



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**  
**JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH**

Дубна, Московская область, Россия 141980 Dubna Moscow Region Russia 141980  
Telefax: (7-495) 632-78-80 Tel.: (7-49621) 65-059 AT: 205493 WOLNA RU E-mail: post@jinr.ru http://www.jinr.ru

08.10.14 № 425/01  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»  
Директор ОИЯИ  
Академик РАН  
Матвеев Виктор Анатольевич



ОТЗЫВ

ведущей организации о научно-практической ценности диссертации  
**Голубевой Татьяны Юрьевны**  
на тему «Генерация, передача и хранение широкополосного яркого излучения в квантовой оптике и квантовой информатике»  
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
по специальности 01.04.05-оптика

**Актуальность темы диссертации:**

Несколько последних десятилетий развития физики охарактеризовались возникновением совершенно новых представлений о тех необычных возможностях, которые могут быть получены при использовании квантовых свойств света в различного рода фундаментальных и прикладных исследованиях. Возникла, по существу, совершенно новая наука – квантовая оптика, которая, с одной стороны, невероятно плодотворно углубила наше понимание законов квантовой физики, а, с другой, стимулировала обсуждение на новой базе таких прикладных аспектов как, например, развитие информационно-коммуникационных и вычислительных технологий. В настоящее время интерес к этому направлению развития постоянно нарастает, что ярко и бесспорно отражается в соответствующей публикационной активности. Материалы представленной диссертации лежат в этом же русле, и с этой точки зрения тема диссертации представляется, безусловно, актуальной.

**Связь работы с планами соответствующих отраслей науки и народного хозяйства:**

Работа относится к приоритетному направлению технологического развития «Информационно-телекоммуникационные системы», разрабатываемому в рамках федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы".

**Структура и содержание диссертации**

Диссертационная работа содержит 269 страниц текста с 47 рисунками и состоит из Введения, 7 Глав, Приложения, Заключения и Списка литературы (195 наименований).

Во введении дан краткий обзор литературы, сформулирована цель, подчеркнута практическая значимость, дана информация о применяемых методах исследования, подчеркнута

новизна результатов. В заключение приведены положения, выносимые на защиту, подчеркнута достоверность результатов и проиллюстрирована их апробация. Объявлено, что основные результаты, представленные в диссертации, получены автором лично.

*Первые четыре главы диссертации посвящены теоретическому исследованию различного рода источников многомодового неклассического поля.*

**Глава 1** посвящена теоретическому исследованию квантово-статистических свойств полупроводниковых лазеров, называемых часто викселями (VCSEL - Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser). В предыдущих исследованиях было уже показано, что эти источники могут быть очень перспективны с точки зрения генерации яркого субпуассоновского света. Этот факт качественно подтверждался в проведенных экспериментах. Однако, для количественных оценок было необходимо построить квантово-статистическую теорию с учетом физических особенностей полупроводника, таких как двулучепреломление и дихроизм. В представленной теории это сделано. Однако, хотя это уточнение и является важным для адекватного описания викселов, тем не менее, наиболее интересным здесь результатом следует считать продемонстрированную возможность переформулировать теорию в терминах квантовых параметров Стокса. На этой базе предсказывается не только субпуассоновость, но и эффект поляризационного сжатия в викселях, что существенно расширяет возможности применения этого источника света в квантовой оптике и информатике.

**Глава 2** посвящена теоретическому изучению источников, действие которых основано на параметрическом эффекте. Речь идет о так называемых TROPO – Triply Resonant Optical Parametric Oscillator, работающих в надпороговом режиме. Для них предполагается, что параметрический процесс формируется тремя квантованными модами высокодобротного резонатора: модой накачки, возбуждаемой извне когерентной волной, и сигнальной и холостой модами, порождаемыми параметрическим процессом и слабыми синхронизирующими полями в когерентном состоянии. Теория строится в рамках диагонального представления Глаубера. На этой основе обсужден вопрос о ковариационной матрице и чистоте состояния поля генерации в различных измерительных процедурах, когда наблюдение ведется за выделенными полевыми осцилляторами или парами осцилляторов в окрестностях частот актуальных мод.

**Глава 3** вместе с **Приложением А** являются в некотором смысле вспомогательными, поскольку полученные здесь результаты используются в дальнейшем при обсуждении моделей квантовой памяти для корректного формального описания источников неклассического света. В принципе, для этой цели могли бы быть использованы источники, обсужденные в первых двух главах. Однако, в диссертации для целей наглядности используются более простые модели такие как вырожденный оптико-параметрический осциллятор (ОПО) и синхронизированный субпуассоновский лазер. Представлен анализ квантово-статистических свойств излучения этих систем в рамках теории Гейзенберга-Ланжевена. Для использования этого излучения в системе квантовой памяти было необходимо предусмотреть «вырезание» импульса из стационарного светового потока таким образом, чтобы сохранить квантовые и вообще корреляционные свойства света, присущие исходному стационарному потоку. Проанализированы оптимальные условия для этого вырезания.

В отличие от задач в первых трех главах, в которых пространственный аспект никак не учитывался (приближение плоских волн, бегущих в одном направлении), в **Главе 4** теоретически обсуждается так называемый пиксельный источник. Он представляет собой совокупность периодически расположенных на некоторой поверхности многих точечных источников неклассического света. В качестве последних в диссертации выбраны системы, исследованные в предыдущей главе, а именно надпороговые ОПО и субпуассоновские лазеры. При этом теория потребовала обобщения на тот случай, когда апертуры лучей от каждого из пикселей имеют конечные размеры, много меньшие, чем расстояния между пикселями. Подобное обобщение теории дает возможность обсуждать квантовые аспекты, характерные для

развития системы не только во времени, но и пространстве. Как было показано, при этом имеет место наряду со временным сжатием, также и пространственное в поперечном по отношению к лучу света направлении. В этой главе также обсуждена измерительная процедура, позволяющая следить в дальней зоне за квадратурами поля без применения балансного гомодинирования в тех случаях, когда обсуждаются когерентные источники. Метод проиллюстрирован для пиксельного источника и, в частности, для одиночного пикселя.

*Две следующие главы диссертации призваны иллюстрировать применимость многомодовых неклассических полей для информационных целей.*

Глава 5 посвящена информационному протоколу, называемому плотным кодированием. Здесь формулируются все необходимые обобщения, связанные с многомодовостью поля, как временной, так и пространственной. Схема протокола строится на базе интерферометра Маха-Цендера. Для выбора носителя информации необходимо понимать, какие преследуются цели. В этой главе речь идет о передаче по каналу связи пространственного изображения, поэтому в качестве носителя информации удобно выбрать излучение от двух оптико-параметрических усилителей (ОПУ), обладающих приемлемой пространственной структурой и сжатых в ортогональных квадратурах. На третьем входе, расположенном в одном из плечей интерферометра, происходит модуляция носителя внешним изображением. Показано, что подобный канал обладает значительной пропускной способностью именно вследствие присущего ему оптического параллелизма. Учет пространственных распределений одновременно делает необходимым оценивать негативную роль дифракции. Показано, однако, что она легко компенсируется применением подходящих оптических линз.

Если в главе 5 речь шла о передаче пространственного изображения и соответственно о пространственно многомодовом носителе этого изображения, то в Главе 6 обсуждается чисто временной вариант плотного кодирования и временной вариант телепортации. При этом в качестве носителя выбирается субпуассоновский лазер или вырожденный оптико-параметрический генератор. Хотя эти системы рассматриваются обычно как одномодовые для лазера или двухмодовые для параметрического генератора, тем не менее снаружи резонаторов оказывается возбужденным континуум мод свободного пространства. Таким образом и в этом случае необходимо обсуждать многомодовое сжатие, но уже не в пространстве, как в главе 5, но во времени. Применение подобных источников дает возможность рассматривать их в качестве носителей именно широкополосного сигнала. При анализе отношения сигнала к шуму, взаимной информации Шеннона и спектральной верности продемонстрировано, что сама природа электромагнитного поля обеспечивает параллельную многомодовую структуру, существенно увеличивая потенциал информационных систем, который надо правильно задействовать.

*В последней главе диссертации рассматривается быстрая (широкополосная) квантовая память.*

Глава 7 посвящена одной из наиболее интересных и широко обсуждаемых задач квантовой оптики и информатики, а именно хранению сигнального импульса с последующим восстановлением его квантового состояния. В качестве модели памяти выбран часто используемый для этой цели коллектив трехуровневых атомов, который вместе с актуальными полями образует так называемую лямбда-конфигурацию. Особенность подхода в диссертации состоит в том, что, во-первых, рассматривается весь диапазон отстроек – от строго резонансного приближения до рамановского, и, во-вторых, предполагается широкополосная память, в которой длительность сигнального импульса значительно короче времени жизни верхнего атомного уровня. Продемонстрировано, что эффективность подобной памяти при оптимальном выборе параметров задачи может быть предельно высокой. Причем применяется упрощенная процедура оптимизации, связанная с оценкой потерь в зависимости от соотношения между толщиной



ячейки памяти и длительностью сигнального импульса. В диссертации толщина выбиралась максимально возможной в реальных экспериментальных условиях.

### **Научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Все результаты, полученные в диссертации, являются новыми. Они хорошо обоснованы и представляются достоверными, поскольку теоретическая обработка выполнялась в рамках адекватной квантовой теории, никак не противоречат уже известным теоретическим и экспериментальным результатам других авторов.

В диссертации получено много новых результатов, каждый из которых является важным и заслуживающим внимания. Здесь отметим только два из них, которые представляются для нас наиболее интересными. Во-первых, в главе 4, в которой рассматривается теория пиксельного источника сжатого света, предложена измерительная процедура в дальней зоне, позволяющая следить за квадратурными компонентами поля без применения техники гомодинного детектирования, что может оказаться полезным в тех случаях, когда необходимая конфигурация локального осциллятора слишком сложна. Во-вторых, эффективно примененная в главе 7 оптимизация квантовой памяти по потерям кажется значительно более простой по сравнению с оптимизацией по форме импульсов актуальных полей. Кроме того представленная схема памяти интересна тем, что она реализуется иначе, чем, например, ЕИТ-память, в которой сигнальный импульс сначала локализуется в среде, а затем «фотографируется». Здесь нет предварительной локализации сигнального импульса в запоминающей среде, и память формируется вследствие дрейфа импульса через среду. В этом смысле она, по-видимому, близка к адиабатической памяти.

### **Практическая ценность результатов**

В долгосрочной перспективе результаты исследования важны для построения новых коммуникационных каналов, позволяющих передавать квантовые сигналы на большие расстояния.

### **Замечания и недостатки в диссертации и автореферате**

Как всякая большая работа, диссертация не свободна от некоторых недочетов. Например, на стр. 152 критерий Дуана, строго говоря, приведен неверно. Там представлены два неравенства для каждого из слагаемых, а должно быть одно неравенство для их суммы. На стр. 191 для выражения того, что когерентность между атомными уровнями отсутствует, употреблен жаргон «когерентность в вакуумном состоянии».

На стр. 27-28 обсуждается решение системы дифференциальных уравнений для флуктуаций квадратур лазерной генерации (викселов) в Фурье-представлении. При этом одна из квадратур оказывается расходящейся на нулевой частоте, что противоречит начальному требованию малости флуктуаций. Данный факт требует дополнительного пояснения.

В главе 7 представлена модель широкополосной квантовой памяти. Складывается представление, что данная модель не может работать как эффективная ячейка памяти, поскольку атомный переход в спектральном отношении оказывается слишком узким, и в силу этого среда просто не может «заметить» большую часть сигнала. Требуют дополнительного объяснения физические основания, в силу которых память оказывается эффективной.

### **Соответствие содержания диссертации указанной специальности**

Содержание диссертации соответствует указанной специальности 01.04.05 - оптика

### **Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации**

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации

### **Значимость результатов для науки и производства**

Проведенное исследование с одной стороны, важно для принципиального улучшения информационно-коммуникационных технологий, играющих в современном мире решающую роль, а с другой – для развития фундаментальных идей, связанных с квантовыми представлениями о свете и веществе.

Результаты и выводы диссертационной работы могут найти практическое применение при производстве элементов передачи информации.

Результаты работы рекомендуется использовать для модернизации спецкурсов по квантовой оптике, квантовой информации и современной статистической оптике, читаемых для студентов старших курсов и магистрантов физических специальностей университетов.

Таким образом, диссертация Голубевой Т.Ю. является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Результаты исследования доложены диссертантом на семинаре Лаборатории теоретической физики им. Н.Н.Боголюбова Объединенного Института Ядерных Исследований 30 сентября 2014 года. Отзыв обсуждался и был принят на заседании Научно-технического Совета ЛТФ, протокол № 24 от 2 октября 2014 года.

Ведущий научный сотрудник  
сектор № 13  
ЛТФ им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ  
Дубна 141980  
Тел.: (496) 21 63947, Факс: (496) 216-5084  
E-mail: yukalov@theor.jinr.ru  
Доктор ф.м.н.

Юкалов Вячеслав Иванович

Директор ЛТФ им. Н.Н. Боголюбова  
ОИЯИ  
Дубна 141980  
Тел.: (496) 21 62295, Факс: (496) 216-5084  
E-mail: voronov@theor.jinr.ru  
Доктор ф.м.н.

Воронov Виктор Васильевич