

## Общая характеристика работы.

Диссертация посвящена исследованию квантовых эффектов в оптике, представляющих фундаментальный или практический интерес.

**Актуальность темы.** Практические задачи прецизионной оптической метрологии в ряде приложений сталкиваются с фундаментальным ограничением точности измерений вследствие квантовых флуктуаций. Квантовые шумы налагают предел на основное свойство лазерного света - когерентность. Спонтанные переходы снижают когерентность. После экспериментальной регистрации неполной пространственной когерентности одномодовых лазерных пучков была предложена модель подпорогового возбуждения высших поперечных мод резонатора. Эти оценки оказались согласными с экспериментами. Однако, построение последовательной теории естественной пространственной когерентности представлялось актуальным.

С квантовыми флуктуациями вакуума связаны дробовые шумы фотодетекторов. Результатом квантовой теории явилось открытие сжатых и субпуассоновских состояний света с подавленными, по отношению к флуктуациям вакуума, флуктуациями. Теория приготовления таких состояний методами нелинейной оптики первоначально была одномерной: учитывалась только временная эволюция. На очереди стоял учет дифракции.

Экспериментальная реализация сжатых состояний затруднялась сложностью лазерной техники параметрического преобразования света, посредством которого в большинстве экспериментов приготавливались эти квантовые состояния. Поиск более простых решений привел к эффекту самовоздействия света - фазовой самомодуляции, в кварце, например. В отличие от параметрического усиления, самовоздействие не сопровождается преобразованием частоты света. Напрашивался поиск схемных решений в этом направлении. Разработкам диссертанта по этим вопросам посвящена первая глава.

Успехи исследователей оптических солитонов открывали перспективы приготовления необычных квантовых состояний света. Существовала приближенная теория, построенная в параметрическом приближении и справедливая на самом начальном этапе распространения солитонов. Затем появилась квантовая теория, которая описывала распространение солитонов в оптических волокнах без диссипации. Однако, влияние квантовых флуктуаций на скорость распространения солитона проявляется лишь на длинных дистанциях (сотни и тысячи км), когда потери существенны. Теория нуждалась в дальнейшем развитии. Этому посвящена вторая глава диссертации.

Фундаментом современной лазерной физики является квантовая теория. Поэтому удивительные эффекты, которые можно наблюдать с помощью современной лазерной техники, в основе своей имеют специфику квантовой теории: нарушение привычных интуиций пространства-времени. Эту специфику

квантовой теории можно "почувствовать" экспериментально. Эксперименты по проверке неравенств Белла - тому подтверждение. Однако, до сих пор они не привели к однозначно интерпретируемым результатам. Интересным представлялось тщательное изучение как тонкостей теоретических аспектов неравенств Белла, так и их экспериментальной проверки.

Другой вопрос квантовой теории, связанный с альтернативой теории скрытых переменных: существуют ли измеряемые величины до их измерения? Этот вопрос также допускает экспериментальную проверку. Однако, известные эксперименты с трехуровневыми молекулами были лишь умозрительными. Актуальным представлялся поиск реального эксперимента.

"Почувствовать" специфику квантовой оптики проще в экспериментах, где классическое и квантовое описание предсказывают противоречивые результаты. Эксперименты по наблюдению интерференции интенсивностей двухфотонных состояний давали лишь повышенные значения видности интерференции по сравнению с классическим описанием. Сама же интерференционная зависимость интенсивности от фазы в обоих случаях оставалась синусоидальной. Возникла мысль проанализировать в этом плане многофотонную интерференцию. Но и в исследовании двухфотонных эффектов намечались новые перспективы. Эффект "опережающей волны" открывал новые возможности в практических приложениях передачи, кодирования и обработки изображений.

Современная лазерная техника позволяет исследовать и квантовые эффекты в акустике. Предложение о зондировании кристаллов светом, с целью выяснения квантового состояния колебаний атомов кристаллической решетки, нуждалось в теоретической проработке. Решению этих задач посвящена последняя глава диссертации.

**Целью диссертационной работы** являлось изучение возможностей подавления квантовых флуктуаций, ограничивающих предельные характеристики оптических измерений и обработки информации, а также выявление, исследование и использование квантовых оптических эффектов, представляющих фундаментальный или практический интерес.

Согласно этой цели были поставлены следующие конкретные задачи.

1. Анализ предельной пространственной когерентности лазеров.
2. Исследование возможностей подавления квантовых флуктуаций путем приготовления сжатых и субпуассоновских состояний света.
3. Исследование квантовых эффектов, сопровождающих нелинейное распространение шредингеровских солитонов и ограничивающих предельный пробег; учет диссипации и компенсирующего ее усиления.

4. Поиск интерференционных эффектов, демонстрирующих необычные свойства света, не согласующиеся с классическими представлениями, которые можно было бы наблюдать экспериментально.

5. Формулирование парадоксов Белла, исходя из гипотезы существования функции распределения совместных вероятностей наблюдаемых, в том числе для количества наблюдателей, большего двух, и с учетом неидеальности детекторов.

**Практическое значение** этих исследований обусловлено тем, что квантовые шумы света полагают принципиальный порог оптических измерений, передачи и обработки информации. Конкретно **научная новизна и практическая значимость работы** состоит в следующем.

1. Развита последовательная теория естественной пространственной когерентности одномодовых лазерных пучков. Дана рекомендация по повышению когерентности.

2. Впервые учтена дифракция в описании процесса приготовления квантовых сжатых состояний света посредством параметрического усиления. Физический смысл пространственных эффектов проанализирован на основании классической аналогии. Исследованы возможности повышения эффективности квантового сжатия.

3. Разработан оригинальный способ сравнительно простого приготовления субпуассоновских состояний света путем пропускания когерентного излучения через границу раздела линейного и нелинейного диэлектриков, во втором происходит фазовая самомодуляция.

4. На основании квантовой теории распространения шредингеровских солитонов в континуально-интегральном виде, которая описывает распространение оптических солитонов в прозрачных нелинейных волокнах на начальной стадии, исследованы возможности приготовления сжатых и субпуассоновских состояний солитонов и подавления шумов детектирования.

5. Выявлена предельная длина пробега оптического солитона в диссипативном волокне с компенсирующим усилением исходя из критерия равенства среднего смещения солитона под действием квантовых флуктуаций величине собственной ширины солитона. Установлено, что при совпадении полосы усиления с шириной и расположением спектра солитона, эта предельная длина лишь незначительно меньше предельной длины пробега в идеально прозрачном волокне. Эти результаты могут быть использованы при создании оптических линий связи.

6. Предложен эксперимент, который впоследствии подтвердил положение ортодоксальной интерпретации квантовой теории о том, что априорного (до

измерения) определенного значения наблюдаемой, в частности, количества фотонов в поле, может не существовать.

7. Разработан алгоритм формулирования парадоксов Белла для трихотомных наблюдаемых и произвольного числа наблюдателей. Предложен вариант эксперимента, способного строго доказать теорему Белла и опровергнуть теорию скрытых параметров.

8. Выявлены резкие качественные различия предсказаний классической и квантовой теорий в четырехфотонной интерференции. Этот результат выгодно отличается от двухфотонных интерференционных экспериментов, где квантовая специфика касается лишь повышения видности интерференционной картины.

9. Эффекты двухфотонной оптики: двухфотонная голография и двухфотонная передача и обработка изображений составляют основу нового раздела лазерной физики - двухфотонной оптики. Их можно использовать для повышения конфиденциальности передачи информации по оптическим каналам связи.

10. Теоретически доказана возможность измерения параметра группировки фононов или поляритонов вещества путем зондирования его светом и регистрации антистоксовой компоненты рассеяния по схеме интерференции Брауна-Твисса. Эти результаты могут быть использованы в диагностике прозрачных сред.

#### **На защиту выносятся следующие положения:**

- модель подпорогового возбуждения высших поперечных мод позволяет построить последовательную теорию естественной пространственной когерентности одномодовых лазерных пучков;
- дифракция света при параметрическом усилении снижает эффективность сжатия квантового состояния;
- использование эффекта фазовой самомодуляции позволяет сравнительно просто приготовить сжатые и субпуассоновские состояния;
- предельная длина пробега шредингеровского солитона в кварцевом волокне при соответствующем подборе полосы усиления лишь незначительно меньше предельного пробега в идеально прозрачном волокне;
- интерференционные эксперименты третьего и более высоких порядков позволяют подтвердить положение ортодоксальной интерпретации о том, что априорного (до регистрации) значения измеряемой величины может не существовать;
- методы формулирования и исследования парадоксов Белла с помощью функции распределения совместных вероятностей наблюдаемых допускают

обобщение на случай трихотомных наблюдаемых и произвольного числа наблюдателей;

- новые неклассические эффекты двухфотонной обработки изображений и двухфотонной голографии составляют физическую основу для разработки методов повышения конфиденциальности передачи информации.

Диссертация включает Введение, три главы с Приложениями, Заключение и Список литературы.

Содержание диссертации опубликовано в 45 статьях и в 3 главе монографии С.А.Ахманова, Н.Н.Ахмедиева, А.В.Белинского и др. *Новые физические принципы оптической обработки информации*. Под ред. С.А.Ахманова и М.А.Воронцова. М.: Наука. 1990. Мой личный вклад в работы нескольких соавторов в некоторых случаях специально оговаривается в тексте. Как правило, он не ниже 50%. У Д.Н.Клышко, А.С.Чиркина и М.В.Чеховой я получил устное согласие на использование результатов совместных работ в диссертации. Результаты диссертационной работы были представлены на 12 Всес., 13 и 14 Межд. конф. по когерентной и нелинейной оптике (МГУ 1985, Минск 1988, С.-Петербург 1991), на 5 Всес. конф. "Оптика лазеров" (Л. 1987), на 2 и 3 Всес. семинарах по квантовой оптике (Раубичи 1988 и 1990), на расширенном заседании секции научного совета АН СССР "Лазерные люминофоры" (Звенигород 1989), на Межд. семинаре "Проблемы квантовой оптики" (Дубна 1991), на Межд. совещании по сжатым и коррелированным состояниям в квантовой оптике (ФИАН 1991), на 15 Межд. конф. по рамановскому рассеянию (Питтсбург 1996), на семинаре "Изучение феномена времени" (МГУ им. М.В.Ломоносова 1998), на Московском семинаре по квантовой оптике (МГУ им. М.В.Ломоносова 1998), на 7-ых Рождественских чтениях (Физ. факультет МГУ им. М.В.Ломоносова 1999), на семинарах А.Н.Ораевского (ФИАН 1990, 2000).

## **Глава 1. Квантовые флуктуации света и их преобразование**

Первая глава посвящена изучению квантовых флуктуаций светового поля и возможностей их подавления. Исследуется предельная пространственная когерентность одномодовых лазерных пучков, возможности приготовления сжатых и субпуассоновских состояний с подавленными квантовыми флуктуациями по сравнению с флуктуациями вакуума и когерентного состояния. Предпринимаются попытки поиска и анализа классических аналогов этих эффектов. Развита теория, учитывающая дифракцию света. Предложены простые схемные решения.

В разделе 1.1 (Пространственная когерентность одномодовых лазерных пучков) рассматриваются естественные пространственные флуктуации одномодовых лазерных пучков, обусловленные спонтанным излучением активной среды. Подтверждена идея Б.Я.Зельдовича и Д.Б.Саакяна об ограничении предельной пространственной когерентности одномодового лазера подпороговым

возбуждением высших поперечных мод и развита последовательная теория. В работе упомянутых авторов даны лишь теоретические оценки пространственной когерентности. В указанном же разделе приведен детальный расчет корреляционной функции и степени пространственной когерентности одномодового лазера. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с экспериментами. Актуальность рассмотренной задачи подтверждается, в частности, появлением более поздней работы М.Левенсона с сотрудниками, посвященной исследованию подпороговой генерации высших пространственных мод.

В разделе 1.2 (Генерация сжатых и субпуассоновских состояний) проанализирован эффект приготовления квантовых сжатых и субпуассоновских состояний.

В 1.2.1 произведено сопоставление с классическим эффектом параметрического усиления света. Рассматривается аналогия описания квадратурных компонент квантового и классического шума, усиленного вырожденным параметрическим усилителем. Установлено, что квантовая специфика связана лишь с начальным состоянием неусиленного поля (вакуумным состоянием) и не привносится параметрическим преобразованием. Этот вывод, возможно, стимулировал дальнейшие работы в этом направлении, например, Д.Н.Клышко.

В 1.2.2 проанализирован параметрический процесс приготовления квантовых сжатых состояний с учетом многомодовости по пространству. Ранее учитывалась многомодовость по частотам. Эволюция квантовых состояний вследствие дифракции исследовалась лишь в свободном пространстве. Проведенные в 1.2.2 расчеты позволяют оценить снижение эффективности сжатия вследствие дифракции при параметрическом преобразовании. Эта деградация сжатия весьма существенна. Опубликование этих результатов и обсуждение их на конференциях стимулировали последующие работы М.И.Колобова и И.В.Соколова по обнаружению эффекта сжатия в пространстве и возможности подавления флуктуаций фотоприема не только во времени, но и в пространстве.

В последующих подразделах исследован эффект фазовой самомодуляции с точки зрения подавления квантового шума детектирования и приготовления квантовых сжатых и субпуассоновских состояний. В отличие от параметрического преобразования, фазовая самомодуляция не требует выполнения условия фазового синхронизма, которое существенно для параметрического взаимодействия. Ранее известно было описание фазовой самомодуляции квантовой теорией в приближении кубичной нелинейности. В подразделе же 1.2.3 дано обобщение на случай нелинейности произвольного порядка. Независимо аналогичный результат получил R. Tanas.

Далее, в п.1.2.3.1 предложен простой способ приготовления субпуассоновских состояний света путем пропускания когерентного излучения через границу раздела линейного и нелинейного диэлектриков. Показано, что при обратном

расположении диэлектриков эффект практически исчезает. То же самое (исчезновение эффекта) происходит и при использовании такого составного устройства в качестве выходного зеркала лазерного резонатора (п.1.2.3.2).

В работах М.И.Колобова и И.В.Соколова разработан способ приготовления пространственно-временных сжатых состояний и пространственной антигруппировки фотонов с использованием параметрического преобразования. Более простой способ приготовления света с такими необычными свойствами предлагается в подразделе 1.2.4, в котором описывается преобразование квантовых полей пассивным нелинейным интерферометром, в нелинейной среде которого имеет место фазовая самомодуляция. Показано, что в схеме возможно приготовление сжатых состояний и достижение эффективного подавления шумов в определенной области временных и пространственных частот.

## **Глава 2. Квантовые флуктуации при распространении шредингеровских солитонов**

В последнее время в оптической связи и обработке информации значительное внимание привлекают вопросы, связанные с генерацией и распространением оптических солитонов. Использование пико- и фемтосекундных оптических солитонов позволяет преодолеть дисперсионное расплывание за счет нелинейности и добиться высокой скорости передачи информации. Формирование при этом квантовых состояний света в принципе дает возможность снижения шумов детектирования ниже уровня дробового шума. Представляет интерес объединение этих достоинств - высокой скорости передачи информации и низкого порога регистрации - в одном носителе информации.

В главе рассматриваются квантовые эффекты нелинейного распространения шредингеровских солитонов и связанные с этими эффектами предельные ограничения на длину пробега. Производится учет влияния диссипации и соответствующего компенсирующего усиления. В основе анализа в данной главе лежит операторное нелинейное уравнение Шредингера (НУШ).

В разделе 2.1 (Распространение солитонов в недиссипативной среде: гейзенберговское описание) с помощью континуально - интегральной формы приближенного решения НУШ получено наглядное описание эффекта сжатия. Проанализированы возможности формирования субпуассоновских состояний солитонов и подавления фотонных флуктуации детектирования на начальном этапе распространения.

В разделе 2.2 (Распространение солитонов в недиссипативной среде: шредингеровское описание. Предельная длина пробега) рассмотрено описание солитона в представлении Шредингера, позволяющее использовать точное решение уравнения Шредингера, но не способное учесть потери. Анализируются вопросы, связанные с квантовой неопределенностью и

устойчивостью формы фундаментального солитона. Получены соотношения средней амплитуды, интенсивности и квадрата интенсивности, а также предельной длины пробега исходя из условия равенства среднего случайного смещения солитона его ширине. Расчеты средней интенсивности, опубликованные в 1991 году, стимулировали последующую дискуссию с Д.Ю.Кузнецовым о возможности расплывания солитона, в результате которой установлено, что форма солитона остается неизменной, а уширение средней огибающей в процессе распространения связано исключительно со случайными смещениями.

Получены соотношения, позволяющие рассчитать эффективность подавления одной из квадратурных компонент поля (степень квантового сжатия) также без использования приближений, ограничивающих результаты начальным этапом распространения.

В разделе 2.3 (Влияние диссипации и усиления на распространение шредингеровских солитонов) производится учет влияния диссипации канала распространения солитона и компенсирующего потери усиления. Производится оценка предельного пробега солитона, ограниченного квантовыми флуктуациями. Впервые такой учет произведен Дж.П.Гордоном и Х.А.Хаусом в приближении безграничной полосы постоянных усиления и потерь. Уточнение произведено в работах Х.А. Хауса и сотрудников. Независимо мной получены аналогичные результаты. Квантовые неопределенности амплитуды и импульса рассчитаны в пп. 2.3.1.1 и 2.3.1.2 двумя различными способами (результаты совпали). В п.2.3.1.3 исследованы возможности приготовления сжатых состояний солитонов. Согласно оценкам, приведенным в п.2.3.1.4, эффективнее их готовить без усиления. Что же касается предельных длин пробега солитона, ограниченных случайными смещениями, то приближение безграничных и постоянных полос усиления и поглощения дает явно заниженные значения. Поэтому мной была предпринята попытка учета конечной ширины полос. В результате рассмотрения, изложенного в подразделе 2.3.2, установлено, что при соответствующем подборе полосы усиления предельная длина пробега солитона лишь незначительно меньше предельной длины пробега в идеально прозрачном волокне.

Ряд математических преобразований вынесен в Приложения 2.1-2.4: 2.1 (Средняя амплитуда солитона), 2.2 (Средняя интенсивность солитона), 2.3 (Дисперсия флуктуаций числа фотонов солитона), 2.4 (Средний квадрат поля солитона).

### **Глава 3. Интерференционные квантовые эффекты**

Третья глава посвящена квантовым интерференционным эффектам и изучению необычных свойств света, не согласующихся с классическими представлениями "здорового смысла".



В разделе 3.1 (Интерференция света и априорное существование наблюдаемых) анализируются возможности объяснения интерференционных экспериментов по наблюдению корреляции фотоотчетов с точки зрения возможности априорного существования определенного числа фотонов до их регистрации детектором. Предлагается эксперимент по наблюдению нелинейной трехчастотной интерференции, который позднее был реально осуществлен А.В.Бурлаковым с соавторами. Априорное существование определенного числа фотонов в нем противоречит закону сохранения энергии. Более ранние предложения предполагали лишь умозрительные реально неосуществимые эксперименты.

Далее в разделе 3.1 рассмотрены вопросы, связанные с парадоксами Белла. В подразделе 3.1.2 (Интерференция света и скрытые переменные) изучается неклассическая корреляция пространственно разделенных световых пучков. Пункты подраздела 3.1.2.1 и 3.1.2.2 связаны с учетом неединичной эффективности детекторов. Одним из первых на принципиальную важность этого фактора обратил внимание Е.Сантос. Он показал, что нарушения неравенства Клаузера-Хорна-Шимони-Хольта (КХШХ), неоднократно подтвержденные экспериментами, не опровергают теории скрытых параметров в случае неединичной квантовой эффективности детекторов  $\eta < 0.7 - 0.8$ . В п.3.1.2.1 предложен конкретный пример четырехмерной функции распределения совместных вероятностей, имитирующий результаты квантовой теории и наглядно демонстрирующий правильность выводов Е.Сантоса. Предложены также новые варианты неравенств Белла, учитывающие неидеальную эффективность детекторов  $\eta$  как для двух, так и для большего числа наблюдателей (пп.3.1.2.5 - 3.1.2.7). Показано, что с увеличением числа наблюдателей можно достичь снижения требуемой минимально возможной  $\eta$  до  $1/2$ .

В п.3.1.2.1 предлагается более простой по отношению к известным вариант интерференционного эксперимента, реализация которого позволила бы строго доказать теорему Белла. Он предполагает использование двух детекторов с  $\eta > 2/3$ .

В пп.3.1.2.3 и 3.1.2.4 предлагаются варианты интерференционных экспериментов, вновь связанных с вопросом априорного существования определенных значений наблюдаемых. Показано, что предположение о наличии в световом поле определенного числа фотонов до их регистрации приводит к парадоксам типа Белла.

В п.3.1.2.8 установлено, что парадокс Гринбергера-Хорна-Цайлингера (ГХЦ) при  $\eta < 1$  утрачивает свои преимущества по сравнению с проверкой неравенства типа Клаузера - Хорна (КХ).

Во второй части главы рассмотрены эффекты двухфотонной оптики и корреляции фотонов при неупругом рассеянии света. Они носят более прикладной характер. В разделе 3.2 (Интерференция многофотонного света, сопоставление с классическими эффектами) предложены эксперименты по

наблюдению трех- и четырехфотонной интерференции, интересные тем, что предсказания их результатов на основании квантовой и классической теорий столь резко и качественно отличаются, что интерференционные максимумы в одном описании сменяются интерференционными минимумами в другом. Ранее опыты по многофотонной интерференции были предложены и исследовались в работах Д.Н.Клышко, однако подобного сопоставления с результатами классического рассмотрения не производилось.

В разделе 3.3 (Двухфотонные состояния: дифракция, голографическая интерференция, преобразование двумерных сигналов) предложены двухфотонные аналоги обычных однофотонных эффектов голографии, формирования изображений объектов и их пространственных фурье-спектров. Позднее эффекты двухфотонной дифракции и передачи изображений получили экспериментальное подтверждение Т.В.Питтманом с сотрудниками. Возможно эти усилия заложат основу нового раздела физики - *двухфотонной оптики*. Ее преимущество по сравнению с однофотонными прообразами состоит в возможности конфиденциальной передачи изображений. Для этого должны существовать два канала оптической связи. Без одновременной синхронной обработки сигналов обоих каналов расшифровать изображение невозможно.

В разделе 3.4 (Корреляция фотонов при неупругом рассеянии света) теоретически доказана предложенная А.Н.Пениным с сотрудниками возможность измерения параметров группировки фотонов или поляритонов вещества с произвольной статистикой путем зондирования светом и регистрации компонент неупругого рассеяния по схеме интерференции Брауна-Твисса. Ранее другими авторами были рассмотрены лишь частные случаи: случай тепловой статистики фотонов и когда фотоны находятся в энергетическом или сжатом состоянии. Исследованы также и другие варианты зондирования.

В Приложение 3.1 (Соотношения неопределенностей между амплитудными и фазовыми параметрами поля) вынесен материал, наглядно иллюстрирующий интерференционные эффекты. Ряд чисто математических аспектов вынесен в Приложение 3.2 (Вывод неравенства типа КХ). В Приложении 3.3 (Скорость совпадений и одиночных фотоотчетов при регистрации излучения невырожденного параметрического рассеяния) дано обобщение квантового расчета схемы эксперимента с параметрическим рассеянием на многомодовый случай.

В Заключении подведены итоги работы.

Список литературы включает около двухсот наименований.

**Основные результаты работы** состоят в следующем.

1. Развита последовательная теория естественной пространственной когерентности одномодовых лазерных пучков.

2. Учтена дифракция при описании приготовления квантовых сжатых состояний света посредством параметрического усиления. Физический смысл пространственных эффектов проанализирован на основании классической аналогии. Теория получила дальнейшее развитие в трудах М.И.Колобова, И.В.Соколова, Л.А.Луджиато, Р.Лефевра, П.Кьюмара.
3. Разработан способ сравнительно простого приготовления субпуассоновских состояний света путем пропускания когерентного излучения через границу раздела линейного и нелинейного диэлектриков. Нелинейность последнего должна приводить к фазовой самомодуляции. При обратном расположении диэлектриков эффект практически исчезает.
4. Исследован эффект приготовления сжатых и субпуассоновских состояний на начальном этапе распространения на основании квантовой теории шредингеровских солитонов в континуально-интегральном виде.
5. Выявлена предельная длина пробега оптического солитона в диссипативном волокне с компенсирующим усилением исходя из критерия равенства среднего смещения солитона под действием квантовых флуктуаций величине собственной ширины солитона. Установлено, что при совпадении полосы усиления с шириной и расположением спектра солитона, эта предельная длина лишь незначительно меньше предельной длины пробега в идеально прозрачном волокне.
6. Предложен эксперимент, который впоследствии подтвердил положение ортодоксальной интерпретации квантовой теории о том, что априорного (до измерения) определенного значения наблюдаемой, в частности, количества фотонов в поле, может не существовать.
7. Разработан алгоритм формулирования парадоксов Белла для трихотомных наблюдаемых и произвольного числа наблюдателей.
8. Выявлены резкие качественные различия предсказаний классической и квантовой теорий в четырехфотонной интерференции.
9. Внесен вклад в развитие нового раздела лазерной физики - *двухфотонной оптики*: предложены методы двухфотонной голографии и двухфотонной обработки изображений. Эффекты двухфотонной дифракции и двухфотонной передачи изображений экспериментально подтверждены Т.В.Питтманом с сотрудниками.
10. Теоретически доказана возможность измерения параметра группировки фононов или поляритонов вещества путем зондирования его светом и регистрации антистоксовой компоненты рассеяния по схеме интерференции Брауна-Твисса.

**Публикации диссертанта, связанные с темой диссертации:**

1. С.А.Ахманов, Н.Н.Ахмедиев, А.В.Белинский и др. *Новые физические принципы оптической обработки информации*. Под ред. С.А. Ахманова и М.А.Воронцова. М.: Наука. 1990. Гл. 3.
2. А.В.Белинский, Д.Н.Клышко. *УФН*, **163(8)**, 1, 1993.
3. А.В.Белинский. *Письма в ЖЭТФ* **59**, 137, 1994.
4. А.В.Белинский. *УФН* **164**, 435, 1994.
5. A.V.Belinsky, D.N.Klyshko. *Phys. Lett. A* **176**, 415, 1993.
6. А.В.Белинский. *Письма в ЖЭТФ* **64**, 294, 1996.
7. А.В.Белинский. *УФН* **167**, 323, 1997.
8. A.V.Belinsky, D.N.Klyshko. *Laser Physics* **2**, 112, 1992.
9. A.V.Belinsky, D.N.Klyshko. *Phys. Lett. A* **166**, 303, 1992.
10. А.В.Белинский, Д.Н.Клышко. *ЖЭТФ*. **102**, 1116, 1992.
11. А.В.Белинский. *Письма в ЖЭТФ* **54**, 13, 1991.
12. А.В.Белинский. *ЖЭТФ* **103**, 1538, 1993.
13. А.В.Белинский, Д.Н.Клышко. *ЖЭТФ*. **105**, 487, 1994.
14. А.В.Белинский. *Ж. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр.* N1, 9, 1985.
15. А.В.Белинский, М.В.Чехова. *ЖЭТФ*. **108**, 1956, 1995.
16. А.В.Белинский, А.С.Чиркин. *Изв. АН СССР. Сер. физическая* **50**, 791, 1986.
17. А.В.Белинский, А.С.Чиркин. *Квант. электрон.* **16**, 276, 1989.
18. С.А.Ахманов, А.В.Белинский, А.С.Чиркин. *Квант. электрон.* **15**, 873, 1988.
19. А.В.Белинский, А.С.Чиркин. *Квант. электрон.* **15**, 2150, 1988.
20. А.В.Белинский, А.С.Чиркин. *Оптика и спектроскопия.* **67**, 1226, 1989.
21. A.V.Belinsky, D.N.Klyshko. *Laser Physics* **4**, 663, 1994.
22. А.В.Белинский. *Квант. электрон.* **17**, 1182, 1990.
23. А.В.Белинский. *Квант. электрон.* **18**, 399, 1991.
24. А.В.Белинский. *Оптика и спектроскоп.* **70**, 106, 1991.

25. А.В.Белинский. *Квант. электрон.* **18**, 343, 1991.
26. А.В.Белинский. *Оптика и спектроскоп.* **70**, 889, 1991.
27. А.В.Белинский, А.С.Чиркин. *Письма в ЖТФ* **15**, 84, 1989.
28. А.В.Белинский, А.С.Чиркин. *Оптика атмосферы* **5**, 498, 1990.
29. А.В.Белинский. *Письма в ЖЭТФ* **51**, 341, 1990.
30. А.В.Белинский. *Квант. электрон.* **18**, 84, 1991.
31. А.В.Белинский, А.С.Чиркин. *Оптика и спектроскоп.* **66**, 1190, 1989.
32. С.А.Ахманов, А.В.Белинский, А.С.Чиркин. *Оптика и спектроскопия.* **66**, 738, 1989.
33. А.В.Белинский, Н.Н.Розанов. *Оптика и спектроскопия.* **73**, 153, 1992.
34. А.В.Белинский. *Ж. прикл. спектроскопии.* **50**, 469, 1989.
35. А.В.Белинский, А.С.Чиркин. *Квант. электрон.* **16**, 2570, 1989.
36. А.В.Белинский, А.С.Чиркин. *ЖЭТФ* **98**, 407, 1990.
37. A.V.Belinskii. *J. of Soviet Laser Research* **12**, 464, 1991.
38. А.В.Белинский. *Письма в ЖЭТФ* **53**, 73, 1991.
39. А.В.Белинский. *Письма в ЖЭТФ* **54**, 569, 1991.
40. А.В.Белинский. *Квант. электрон.* **19**, 891, 1992.
41. А.В.Белинский. *Изв. АН СССР. Сер. физическая* **56**, 48, 1992.
42. А.В.Белинский. *Изв. АН СССР. Сер. физическая* **55**, 351, 1991.
43. А.В.Белинский. *ЖЭТФ* **99**, 748, 1991.
44. А.В.Белинский. *ЖЭТФ* **103**, 1914, 1993.
45. А.В.Белинский. *УФН* **164**, 231, 1994.
46. А.В.Белинский. *Вестн. Моск. университета. Сер.3. Физика. Астрономия.* **3**, 34, 1999.