

## ОТЗЫВ

Официального оппонента доктора физико-математических наук,  
Кулика Сергея Павловича  
на диссертационную работу Астафьева Олега Владимировича  
“Квантовая оптика на искусственных квантовых системах”,  
представленную на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук  
по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния

Диссертационная работа О.В.Астафьева посвящена экспериментальному и теоретическому изучению эффектов взаимодействия квантованного электромагнитного поля с веществом. При этом вещество представлено искусственными структурами субмикронного масштаба, реализующими управляемые элементы в СВЧ-диапазоне на уровне квантов элементарного заряда, магнитного потока, а также звука.

Искусственный атом – сверхпроводниковая двухуровневая система, реализующая кубит (либо зарядовый, либо потоковый). Описание «настоящих» атомов, взаимодействующих с электромагнитным полем (даже в полуклассическом приближении) в оптическом диапазоне, очень похоже на физическую картину взаимодействия искусственных (макроскопических) атомов, реализованных на двухуровневых сверхпроводниковых системах, взаимодействующих с радиочастотным полем (от 30 кГц до 3 ТГц (длина волны от 10 км до 0.1 мм)). В качестве примера сошлюсь на рисунки 3.16 и 3.27, где изображены частотная дисперсия коэффициента отражения падающего на искусственный атом излучения в окрестности частот 10 ГГц. Картина качественно повторяет дисперсию

действительной и мнимой частей макроскопической восприимчивости ансамбля «настоящих» атомов в однорезонансном дипольном приближении. Такие явления, как эффект насыщения, резонансная флуоресценция, квантовое усиление, инверсия населенностей, вынужденное и спонтанное излучение, электромагнитно-индуцированная прозрачность, понятие обратной связи, взаимодействие поля с трехуровневыми системами, методы нестационарной оптики и многие другие описываются общими подходами на основе аппарата матрицы плотности, полуклассического приближения, приближения вращающихся волн и др. и давно известны в науке, которая получила название квантовая электроника. Разумеется, имеется специфика: тип кубитов, рассматривается ли поле в свободном пространстве или в резонаторе, какие шумы учитываются, но даже эти детали имеют аналоги в двух подходах и, в целом, ситуация представляется очень похожей.

Наверное, главным физическим признаком различия подходов в двух диапазонах является соотношение энергии кванта поля – фотона ( $\hbar\omega$ ) и тепловой энергии ( $kT$ ): в СВЧ диапазоне это отношение мало при комнатной температуре и квантово-оптические эффекты можно наблюдать только при температурах порядка мК, что компенсирует 5-6 порядков разницы в частотах. Подчеркну, что лейтмотивом диссертационной работы выступает сильная связь искусственных атомов с резонатором/открытым пространством. Именно благодаря разработанным в цикле работ О.В.Астафьева экспериментальным методам осуществлена высокая степень контроля физических искусственных квантовых систем в режиме сильной связи, что дает возможность реализовывать различные режимы взаимодействия поля и

искусственной системы и наблюдать эффекты ранее недостижимые в ортодоксальной квантовой оптике на естественных атомах.

Примечательно, что квантовые системы с искусственными атомами позволяют достичь режима, когда время взаимодействия «атом-резонатор» становится много меньше времени когерентности. При этом возможно реализовать беспороговый режим генерации со многими фотонами и всего с одним «атомом». Например, в работе продемонстрирован режим работы мазера с одним зарядовым кубитом на джозефсоновском переходе в котором инверсия населенности обеспечивается одноэлектронным туннелированием (характерная резонансная частота резонатора около 10 ГГц, добротность порядка  $10^4$ , затухание – около 1 МГц) - одноатомный мазер (Глава 3).

Интересно отметить, что в свое время многие подходы к описанию взаимодействия излучения с веществом перекочевали из СВЧ-диапазона в оптический. В 70-ые годы прошлого века бурное развитие нелинейной и квантовой оптики было связано, во первых, именно с наличием соответствующей теоретической и экспериментальной методологии, а с другой - появлением генераторов света в оптическом диапазоне – лазеров, т.е. фактически, развитием технологий. Здесь уместно сослаться на одного из основателей нелинейной и квантовой оптики Д.Н.Клышко: «В основе действия мазеров и лазеров лежат общие принципы - колыбелью квантовой электроники послужила радиоспектроскопия и радиофизика. Последняя снабдила квантовую электронику одним из основных понятий — понятием обратной связи, и не случайно, что основатели квантовой электроники и нелинейной оптики Басов, Бломберген, Прохоров, Таунс, Хохлов и многие другие были радиофизиками».



Физические эффекты, рассматриваемые в диссертации, фактически повторяют эту эволюцию в обратном направлении: от квантовой оптики в ее ортодоксальном понимании – обратно в СВЧ диапазон! И здесь наблюдается восстановление справедливости, ведь термин «квантовая электроника» возник из противопоставления классической электронике, имеющей дело в основном со свободными электронами, которые обладают непрерывным энергетическим спектром и, как правило, достаточно хорошо описываются классической механикой. Однако некоторые существенно квантовые приборы (на пример, основанные на эффекте Джозефсона) по сложившейся традиции не относят к сфере влияния квантовой электроники.

Судя по всему – и диссертация О.В.Астафьева яркое тому подтверждение – мы являемся свидетелями зарождения нового направления науки «квантовая радиофизика и электроника», охватывающего большой круг эффектов в широком диапазоне частот. Возможно, что соответствующие разделы физики должны быть скорректированы с учетом достижений современных технологий и общности подходов к описанию ряда эффектов взаимодействия излучения с веществом, в том числе, на уровне отдельных фотонов и фононов.

**Актуальность.** В настоящее время многие фундаментальные результаты квантовой и нелинейной оптики интенсивно используются в различных устройствах обработки информации, в спектроскопических исследованиях и при создании новых искусственных объектов, обладающих уникальными физическими свойствами. Современные технологии предоставляют обширный инструментарий и для исследования их свойств, и для продвижения в труднодоступные с точки зрения оптики частотные диапазоны, включая СВЧ. Диссертационная работа О.В.Астафьева

представляет собой глубокое научное исследование искусственных квантовых систем. В ней созданы предпосылки для создания нового научного направления, в котором исследуются свойства искусственно синтезированных систем, взаимодействующих с электромагнитным полем и проявляющих уникальные свойства на уровне одиночных квантов в СВЧ-диапазоне частот. Наглядно продемонстрированы возможности управления такими объектами, что открывает путь к постановке новых задач в области фундаментального взаимодействия электромагнитного излучения с веществом и создания устройств на их основе.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов не вызывают сомнения. Все представленные результаты опубликованы в рецензируемых журналах, из которых более 10 - в журналах группы Nature. Все результаты, лежащие в основе пяти оригинальных глав, носят пионерский характер и подтверждены более поздними исследованиями, проводимыми в других группах по всему миру. Результаты апробированы на многих тематических Международных конференциях самого высокого уровня, где они представлялись на пленарных и приглашенных докладах Автора.

Диссертация О.В.Астафьева объемом 432 стр. состоит из введения, пяти глав, вывода и списка литературы (399 наименований). В разделе «Выводы» сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Во Введении обоснована актуальность и научная новизна, сформулированы цели и задачи исследования, а также защищаемые положения.

Первая глава посвящена транспорту в квантовых точках в двумерном газе галлий-арсенидных гетероструктур под действием дальнего инфракрасного и терагерцового излучения. На основе таких структур созданы детекторы одиночных фотонов - на основе одноэлектронного транзистора и циклотронного резонанса в соответствующих частотных диапазонах. Детально исследованы их физические свойства и основные характеристики.

Во второй главе приводятся результаты исследования различных свойств сверхпроводниковых (искусственных) квантовых систем, - когерентности, высоко- и низкочастотных шумовых характеристик для различных реализаций кубитов (зарядовых и потоковых), в том числе двух взаимодействующих кубитов.

Особое место занимает третья, самая объемная глава, в которой приводятся результаты изящных экспериментов, демонстрирующих квантовые свойства при взаимодействии одиночных искусственных сверхпроводниковых систем с электромагнитным полем. Здесь приведены многие аналогии с «настоящей» квантовой и нелинейной оптикой, хорошо известные для оптического диапазона: лазерное усиление и генерация, спонтанная релаксация, резонансная флуоресценция (триплет Моллоу), ЭИП, продемонстрирован перестраиваемый однофотонный источник. В этой главе также подробно исследован новый эффект – квантовое смещение волн, а также различные его режимы.

Четвертая глава посвящена новому направлению в области взаимодействия поля и вещества – квантовой акустике. В этой главе демонстрируются два подхода к построению акустических систем на основе искусственных атомов – на подвешенных мостиках и на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Впервые



продемонстрирован квантовый режим резонатора ПАВ на основе искусственного атома и ряд других эффектов, в которых задействованы акустические фононы.

В пятой главе рассматривается крайне интересный эффект фундаментальной сверхпроводимости – когерентное проскальзывание фазы. Эффект всесторонне исследован в диссертации в разных проявлениях – в стационарном и нестационарном режимах, по суперпозиции квантов магнитного потока в сверхпроводящем кольце с нанопроволочкой, в виде интерференции двух туннельных амплитуд и др. Исследованы механизмы декогеренции.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертационной работы.

#### **Научная новизна работы:**

- продемонстрировано детектирование одиночных фотонов в дальнем инфракрасном диапазоне на циклотронном резонансе в сильных магнитных полях на квантовых точках в гетероструктурах GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As;
- продемонстрировано детектирование одиночных фотонов на плазменном резонансе в квантовой точке на двумерном электронном газе;
- продемонстрирована когерентная связь в системе из двух взаимодействующих кубитов;
- реализовано однократное считывание состояния сверхпроводникового зарядового кубита;
- исследованы времена когерентности сверхпроводниковых зарядовых кубитов и механизмы декогерентности;

- реализован лазерный эффект на одиночном искусственном атоме;
- экспериментально показана когерентная (сильная) связь потокового кубита с резонатором;
- реализована физически сильная связь искусственного атома с одномерным открытым пространством – копланарной линией;
- продемонстрирован целый ряд фундаментальных явлений квантовой оптики на искусственном атоме в открытом одномерном пространстве.
- реализован и продемонстрирован перестраиваемый источник фотонов в СВЧ диапазоне по требованию с высокой эффективностью;
- продемонстрирована сильная связь сверхпроводникового кубита с резонатором на поверхностных акустических волнах;
- реализован эффект квантового проскальзывания фазы посредством суперпозиции квантов магнитного потока через нанопроволочку. Эффект продемонстрирован методами квантовой оптики – по спектроскопии двухуровневой системы с туннельным элементом для квантов магнитного потока;
- показана интерференция амплитуд проскальзывания фаз через две нанопроволочки (Эффект Ааронова-Кащера). Эффект дуальный интерференции амплитуд туннелирования куперовских пар в СКВИД-е;
- продемонстрирован фундаментальный эффект нестационарного проскальзывания фазы под действием микроволнового излучения – фундаментальный эффект физики, который полностью дуален нестационарному эффекту Джозефсона.



**К работе имеются следующие замечания:**

Общее замечание - работа изобилует жаргонизмами. Прежде всего, это относится к термину «кубит». К сожалению, это устоявшееся тенденция в сверхпроводниковых квантовых технологиях. Например, на стр. 98 написано: «Кубит представляет собой остров куперовских пар (box), соединенный с большим островом ловушки (trap через джозефсоновский переход джозефсоновской энергией  $E_j \approx 20$  мкэВ».

На стр.118: «... мы изготовили кубиты с той же геометрией и свойствами перехода, что и кубиты, использованные в работе [77]» и т.д.

По определению, кубит – это мера квантовой информации, аналогично тому как бит – мера классической информации. А реализовать эту двухуровневую систему можно посредством сверхпроводниковой схемы, включающей джозефсоновский переход.

Встречаются и другие жаргонизмы: «эластичное» и «неэластичное» рассеяние (стр.11, 229, 291), хотя на стр. 203 приводятся уже корректные термины «упругое» и «неупругое»;

«измерили спектроскопию...» (стр.169), «увидеть спектроскопию уровней» (стр.215), «снятая прохождение в широком диапазоне...» (207);

«впервые реализовано однократное вычитывание...» (стр.8)

К общим замечаниям также можно отнести то что, к сожалению, в работе практически ничего не говорится о статистических свойствах излучения (СВЧ-фотонов). Вместе с тем именно статистика фотонов является важным разделом современной квантовой оптики.

## 1. По Главе 1.

1.1. Стр.41. Говорится, что регистрируется около 100 фотонов в сек.

Возникает вопрос, возможно ли детектировать одиночные фотоны и какова квантовая эффективность процесса? Если наблюдаемой величиной является скорость переключений проводимости, сколько «переключений можно зарегистрировать на  $N$  упавших фотонов».

1.2. Стр.52. Говорится, что скорость переключений проводимости в зависимости от частоты падающего излучения «хорошо описывается кривой Лоренца». Однако, на рисунке 1.15 видно, что это не так: левое крыло экспериментальной кривой проходит заметно выше лоренциана, а правое – заметно ниже, т.е. экспериментальный график проявляет асимметрию. Вопрос: что в теории и как объяснить эту асимметрию.

## 2. По Главе 2.

2.1. На стр. 94 отмечается, что используемая схема считывания не позволяет оценить вероятности четырех базисных состояний  $|00\rangle$ ,  $|01\rangle$ ,  $|10\rangle$  и  $|11\rangle$  по отдельности. Поэтому для измерения таблицы истинности двухкубитного состояния и преобразования CNOT используется моделирование. Кроме того, я не нашел итогового значения меры соответствия экспериментального значения теоретическому (fidelity) для операции CNOT, хотя сами матрицы измеренных значений приводятся на рис. 2.8 и на стр.96.

2.2. В разделе 2.2. обсуждается динамика временной релаксации состояний зарядового кубита (Рис.2.10-2.12, формула 2.4). При этом максимальная видность осцилляций вероятности составляет 0.64 (в максимуме около 0.8, в минимуме – 0.15) и я не нашел объяснения того, почему эта величина отличается от единицы. Кроме того, аппроксимация экспериментального графика 2.12(b) двухпараметрической кривой ( $\alpha = (37\text{нс})^{-1}$ ,  $n_0^*/n_{\text{tot}}=0.84$ ) дает значение эффективности преобразования  $|0\rangle$  в  $|1\rangle$  при помощи управляющего  $\pi$ -импульса около 0.84 – опять же без объяснения причины отличия от единицы.

2.3. На Рис. 2.15 показана скорость релаксации  $\Gamma_1$  в зависимости от джозефсоновской энергии  $E_J$ . В точке вырождения (черные кружки) зависимость носит немонотонный характер и поскольку экспериментальные ошибки не указаны, трудно понять вызвана ли эта немонотонность частотной зависимостью спектральной плотности SU или флуктуациями экспериментальных данных. Замечание является общим – на многих экспериментальных графиках не отложен разброс данных! Так в комментарии к Рис. 2.16(a) говорится о наличии резонансных пиков (на частотах 7 и 30 ГГц). Вместе с тем эти пики могут быть, в частности, объяснены разбросом экспериментальных данных.

2.4. На Рис.2.17(c) экспериментальные точки (из-за отсутствия разброса) вообще могут быть аппроксимированы параболой, а не прямой – в силу наличия особенностей в низко- и высокотемпературных областях на графике. Поскольку на основании этих экспериментов делается вывод о квадратичной зависимости  $\alpha(T^2)$ , учет ошибок является критичным.



### 3. По Главе 3.

3.1. В Разделе 3.1 рассматривается эффект «одноатомного лазера». Однако было бы крайне интересно узнать о статистических свойствах излучения такого лазера – хотя бы на уровне предположений.

3.2. В разделе 3.7, посвященном описанию однофотонных источников, не приводится численное значение корреляционной функции второго порядка  $g^{(2)}(\tau = 0)$ , хотя в выводе 10 к Главе 3 указано, что «Измерен коррелятор для перестраиваемого источника фотонов по требованию...»

3. В разделе 3.8 при описании явления квантового волнового смещения (КСВ) непонятным остается следующий вопрос: появление асимметричных пиков в спектрах на Рис. 3.40 (а) или 3.41 (для состояний 3.174 или 3.178) связано именно с суперпозицией состояний  $|0\rangle$ ,  $|1\rangle$  (и  $|2\rangle$ )? Или в случае их смеси  $|0\rangle\langle 0|$ ,  $|1\rangle\langle 1|$  (и  $|2\rangle\langle 2|$ ) будет наблюдаться аналогичная картина? Фактически, вопрос сводится к тому, насколько состояния 3.174 или 3.178 при рассматриваемом способе их получения, являются чистыми.

4. По Главе 4 замечаний нет.

### 5. По Главе 5

5.1. В разделе 5.1 (на стр. 329) при обсуждении когерентной связи между состояниями потока в петле практически не обсуждается вопрос о механизме декогеренции, приводящей к уширению наблюдаемого резонанса 5.6 ГГц с  $\Delta f = 260$

МГц (Рис.5.2d). Было бы интересно исследовать этот механизм, не ограничиваясь только предположением о «низкочастотном гауссовом шуме».

И наконец, формальное замечание: текст написан от третьего лица с частым употреблением личного местоимения «мы», что не является общепринятым в научной литературе.

Однако эти замечания, безусловно, не влияют на положительную оценку выполненной работы и не ставят под сомнение основные выводы диссертации.

Особенно хочется отметить отличное совпадение ряда экспериментальных результатов с теоретическими расчетами. Например, это касается результатов сравнения экспериментальных данных с формулой 3.186 - для амплитуд боковых спектральных компонент волнового смещения ( $\pm 3$ ,  $\pm 5$ ,  $\pm 7$  и  $\pm 9$ ). Это подтверждает адекватность использованных подходов и высокое качество эксперимента.

По теме диссертации опубликовано 86 работ, в числе которых 12 – в Nature и Nature Communications. 81- в индексируемой базе данных Web of Science/Scopus).

Результаты диссертации были широко представлены на российских и международных конференциях (99 мероприятий, из которых 93 доклада–приглашенные или пленарные). Публикации автора достаточно полно отражают содержание диссертации. Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

По совокупности полученных результатов диссертация Астафьева Олега Владимировича «Квантовая оптика на искусственных квантовых системах» является законченным исследованием высокого уровня и полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК, соответствует паспорту специальности «Физика

конденсированного состояния» (1.3.8) и отвечает требованиям пп. 2, 4, 5, 9, 11 «Положения о присвоении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор - Астафьев Олег Владимирович, вне всяких сомнений, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 - «Физика конденсированного состояния».

Кулик Сергей Павлович



« 4 » марта 2024 г.

Доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры квантовой электроники  
Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова,  
Ленинские горы, дом 1, строение 2, ГСП-1, Москва, 119991  
sergei.kulik@physics.msu.ru  
Тел.: +7 (910) 484-06-22.  
специальность, по которой защищена диссертация:  
1.3.19 (01.04.21) - Лазерная физика

Подпись Кулика Сергея Павловича удостоверяю:

Белокуров Владимир Викторович,  
и.о. декана физического факультета

Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, профессор  
Российская Федерация, 119991, г. Москва, Ленинские горы 1, стр. 2.  
тел.: 7-(495) 939-31-60

Белокуров Владимир Викторович

« 04 » марта 2024 г.

