах. Доказана возможность поляризационного сжатия, определены оптимальные условия его наблюдения. Показана

неприменимость феноменологического подхода при теоретическом описании корреляционных свойств света, излучаемого данными полупроводниковыми лазерами.

2. Исследованы статистические свойства излучения невырожденного параметрического генератора при инжекции в сигнальную и холостую моды слабого синхронизирующего излучения. Показано, что при незначительном превышении порога сигнальная и холостая волны оказываются перепутанными. При значительном превышении они становятся амплитудно сжатыми. На основе формализма ковариационных матриц исследованы квантовые корреляции различных мод поля и степень квантовой чистоты излучаемого света.
3. Показано, что излучение субпуассоновского лазера со слабым внешним синхронизирующим полем является амплитудно сжатым. Степень сжатия увеличивается по мере увеличения регулярности накачки. Для полностью регулярной накачки эта степень зависит от мощности синхронизирующего поля. Получены ограничения на эту мощность, при которых синхронизирующее излучение не разрушает сжатия.
4. Построена модель пиксельного источника, состоящего из большого числа точечных источников сжатого света. Исследование корреляционных свойств излучения такого источника показало, что оно является сжатым не только во времени, но и в пространстве. Спектр сжатия зависит от числа точечных источников. Для анализа пространственного сжатия предложена новая измерительная процедура, позволяющая измерять различные квадратурные компоненты света без использования излучения гетеродина.
5. Обобщение протокола квантового плотного кодирования на случай пространственно многомодового света показало, что использование такого света позволяет существенно увеличить пропускную способность квантовых каналов связи. Информационная емкость квантового канала, вопреки ожиданиям, может превышать емкости классических каналов более чем в два раза. Проанализирована возможность оптимизации таких каналов в зависимости от соотношения пространственной плотности элементов передаваемого изображения и спектральной полосы сжатия света на входе канала.
6. Доказано, что многомодовое состояние света может быть телепортировано с верностью превышающей классический предел для каждой моды.
7. Предложена и проанализирована модель широкополосной квантовой памяти, позволяющей сохранять короткие импульсы, длительность которых значительно меньше характерных времен жизни возбужденных состояний рабочих атомов. Показано, что эффективность памяти может быть увеличена при использовании «обратной» геометрии считывания, а также при согласовании оптической толщины используемой среды с длительностью записываемого импульса. При этом оптимальные условия сохранения корреляционных свойств света могут не совпадать с условиями наибольшей эффективности сохранения числа фотонов.

Результаты, полученные в диссертации, **надежно обоснованы**, их достоверность обусловлена корректным применением адекватных методов современной теоретической и математической физики. Сделанные в расчетах приближения имеют ясные физические основания. Полученные результаты детально проанализированы. Там, где это возможно, проведено сопоставление предельных случаев с известными результатами других авторов. Результаты работы многократно апробированы на представительных международных конференциях.

Теоретическая значимость. Полученные в диссертации теоретические результаты вносят важный вклад в понимание физики процесса генерации, передачи и хранения многомодового интенсивного излучения с неклассической статистикой и являются несомненным стимулом для дальнейших экспериментальных исследований в этой области.

В работе построено несколько теоретических моделей новых источников широкополосного излучения с неклассическими свойствами. Особо следует отметить полностью квантовую модель полупроводникового лазера на квантовых ямах. В этой модели удалось учесть такие существенные для описания эффекты, как двойное лучепреломление и дихроизм активной среды. На основе анализа экспериментальных данных сформулирован ряд приближений, позволяющих существенно упростить рассмотрение и получить аналитические решения для корреляционных функций полей. При этом было доказано, что обычно используемые феноменологические модели некорректно описывают статистические свойства такого лазера. Представляется важным апробирование техники мод Шмидта для анализа оптимальных условий сохранения квантовых статистических свойств многомодового света, а также теоретический анализ выбора типа ковариационных матриц при анализе свойств многомодовых полей.

Практическая значимость диссертации определяется тем, что в ней детально проанализированы ключевые элементы устройств квантовой информатики. В работе предложено несколько вариантов источников яркого широкополосного света с неклассической статистикой. Помимо применения в задачах информатики, рассматриваемые источники могут использоваться и в прецизионной метрологии при проведении измерений с точностью, превышающей стандартный квантовый предел.

Найденные автором оптимальные условия использования широкополосного излучения с неклассической статистикой в протоколах плотного квантового кодирования и квантовой телепортации позволят обеспечить определенный прогресс в его технологических применениях. Большое практическое значение для использования широкополосного и пространственно многомодового неклассического излучения имеет предложенный автором способ его детектирования без использования гомодинного приемника, а также способ сохранения такого излучения в атомных системах. Полоса пропускания предложенной «быстрой» памяти на четыре порядка превышает полосу адиабатической памяти.

Следует также отметить, что определенная часть работы, представленной в диссертации, проведена в тесном контакте с одной из ведущих мировых экспериментальных групп, работающих в области квантовой оптики – лабораторией Каствлера - Бросселя в Париже.

В работах с большим объемом материала, таких, как диссертация Т.Ю.Голубевой, обычно трудно избежать недостатков. В данном случае их количество невелико. По материалам представленной работы имеются следующие **замечания**:

1. При теоретическом анализе работы вицсела было использовано приближение малых флуктуаций. Полученное решение приводит к расходимости флуктуаций одной из квадратурных компонент излучения при низких частотах, что формально противоречит сделанному приближению. Значение этой квадратуры не влияет на значения остальных и на характер предсказанных эффектов. Однако даже в этом случае было бы целесообразно привести более детальное обсуждение этого противоречия.
2. В главе 2 при постановке задачи анонсируется описание двух схем возбуждения холостой и сигнальной мод невырожденного оптического параметрического генератора – симметричной и асимметричной. При этом в основном тексте асимметричная схема вовсе

не рассматривается, хотя такое рассмотрение представляет определенный практический интерес.

3. В главе 4 предложена модель пиксельного источника, позволяющего получать пространственно многомодовый неклассический свет. Однако в главе 5 при обсуждении преимуществ подобных источников для задач плотного кодирования оптических изображений весь анализ проводится для света, получаемого в оптическом параметрическом генераторе. Особенности и преимущества пиксельного источника не рассматриваются.
4. В главе 7 при анализе предложенной схемы квантовой памяти исследуется упрощенная модель атомной среды. В частности, атомы предполагаются трехуровневыми. Поляризация света не учитывается. Для широкополосного излучения, особенно в случае рамановского возбуждения двухфотонного резонанса, было бы целесообразно рассмотреть влияние реальной многоуровневости атомных систем и поляризационных эффектов.

Сделанные замечания не являются принципиальными с точки зрения основных результатов, полученных автором, и не влияют на положительное впечатление от работы, которая представляет собой завершённое теоретическое исследование, выполнена на высоком научном уровне и содержит ряд новых и практически значимых результатов, достоверность которых не вызывает сомнений. Содержание диссертации подробно изложено в девятнадцати работах. Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на международных конференциях. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Оценивая работу в целом, можно сделать вывод, что диссертационное исследование Т.Ю.Голубевой является научно-квалификационной работой, в которой разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как **новое крупное научное достижение в области квантовой оптики.**

Диссертация по уровню исследований, научной и практической значимости результатов удовлетворяет требованиям ВАК (п.8 "Положения ВАК РФ о порядке присуждения ученых степеней и ученых званий"), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика, а ее автор, Голубева Татьяна Юрьевна, несомненно заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры
теоретической физики СПбПУ

28 октября 2014



И.М.Соколов