

На правах рукописи



Султанов Айдар Наильевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОННОГО ТРАНСПОРТА В ГИБРИДНЫХ
ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ, СОДЕРЖАЩИХ ИСКУССТВЕННЫЕ
АТОМЫ**

Специальность: 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель:

Гринберг Яков Симхонович
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Сатанин Аркадий Михайлович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт
автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА»),
главный научный сотрудник

Брагинский Леонид Семенович
кандидат физико-математических наук, доцент,
Федеральное бюджетное государственное учреждение
науки Сибирского отделения Российской академии наук
«Институт физики полупроводников им. А. В.
Ржанова» (ФБГУН СО РАН), старший научный
сотрудник

Ведущая организация:

Институт физики микроструктур РАН — филиал
Федерального государственного бюджетного научного
учреждения «Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской академии
наук» (ФИЦ ИПФ РАН)

Защита состоится 31 марта 2020 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.037.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук:
<https://www.isp.nsc.ru/obrazovanie/dissertatsionnyj-sovet/zasedaniya/sultanov-ajdar-nailevich>.

Автореферат разослан . __ . ____ 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Погосов Артур Григорьевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы

На роль базового элемента квантового процессора существует несколько физических объектов. Это атомы рубидия (оптический диапазон), квантовые точки, вакансии азота в кремниевых подложках и в алмазах, сверхпроводниковые джозефсоновские кубиты и т.д. Их объединяет тот факт, что в упрощенной модели они могут рассматриваться как двухуровневая система, и если атомы рубидия представляют собой естественный атом, то параметры остальных могут быть заданы технологически и, по этой причине, называются искусственными атомами. Поскольку в твердотельных структурах со сверхпроводниковыми кубитами управление системой производится с помощью различных микроволновых линий, выполняемых в виде микрополосковых, копланарных или объемных линий передач, такие структуры называются гибридными.

В современных демонстрируемых квантовых компьютерах, элементная база которых основана на сверхпроводниковых джозефсоновских переходах, процедуры записи и считывания информации, а также манипуляции с ней при реализации квантовых вычислений основаны на взаимодействии кубитов с единичными фотонами, энергии которых лежат в микроволновом частотном диапазоне. Из этого вытекает проблема создания однофотонных детекторов и источников в микроволновом диапазоне, и к настоящему моменту она не решена полностью, хотя успехи в этом направлении безусловно есть, например, реализация *single-shot readout*-а с использованием параметрического усилителя.

Другая проблема состоит в масштабируемости предлагаемых схем. По общему мнению, для создания полноценного квантового процессора требуется несколько сот кубитов. Как правило, свойства многокубитной системы строятся аддитивным путем из свойств одного элемента. Тем не менее, поскольку в квантовых измерениях фазовые свойства играют важнейшую роль, когда расстоянием между элементами нельзя пренебрегать, общие свойства системы не являются простым линейным следствием из свойств единичного элемента и модифицируются.

Вычисления на квантовом процессоре представляют собой измерение эволюции волновой функции квантовой системы. Но для начала работы с квантовой системой необходимо уметь определять параметры ее элементов путем простых измерений. Существующие аналитические решения хорошо работают в марковском приближении и в приближении единичного фотона и позволяют охарактеризовать систему путем измерения ее транспортных свойств и сопоставления их с аналитическими выражениями.

Естественно, что если вводимые приближения оказываются нарушены, такие аналитические выражения не могут быть использованы для определения параметров системы. Изучение свойств систем, содержащих кубиты, актуально и с точки зрения создания квантового процессора, и с точки зрения получения характеристик квантовых цепей на их основе, и с точки зрения изучения возможных эффектов при взаимодействии микроволнового излучения с ними.

Для исследования транспорта микроволновых фотонов существует несколько различных теоретических подходов, берущих свое начало в квантовой оптике. Например, исследования транспорта микроволновых сигналов в одномерном волноводе с одним кубитом были выполнены в конфигурационном пространстве [1-5], а также в рамках input-output формализма [6-7]. Решение в конфигурационном пространстве дает аналитические выражения для рассеяния двухфотонных состояний с непрерывным спектром [8]. Методом input-output формализма была исследована динамика когерентных состояний, фоковских и сжатых состояний [7- 9], а также получено решение для задачи рассеяния двух - и трехфотонных состояний на двухуровневой системе [10].

Суммируя, можно сказать, что существующие методы в ряде случаев оказываются громоздкими, и в основном имеют следующие недостатки:

- аналитические решения получены только в приближение одного фотона;
- разброс параметров элементов исследуемых систем (собственные частоты, постоянные взаимодействия и т.д.) значительно усложняет процедуру расчета;
- используется марковское приближение, которое в некоторых задачах обходится поиском специальных граничных условий;
- время когерентности кубита учитывается с помощью оператора Линдблада, описывающего два локальных некоррелирующих термостата, притом, что имеются результаты, показывающие, что наличие общего термостата может существенно повысить устойчивость запутанных состояний [11];

Таким образом, к настоящему времени отсутствуют аналитические методы позволяющие аналитически описать транспорт фотона с учетом разброса параметров, реально существующего в гибридных твердотельных квантовых структурах. Отсутствует устоявшийся и проверенный подход к описанию немарковских процессов, становящихся существенными с увеличением числа элементов систем. А также отсутствует аналитическое решение, позволяющее учесть релаксацию кубита, взаимодействующего с многофотонным резонатором.

Целью данной работы является развитие метода эффективного неэрмитового гамильтониана для расчета транспортных коэффициентов гибридных твердотельных квантовых цепей, содержащих искусственные атомы, при рассеивании на них фотона.

В соответствии с этим, **основными задачами** диссертационной работы являются:

1. Построение аналитической модели транспорта микроволнового фотона через гибридную структуру, содержащую один кубит и микроволновый резонатор, с произвольным числом фотонов, и определение влияния локального термостата на транспортные коэффициенты.

2. Построение аналитической модели транспорта микроволнового фотона через структуру, состоящую из двух резонаторов, расположенных на произвольном расстоянии друг от друга, в каждом из которых имеется по одному кубиту, при учете для каждого кубита, как общего, так и локальных каналов релаксации. Определение влияния расстояния между резонаторами на транспортные коэффициенты

3. Разработка аналитической модели переноса возбужденного состояния между двумя кубитами, разнесенными в пространстве одномерного открытого волновода, с учетом влияния декогеренции

4. Исследование распространения микроволнового излучения через цепочки нелинейных элементов (включая контакты Джозефсона и сильно неупорядоченные сверхпроводники) в копланарном волноводе и разработка методики проектирования топологии параметрического усилителя на основе данных нелинейных элементов.

Научная новизна. Научная новизна результатов, полученных в диссертации, заключается в следующем:

1. При исследовании транспорта микроволнового фотона через структуру, содержащую один искусственный атом и резонатор, содержащий произвольное число фотонов, обнаружено расщепление центрального пика триплета Моллоу при малом числе фотонов в резонаторе и получены аналитические выражения, позволяющие проанализировать влияние параметров системы на ее амплитудно-частотные характеристики.

2. Получены аналитические выражения, позволяющие определить как нелинейный штарковский сдвиг, так и сдвиг резонансной частоты в зависимости от числа фотонов с учетом релаксации кубита и добротности резонатора. Показано, что при определенных параметрах можно получить нелинейную зависимость этих сдвигов от числа фотонов даже при малом числе фотонов. Полученные выражения описывают тот

факт, что увеличение числа фотонов приводит к нелинейному возрастанию релаксации кубита.

3. Обнаружены эффекты интерференции, проявляемые на частотных зависимостях коэффициентов прохождения и отражения, связанные с тем, что для двухкубитных структур оказывается значимым эффект запаздывания между взаимодействиями микроволнового фотона с кубитами на расстоянии, сравнимом с его длиной волны. Показано, что существенное влияние на транспорт микроволновых фотонов оказывает наличие общего нерадиационного канала распада. В общем виде транспортные коэффициенты значительно отличаются от ранее известных результатов (которые являются частными случаями полученного выражения), что связано с более полным учетом взаимодействия с термостатами, описывающими каналы нерадиационного распада.

4. Разработана методика проектирования сверхпроводниковых параметрических усилителей на основе контактов Джозефсона и сильно неупорядоченных сверхпроводников, и предложено три дизайна параметрических усилителей.

Теоретическое и практическое значение

Новые научные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационных исследований, могут быть использованы при дальнейшем развитии теории на случай многофотонного транспорта микроволновых фотонов и, в общем случае, могут быть обобщены и на случай оптического диапазона, поскольку использованные модели взаимодействия носят универсальный характер.

Полученные в диссертационной работе результаты позволят не только существенно сократить и упростить анализ экспериментальных данных, но также будут полезны при проектировании новой стремительно развивающейся элементной базы квантовых устройств и систем на основе одно- и двух кубитных структур. Более того, найденные зависимости позволяют, на этапе проектирования, произвести оценку основных характеристик ряда приборов, в которых используется лишь один кубит (роутер, ключ, детектор). и провести их оптимизацию для различных режимов работы, включая одно- и многофотонные режимы. На основании полученных в диссертации результатов предложен вариант простейшего однофотонного детектора микроволновых фотонов на базе однокубитной структуры с резонатором. Результаты, полученные при описании транспорта фотона через двухкубитные структуры с учетом локальных и общих термостатов, являются важными при их экспериментальном исследовании.

Ценность полученных аналитических решений обусловлена тем, что, во-первых, впервые решение получено для резонатора с произвольным числом фотонов, во-вторых, решения получены без использования марковских приближений, что приводит к появлению новых интерференционных эффектов. Практическую значимость имеет методика проектирования сверхпроводниковых параметрических усилителей. Предложено три варианта топологии параметрических усилителей, с подробным описанием этапов проектирования, покрывающие наиболее распространенную рабочую полосу частот квантовых твердотельных сверхпроводниковых цепей. Полученные результаты можно использовать в качестве целевой функции при оптимизации однокубитных структур с резонатором, как при их проектировании, так и при анализе экспериментальных данных. Данные результаты необходимо использовать при научно-обоснованной разработке квантовых твердотельных устройств с учетом реально существующих расстояний между его составными элементами и разброса параметров.

Положения, выносимые на защиту

1. Классический триплет Моллоу при малом числе фотонов в резонаторе модифицируется, приводя к спектру с четырьмя резонансами, что обусловлено особенностями гибридизации уровней в таком режиме. Зависимости положения резонансных уровней и их ширины от числа фотонов в резонаторе, которые описывается полученными аналитическими выражениями, соответствуют штарковскому эффекту.

2. Релаксация кубита в многофотонном резонаторе должна учитываться включением в рассматриваемую систему локального термостата. При этом получаемый результат отличается от модели Линдблада тем, что релаксация кубита входит в аналитические выражения транспортных коэффициентов как мнимая добавка к частоте Раби расщепления в резонансных частотах системы, а не к собственной частоте кубита. Также, в отличие от стандартной модели, зависимость коэффициентов прохождения от величины релаксации становится нелинейной.

3. В многокубитных структурах наличие расстояния между кубитами или резонаторами приводит к возникновению интерференционных эффектов, проявляемых в на амплитудно-частотных зависимостях транспортных коэффициентов. В частности возникает Фано-резонанс в виде асимметричной характеристики. Интерференция волновых функций также определяет наличие суб- и сверхрадиантных эффектов, и вероятность переноса возбужденного состояния между двумя кубитами.

4. В двухкубитной структуре, влияние локальных и общего термостатов на транспортные коэффициенты существенно различается. Связь с общим термостатом приводит к появлению в недиагональных элементах эффективного гамильтониана системы мнимой добавки, в то время как локальные термостаты дают вклад только в диагональные. Поэтому распад возбужденных состояний кубитов в общий термостат определяется расстоянием между ними, учитываемом только во взаимодействии кубитов с микроволновым фотоном.

Методология и методы исследования

Теоретические результаты, представленные в настоящей диссертации, получены с использованием метода эффективного неэрмитового гамильтониана и общепринятых методов в теории электродинамики.

Личный вклад автора в получение результатов

Автором внесен определяющий вклад в получение основных результатов диссертационных исследований. Он активно участвовал в постановке и решении задач, в обсуждении и интерпретации результатов.

Апробация работы

Изложенные в диссертации результаты обсуждались на конференциях:

XI, XII, XIII Международная научно-техническая конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП)» (Новосибирск, 2016, 2014, 2012);

II, III, IV международные конференции "Мезоскопические структуры в фундаментальных и прикладных исследованиях» (Бердск 2013г., Бердск 2015, Иркутск, пос. Листвянка, 2017 г.);

XX и XXI международные симпозиумы «Нанопизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород 2016, 2017);

International conference on quantum coherent phenomena at nanoscale (Montenegro, Petrovac, 2016);

16-ая Всероссийская школа семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (г. Екатеринбург 2015)

Публикации

Оригинальные результаты по теме диссертации опубликованы в 19 научных работах, в том числе 11 материалов конференции и препринтов, а также 8 статей в международных и Российских журналах из списка ВАК.

Степень достоверности

Результаты, полученные в рамках данной диссертации, не противоречат имеющимся в литературе данным, и в предельных случаях сводятся к общеизвестным результатам. Достоверность полученных результатов подтверждена публикацией основных результатов диссертации в рецензируемых международных и отечественных журналах, входящих в наукометрические базы данных Web of Science и SCOPUS.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, списка использованной литературы из 106 наименований и 4 приложений. Общий объём работы составляет 181 страницы и включает 63 рисунка, 4 приложения и 5 таблиц.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, а также представлены выносимые на защиту положения.

В **Главе 1** проведен аналитический обзор по существующим методам описания транспорта фотонов в квантовых системах, а также на примере однокубитной структуры подробно разобран метод неэрмитового гамильтониана, являющийся основным методом в рамках данной работы.

Глава 2 «Системы с одним искусственным атомом» содержит теоретическое исследование транспорта единичного фотона, через систему с одним кубитом в N -фотонном резонаторе.

В **разделах 2.1.** и **2.2** исследовалась задача нахождение транспортных характеристик однокубитной структуры с резонатором, содержащим N фотонов как без учета, так и с учетом релаксации кубита.

Полный гамильтониан системы, с учетом релаксации (представленной в виде локального термостата), может быть записан следующим образом:

$$H = \frac{1}{2} \hbar \Omega \hat{\sigma}_Z + \hbar \omega_c \hat{a}^\dagger \hat{a} + \sum_k \hbar \omega_k \hat{c}_k^\dagger \hat{c}_k + \hbar \xi \sum_k (\hat{c}_k^\dagger \hat{a} + \hat{c}_k \hat{a}^\dagger) + \hbar \lambda (\hat{a}^\dagger + \hat{a}) \hat{\sigma}_x + \sum_l \hbar \omega_l \hat{b}_l^\dagger \hat{b}_l + \hat{\sigma}_x \sum_l \gamma_l (\hat{b}_l^\dagger + \hat{b}_l), \quad (1)$$

где Ω – собственная частота кубита, ω_c – фундаментальная частота резонатора, ω_k – частота налетающего фотона, ξ – константа связи волновода и резонатора, λ – константа связи резонатора и кубита, оператор σ_Z – матрица Паули $\sigma_Z |g\rangle = -|g\rangle; \sigma_Z |e\rangle = |e\rangle$, где $|g\rangle, |e\rangle$ -основное и возбужденное состояние кубита, соответственно; $\sigma_- (\sigma_+)$ – оператор понижения (повышения) состояния кубита $\sigma_- = |g\rangle\langle e|, \sigma_+ = |e\rangle\langle g|$, $a^\dagger (a)$ и $c_k^\dagger (c_k)$ операторы рождения (уничтожения) фотонов в резонаторе и в волноводе, соответственно, и последние два слагаемых описывают термостат (частота ω_l и операторы $\hat{b}_l^\dagger, \hat{b}_l$) и его взаимодействие с двухуровневой системой (γ_l – постоянная взаимодействия).

Данную систему можно описать следующим набором состояний: $|G\rangle = |0_W\rangle \otimes |g, N\rangle$ (нет фотонов в волноводе, кубит находится в основном состоянии и в резонаторе имеется N фотонов); $|E\rangle = |0_W\rangle \otimes |e, N-1\rangle$ (нет фотонов в волноводе, кубит находится в

возбужденном состоянии и в резонаторе имеется $N-1$ фотонов); $|K_G\rangle = |k_W\rangle \otimes |g, N-1\rangle$ (один фотон в волноводе, кубит находится в основном состоянии и в резонаторе имеется $N-1$ фотонов); $|K_E\rangle = |k_W\rangle \otimes |e, N-2\rangle$ (один фотон в волноводе, кубит находится в возбужденном состоянии и в резонаторе имеется $N-2$ фотонов).

Взаимодействие в гамильтониане (1) приводит к гибридизации состояний $|K_G\rangle, |K_E\rangle$ и $|G\rangle, |E\rangle$. В частности, получаются следующие суперпозиции:

$$|\Psi_i\rangle = \alpha_i^{N-1} |K_G\rangle + \beta_i^{N-1} |K_E\rangle = |k_W\rangle \otimes |\phi_i^{N-1}\rangle. \quad (2)$$

$$|\chi_i\rangle = \alpha_i^N |G\rangle + \beta_i^N |E\rangle$$

где коэффициенты суперпозиции определяются как

$$\alpha_1^{N-1} = a^{N-1}; \beta_1^{N-1} = b^{N-1}; \alpha_2^{N-1} = -b^{N-1}; \beta_2^{N-1} = a^{N-1},$$

$$\text{и } \Omega_R^N = \sqrt{(\omega_c - \Omega)^2 + 4\lambda^2 N}, \quad a^{N-1} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\omega_c - \Omega}{\Omega_R^{N-1}} \right)}; \quad b^{N-1} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_c - \Omega}{\Omega_R^{N-1}} \right)}.$$

Наглядно, процесс рассеяния представлен на Рисунке 1, из которого видно, что существует несколько различных сценариев рассеяния единичного фотона.

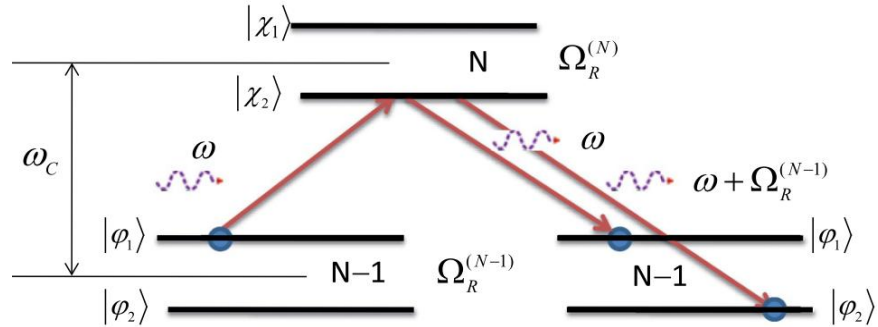


Рисунок 1 — Схема рассеяния одиночного фотона при исходном состоянии $|\phi_1\rangle$, в качестве примера приведено возбуждение уровня $|\chi_2\rangle$

Каждому сценарию соответствует своя волновая функции системы после рассеяния фотона. Все возможные комбинации исходных и конечных состояний системы сведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Комбинации исходных и конечных состояний в однокубитной структуре

	Амплитуда вероятности	Исходное состояние	Конечное состояние
А	t_{11}	$ \varphi_1\rangle$	$\langle\varphi_1 $
Б	t_{12}	$ \varphi_1\rangle$	$\langle\varphi_2 $
В	t_{21}	$ \varphi_2\rangle$	$\langle\varphi_1 $
Г	t_{22}	$ \varphi_2\rangle$	$\langle\varphi_2 $

Волновые функции, из которых возможно определить коэффициент прохождения фотона после рассеяния записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= e^{ik_{in}x} |\varphi_1\rangle - j\Gamma_w t_{11} e^{ik_{in}x} |\varphi_1\rangle - j\Gamma_w t_{21} e^{j\left(k_{in} + \frac{\Omega_R^{N-1}}{v_g}\right)x} |\varphi_2\rangle; \\ \Phi_2 &= e^{ik_{in}x} |\varphi_2\rangle - j\Gamma_w t_{22} e^{ik_{in}x} |\varphi_2\rangle - j\Gamma_w t_{12} e^{j\left(k_{in} - \frac{\Omega_R^{N-1}}{v_g}\right)x} |\varphi_1\rangle, \end{aligned} \quad (3)$$

где $t_{11}, t_{12}, t_{21}, t_{22}$ – комплексные амплитуды вероятности для сценариев А, Б, В, Г соответственно (см. Таблицу 1), k_{in} – волновой вектор рассеиваемого фотона.

Коэффициенты прохождения для сценариев А и Г по определению равны $T_{11} = 1 - j\Gamma t_{11}$ и $T_{22} = 1 - j\Gamma t_{22}$. На Рисунке 2 представлен спектр модуля коэффициента прохождения, при потенциальном рассеянии единичного фотона, на котором показана модификация триплета Моллоу в спектр с четырьмя выраженными резонансами.

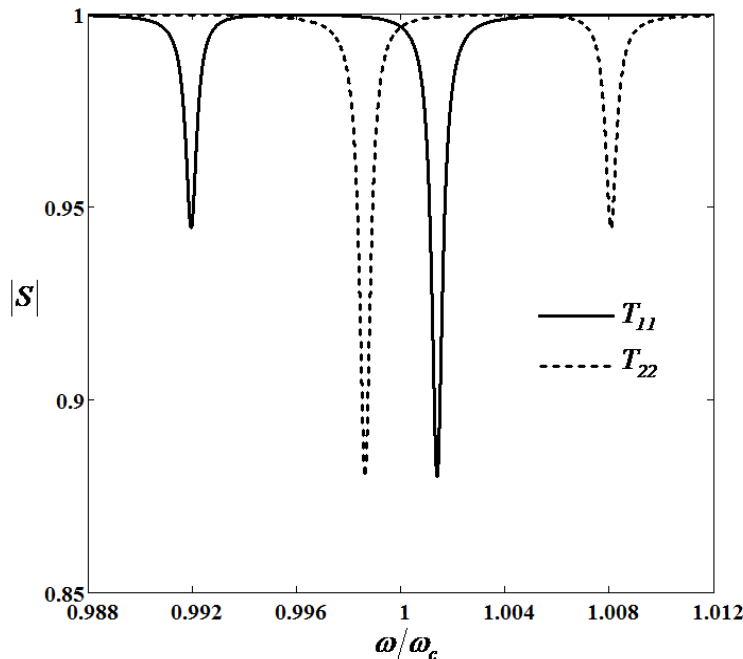


Рисунок 2 — Амплитудно-частотная характеристика в сильном резонансном режиме для потенциального рассеяния. Параметры системы: $\Omega=3$ ГГц, $\omega=3$ ГГц, $\Gamma_w=1$ МГц, $\lambda=10$ МГц, $\Gamma_q=0.1\Gamma$, $N=2$

Положения этих резонансов и их ширины описываются следующими выражениями:

$$\begin{aligned}\omega_{1\pm} &= \omega_c - \frac{\Omega_R^{N-1}}{2} - \frac{i}{4}(\Gamma_w(2N-1) + \Gamma_q) \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left[\omega_c - \Omega - \frac{j}{2}(\Gamma_w - \Gamma_q)\right]^2 + 4\lambda^2 N}; \\ \omega_{2\pm} &= \omega_c + \frac{\Omega_R^{N-1}}{2} - \frac{i}{4}(\Gamma_w(2N-1) + \Gamma_q) \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left[\omega_c - \Omega - \frac{j}{2}(\Gamma_w - \Gamma_q)\right]^2 + 4\lambda^2 N},\end{aligned}\quad (4)$$

здесь постоянные спонтанного излучения из резонатора в волновод $\Gamma_w = 2 \frac{\xi^2}{v_g} L$ и

релаксация кубита $\Gamma_q = 2 \frac{\gamma^2}{v_g} L_{bath}$ получены с учетом пространственных размеров

волновода и локального термостата (L и L_{bath} соответственно).

Выражения (4) описывают смещения собственных частот резонатора и кубита вследствие их взаимодействия и с учетом затухания обоих. При этом они могут быть использованы для описания штарковского сдвига и изменения ширины уровня, соответствующего кубиту, от числа фотонов в резонаторе. Для получения транспортных характеристик, даже в рамках однофотонного взаимодействия, для числа фотонов $N=2, 3$ в известных работах использовались численные методы расчета [12; 13]. В рамках данной диссертации были получены аналитические выражения, где число фотонов вошло в выражения в явном виде.

В разделе 2.1 показано, что полученные аналитические выражения описывают не только триплет Моллоу, но и эффект фотонной блокады. Также обозначена область применимости полученных результатов на примере задачи с рассеянием двух фотонов в волноводе. Показано, что многофотонными процессами в волноводе можно пренебречь в режиме сильной связи, когда

$$\lambda \gg \Gamma_w; \lambda \gg \omega_c - \Omega.$$

В разделе 2.2 показана некорректность замены собственной частоты кубита на комплексную величину $\Omega \rightarrow \Omega - j\Gamma_q$, для случаев когда $N > 1$. Подход с включением в задачу локального термостата дал разумный результат, в предельном случае ($N=1$), приводя к общеизвестным результатам.

В разделе 2.3 представлен аналитический метод определения основных параметров структуры на основе экспериментально полученных транспортных коэффициентов. В рамках этого раздела, показан возможный вариант однофотонного детектора, в основе

принципа работы которого лежат полученные выше теоретические результаты. А именно, показана резкая зависимость коэффициента прохождения от числа фотонов в резонаторе.

Глава 3 посвящена двухкубитным структурам, а именно:

- два кубита в открытом волноводе, на произвольном расстоянии друг от друга

- два резонатора с кубитами в открытом волноводе, на произвольном расстоянии

друг от друга

В разделе 3.1 исследован транспорт фотона в системе с двумя кубитами в открытом волноводе, описываемой следующим гамильтонианом:

$$H = \sum_k \hbar \omega c_k^\dagger c_k + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \hbar \Omega_i \sigma_z^{(i)} + \sum_k \sum_{i=1}^2 \hbar \xi_i \left(c_k^\dagger \sigma_-^{(i)} e^{-jkx_i} + c_k \sigma_+^{(i)} e^{jkx_i} \right). \quad (5)$$

При этом базис состояний был ограничен следующим набором:

$$\begin{aligned} |k\rangle \otimes |g_1, e_2\rangle &\equiv |k\rangle \otimes |4\rangle \equiv |a\rangle, & |k\rangle \otimes |e_1, g_2\rangle &\equiv |k\rangle \otimes |3\rangle \equiv |b\rangle, \\ |k\rangle \otimes |g_1, g_2\rangle &\equiv |k\rangle \otimes |2\rangle \equiv |c\rangle. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} |0\rangle \otimes |e_1\rangle \otimes |e_2\rangle &\equiv |0\rangle \otimes |1\rangle, & |0\rangle \otimes |g_1\rangle \otimes |g_2\rangle &\equiv |0\rangle \otimes |2\rangle, \\ |0\rangle \otimes |e_1\rangle \otimes |g_2\rangle &\equiv |0\rangle \otimes |3\rangle, & |0\rangle \otimes |g_1\rangle \otimes |e_2\rangle &\equiv |0\rangle \otimes |4\rangle. \end{aligned} \quad (7)$$

Полученные аналитические выражения для транспортных коэффициентов описывают интерференционные эффекты, обусловленные конечным расстоянием между кубитами. На Рисунке 3 представлена частотная зависимость коэффициента прохождения, на которой виден Фано-подобный резонанс (Рисунок 3а) и эффект электромагнитно-индуцированной прозрачности (Рисунок 3б):

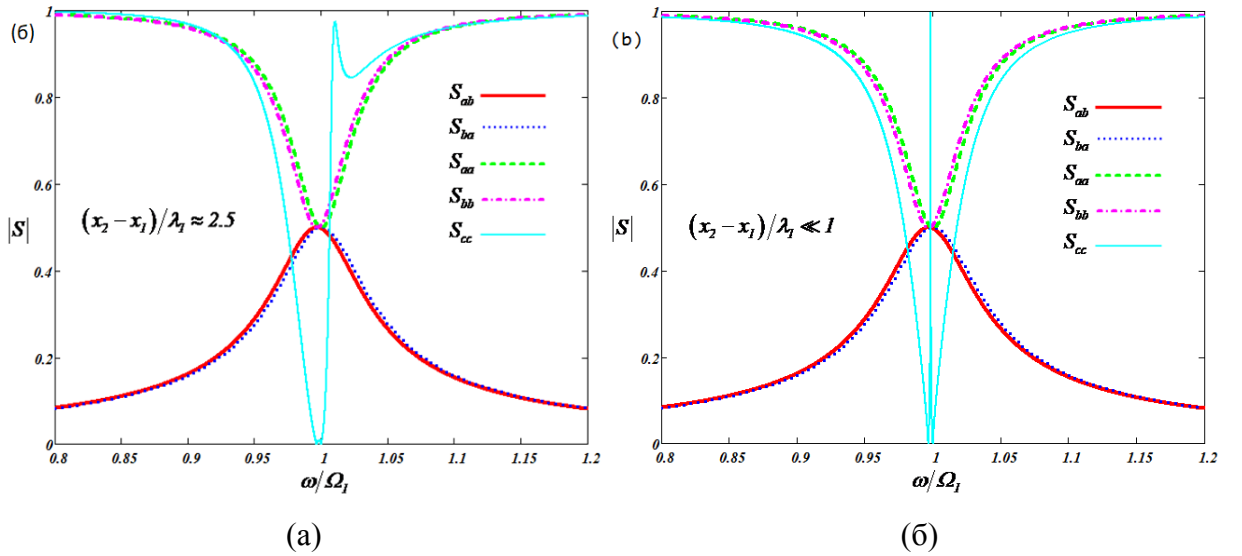


Рисунок 3 — Амплитуды прохождения фотона для различных исходов в зависимости от частоты в системе с различными кубитами ($\Omega_1 = 3 \text{ ГГц}$, $\Omega_2 = 2.99 \text{ ГГц}$)

и $\Gamma_1 = \Gamma_2 = 50 \text{ МГц}$), расстояние между которыми соизмеримо с характерной длиной волны. (а) проявление Фано-резонанса (б) эффект электромагнитно-индуцированной прозрачности

В данном разделе также представлены аналитические выражения, описывающие перенос возбужденного состояния между двумя кубитами. Выбранный базис состояний позволяет, к примеру, рассчитать вероятность перехода из одного белловского запутанного состояния в другое:

$$\begin{aligned} |\Psi_{bell}^+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|4\rangle + |3\rangle), \\ |\Psi_{bell}^-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|4\rangle - |3\rangle). \end{aligned} \quad (8)$$

На Рисунке 4 показано, что такой переход возможен только с учетом расстояния между кубитами, необходимого для изменения фазы (единственное различие между состояниями (8)).

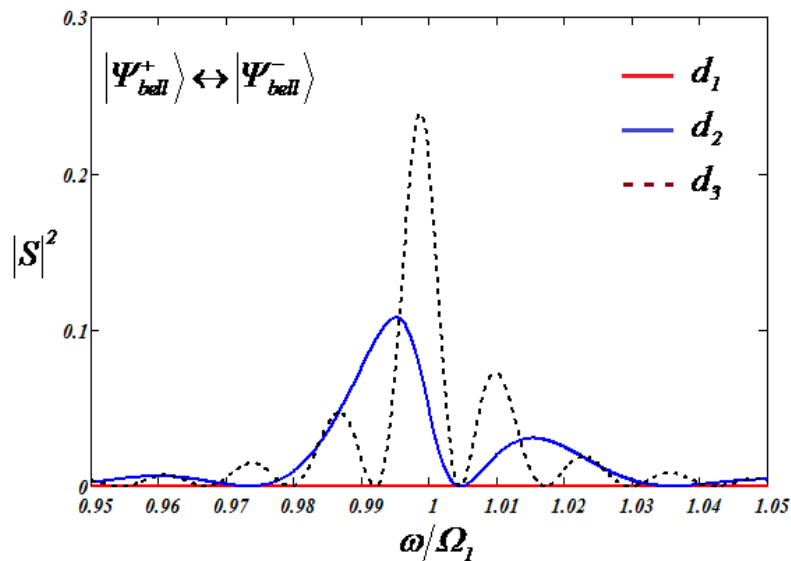


Рисунок 4 — Вероятности перехода между белловскими состояниями (8) при различных расстояниях между кубитами $d_3 > d_2 > d_1$

В разделах 3.2 и 3.3 показано, как в исследуемой системе могут быть учтены локальные и общий термостаты, соответственно. Если в случае локальных термостатов, результат получается стандартным (релаксация кубитов входит как мнимая добавка к их собственной частоте), то для общего термостата обнаружены существенные отличия от известных результатов для двухкубитной структуры [11]. Поскольку конкретный механизм релаксации в многокубитных структурах еще не до конца изучен, то полученные результаты могут быть использованы для проверки существования общего термостата. Также проведен анализ возможности объединения используемого метода

неэрмитового гамильтониана и формализма матрицы плотности для включения эффекта декогеренции.

Раздел 3.4 посвящен изучению системы, состоящей из двух резонаторов, в каждом из которых находится по одному кубиту.

Полный гамильтониан, описывающий данную систему, включает фотонные резонаторы с фундаментальными частотами ω_{c1} и ω_{c2} , расположенные на расстоянии d в волноводе, по которому могут распространяться фотоны с произвольной частотой ω_k , а также два кубита с собственными частотами Ω_1 и Ω_2 . Параметры взаимодействия резонаторов с волноводом обозначены как ζ_1 и ζ_2 , соответственно, и резонаторов с кубитом как λ_1 и λ_2 .

$$H = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} \hbar \Omega_i \sigma_{zi} + \sum_{i=1}^2 \hbar \omega_{ci} a_i^\dagger a_i + \sum_k \hbar \omega_k c_k^\dagger c_k + \sum_{i=1}^2 \sum_k \hbar \zeta_i (c_k^\dagger a_i e^{-jkx_i} + c_k a_i^\dagger e^{jkx_i}) + \sum_{i=1}^2 \hbar \lambda_i (a_i^\dagger + a_i) \sigma_{xi}, \quad (9)$$

где первые три члена описывают поведение всех вышеперечисленных элементов (кубиты, резонаторы, волновод), а последние два описывают взаимодействие между ними; здесь x_i – координата i -го резонатора в одномерном волноводе вдоль оси x , при этом $|x_1 - x_2| = d$. Задача была решена для однофотонного приближения, где мы ограничились только такими состояниями, где число возбуждений равно единице. В соответствие с этим мы можем выделить в гильбертовом пространстве набор состояний:

$$\begin{aligned} |K\rangle &= |k_w\rangle \otimes |g_1, g_2, 0_{c1}, 0_{c2}\rangle; \\ |1\rangle &= |0_w\rangle \otimes |g_1, g_2, 1_{c1}, 0_{c2}\rangle, \quad |2\rangle = |0_w\rangle \otimes |g_1, g_2, 0_{c1}, 1_{c2}\rangle, \\ |3\rangle &= |0_w\rangle \otimes |e_1, g_2, 0_{c1}, 0_{c2}\rangle, \quad |4\rangle = |0_w\rangle \otimes |g_1, e_2, 0_{c1}, 0_{c2}\rangle, \end{aligned} \quad (10)$$

где $k_w(0_w)$ импульс (отсутствие импульса) фотона в волноводе с произвольным волновым вектором k , последние два элемента означают наличие или отсутствие фотона в одном или другом резонаторах.

При этом наличие расстояния между резонаторами приводит к появлению интерференционных эффектов (Фано-резонанс и эффект электромагнитно-индуцированной прозрачности). Также в данном разделе показано, что ширины и положения резонансных уровней зависят от расстояния между резонаторами:

$$\omega_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\Omega + \omega_c - j\Gamma + j\Gamma e^{j\frac{\omega}{\omega_c} k_{c1}d} \right) \pm \frac{1}{2} \left[\left(\Omega - \omega_c + j\Gamma - j\Gamma e^{j\frac{\omega}{\omega_c} k_{c1}d} \right)^2 + 4\lambda^2 \right]^{1/2}, \quad (11)$$

$$\omega_{3,4} = \frac{1}{2} \left(\Omega + \omega_c - j\Gamma - j\Gamma e^{j\frac{\omega}{\omega_c} k_{c1}d} \right) \pm \frac{1}{2} \left[\left(\Omega - \omega_c + j\Gamma + j\Gamma e^{j\frac{\omega}{\omega_c} k_{c1}d} \right)^2 + 4\lambda^2 \right]^{1/2}. \quad (12)$$

На Рисунке 5 показано, что при определенных расстояниях могут наблюдаться эффекты сверхизлучения, когда ширина уровня удваивается по сравнению с шириной единичной системы кубит-резонатор, и эффекты субизлучения, когда данная ширина уменьшается.

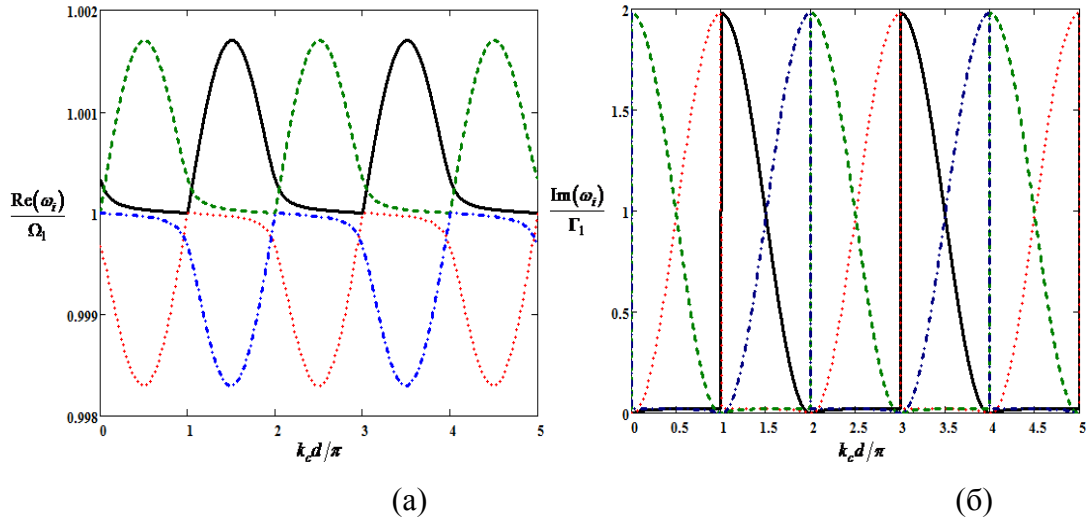


Рисунок 5 — Зависимость энергии резонанса (а) и его ширины (б) от расстояния между резонаторами с кубитами для случая $\Omega_1 = \omega_{c1}$ в слабом дисперсионном режиме ($\lambda \ll \Gamma$) при частоте налетающего фотона равной $\omega = \omega_{c1}$. Черная непрерывная линия — ω_1 , красная пунктирная — ω_2 , зеленая пунктирная — ω_3 , синяя штрихпунктирная — ω_4

Примечательно, что интерференционные эффекты, представленные в **Главе 3** проявляются при рассеянии единичного фотона. Основные выводы по результатам полученным в этой главе представлены в **разделе 3.5**.

Глава 4 посвящена разработке общих принципов расчета распространения микроволнового излучения через цепочки нелинейных элементов (включая контакты Джозефсона и сильно неупорядоченные сверхпроводники) в копланарном волноводе и методики проектирования дизайнов сверхпроводниковых параметрических усилителей. Расчет данных усилителей производился с помощью телеграфных уравнений, с включением нелинейных индуктивностей, реализуемых с помощью контактов Джозефсона или кинетической индуктивности тонкой пленки сверхпроводника.

В **разделе 4.1** приведены выражения, показывающие возможность усиления, разобраны приближения, в рамках которых они справедливы. В **параграфе 4.1.1**

обоснована необходимость фазовой подстройки для получения больших коэффициентов усиления при меньших размерах усилителя.

Дизайн параметрического усилителя на тонкой пленке NbN приведен в **разделе 4.2**. Здесь же представлены результаты численной симуляции и оценки коэффициента усиления и рабочей полосы. Фазовая подстройка усиливаемого сигнала достигается за счет использования копланарного волновода с периодически изменяющимся импедансом.

В **разделе 4.3** представлены дизайны параметрических усилителей на контактах Джозефсона с двумя различными вариантами фазовой подстройки. Приведены результаты численной симуляции такой структуры, и их использование в моделировании коэффициента усиления и рабочей полосы. В **разделах 4.5 и 4.6** представлены общеизвестная методика экспериментального исследования таких параметрических усилителей и выводы к **Главе 4**.

В Заключении обобщены основные результаты диссертационной работы:

Развит метод неэрмитового эффективного гамильтониана для задач рассеивания фотона в гибридных твердотельных наноструктурах с искусственными атомами. С использованием данного метода решен ряд задач, и установлены следующие особенности транспорта фотонов в гибридных твердотельных структурах:

- Показано, что при малом числе фотонов в резонаторе происходит расщепление центрального пика в триplete Моллоу. Этот чисто квантовый эффект, который связан с значимым различием величины расщепления уровней в системе кубит-резонатор в мультиплетах соответствующих разному числу фотонов в резонаторе. Выведены аналитические выражения, описывающие зависимость положения и ширины уровней системы от числа фотонов в резонаторе, а также вероятности прохождения и отражения единичного фотона через такую систему. Продемонстрировано, что полученные выражения могут быть использованы для описания таких известных эффектов как фотонная блокада, штарковский сдвиг и спектр Моллоу.

- Установлено, что стандартный подход к учету процессов диссипации в системе кубит - резонатор - волновод с помощью введения оператора Линдблада, справедлив только в пределе одного фотона в резонаторе. Для случая, когда число фотонов больше одного, получены аналитические решения, которые позволяют учесть влияние числа фотонов в резонаторе на транспортные характеристики системы при наличии релаксации кубита. Данные решения получены в квантовомеханическом описании системы, в которую феноменологически был введен локальный термостат, представляющий собой канал нерадикационного распада возбужденного состояния кубита.

- Показано, что получаемые методом эффективного неэрмитового гамильтониана волновые функции, описывающие состояния твердотельных квантовых структур могут быть использованы для описания различных результатов измерения, в том числе и с учетом интерференции волновых функций.

- Показано, что вероятность переноса состояния между двумя кубитами в открытом волноводе нелинейно зависит от расстояния между ними. Полученные выражения позволяют описывать как перенос незапутанного состояния, так и перенос Белловских состояний. Установлено, что данные вероятности зависят не только от частотной расстройки между налетающим фотоном, который фактически является переносчиком состояния, и кубитами, но и от расстояния между кубитами. Предложены аналитические выражения, описывающие влияние релаксации (локальный и общий термостаты) и декогеренции на транспорт фотона через такую структуру. Влияние декогеренции получено, вследствие объединения двух методов: неэрмитового эффективного гамильтониана и формализма матрицы плотности.

- Показано, что в структуре с двумя резонаторами и двумя кубитами возникает резонанс Фано и эффект электромагнитно-индуцированной прозрачности. Установлено, что ширина уровней или, иными словами, эффекты сверхизлучения и субизлучения, зависят от расстояния между резонаторами. Также показано, что положение резонансных уровней зависит от частоты налетающего фотона.

- Предложен и описан метод экстракции основных параметров системы кубит - резонатор - волновод из результатов экспериментального одночастотного исследования транспортных характеристик.

- Подробно описана методика расчета и разработки дизайнов трех типов параметрических усилителей с квантовым уровнем шумов на базе сильно неупорядоченных сверхпроводниковых пленок, и контактов Джозефсона. Результаты численного моделирования разработанных усилителей показывают, что они обеспечивают усиление более 15 дБ в полосе порядка 3 ГГц.

Разработанные в данной диссертационной работе подходы к решению задач транспорта микроволновых фотонов через одно- и двухкубитные цепи естественным образом обобщаются на случай большего числа кубитов.

Список публикаций автора по теме диссертации

Публикации в реферируемых журналах:

A1. Перенос возбужденного состояния между двумя кубитами через открытый волновод / А. Н. Султанов, Я. С. Гринберг // Физика низких температур. – **2018**. – Т. 44, № 3. – С. 1–8.

A2. Mollow triplet through pump-probe single-photon spectroscopy of artificial atoms / Y. S. Greenberg, A. N. Sultanov // Physical Review. A: Atomic, Molecular, and Optical Physics. - **2017**. - Vol. 95, iss. 5. - Art. 053840 (16 p.).

A3. Effect of the qubit relaxation on transport properties of microwave photons / A.N. Sultanov, Ya.S. Greenberg // Physics of the Solid State -**2017**- V.59 № 11- pp.2103-2109

A4. Рассеяние одиночного фотона на двухкубитной структуре с резонаторами = Scattering of a single photon on a two-qubit structure with resonators / А. Н. Султанов, Д. С. Карпов, Я. С. Гринберг, С. Н. Шевченко, А. А. Штыгашев // Физика низких температур. - **2017**. – Т. 43, № 7. – С. 1003–1010.

A5. Влияние нерадиационного затухания кубитов в общий канал на транспорт микроволновых фотонов / Я. С. Гринберг, А. Н. Султанов // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. - **2017**. - Т. 106, вып. 6. - С. 381-386. - DOI: 10.7868/S0370274X17180114.

A6. Спектроскопия сверхпроводникового потокового кубита в квазидисперсионном режиме / Б. И. Иванов, И. Л. Новиков, А. Н. Султанов, Я. С. Гринберг, А. В. Кривецкий, А. Г. Вострецов, Е. В. Ильичев // Письма в "Журнал экспериментальной и теоретической физики". - **2016**. - Т. 103, вып. 6. - С. 475 – 480

A7. Измерение параметров сверхпроводникового потокового кубита в квазидисперсионном режиме / И. Л. Новиков, Б. И. Иванов, А. Н. Султанов, Я. С. Гринберг, Е. В. Ильичев // Физика твердого тела. - **2016**. - Т. 58, вып. 11. - С. 2085-2089.

A8. Микроволновая наноэлектромеханическая система: усиление слабых сигналов / Я. С. Гринберг, А. А. Штыгашев, Ю. Г. Пейсахович, А. Н. Султанов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. - **2013**. – № 4. – С. 41–49.

В сборниках трудов конференций:

A9. Influence of qubit relaxation on the transport properties of microwave photons / Y. S. Greenberg, A. N. Sultanov // IV международная конференция "Мезоскопические структуры в фундаментальных и прикладных исследованиях": сб. докл., Отель " Байкал", пос. Листвянка, 5-9 июля 2017 г.-Новосибирск, изд-во НГТУ, **2017**, с. 49. - 50 сору - ISBN 978-5-7782-3273-0.

A10. Влияние релаксации кубита на транспортные свойства микроволновых фотонов / Я. С. Гринберг, А. Н. Султанов // Нанопизика и Наноэлектроника : тр. 21 междунар. симп., Нижний Новгород, 13–16 марта **2017** г. : в 2-х т. – Нижний Новгород :

Изд-во Нижегородского государственного университета, 2017. – Т. 1. – С. 57-58. - ISBN 978-5-91326-371-1.

A11. Mollow triplet: pump probe single photon spectroscopy of artificial atoms / A. N. Sultanov, Y. S. Greenberg // International conference on quantum coherent phenomena at nanoscale : [prog. and] abstr., Montenegro, Petrovac, 4–9 Sept. **2016**. – Petrovac, 2016. – P. 13.

A12. Исследование микроволнового транспорта в твердотельной гибридной структуре кубит-резонатор / А. Н. Султанов, Д. С. Карпов, Я. С. Гринберг, С. Н. Шевченко // Нанопизика и наноэлектроника : материалы 20 междунар. симп., Нижний Новгород, 14–18 марта **2016** г. В 2 т. – Нижний Новгород : Изд-во Нижегородского государственного университета, 2016. – Том 1. – С. 128–129. - 250 экз. - ISBN 978-5-91326-378-0.

A13. Двухчастотная спектроскопия сверхпроводникового потокового кубита в квазидисперсионном режиме / Б. И. Иванов, И. Л. Новиков, А. Н. Султанов, Я. С. Гринберг, А. В. Кривецкий, А. Г. Вострецов, Е. В. Ильичев // Нанопизика и наноэлектроника : материалы 20 междунар. симп., Нижний Новгород, 14–18 марта **2016** г. В 2 т. – Нижний Новгород : Изд-во Нижегородского государственного университета, 2016. – Том 1. – С. 48–49. - 250 экз. - ISBN 978-5-91326-378-0

A14. Transport properties of a microwave photon in a system with two artificial atoms / A. N. Sultanov, Y. S. Greenberg, D. S. Karpov, B. I. Ivanov, S. N. Shevchenko // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016) = Actual problems of electronic instrument engineering (АРЕИЕ–2016) : тр. 13 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 3–6 окт. **2016** г. : в 12 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 2. - С. 38-41. - ISBN 978-5-7782-2991-4.

A15. Гринберг Я. С. Применение метода неэрмитового Гамильтониана для описания взаимодействия наномеханического осциллятора с микроволновым полем / Я. С. Гринберг, А. Н. Султанов // Мезоскопические структуры в фундаментальных и прикладных исследованиях = Mesoscopic structures : fundamentals and applications : 3 междунар. конф. : сб. докл. [и тез.], г. Бердск, 22–26 июня 2015 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, **2015**. – С. 72-75. - 50 экз. - ISBN 978-5-7782-2679-1.

A16. Исследование микроволнового транспорта в твердотельной гибридной структуре кубит- резонатор / Я. С. Гринберг, А. Н. Султанов, Д. С. Карпов // 16 Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС–16) : тез. докл., Екатеринбург, 12–19 нояб. **2015** г. – Екатеринбург : ИФМ УрО РАН, 2015. – С. 217. - ISBN 2306-5494.

A17. Микроволновая диагностика наномеханического резонатора / Я. С. Гринберг, А. Н. Султанов, Е. В. Ильичев // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2014) = Actual problems of electronic instrument engineering (АРЕИЕ–2014) : тр. 12 междунар. конф., Новосибирск, 2–4 окт. 2014 г. : в 7 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, **2014**. – Т. 2. – С. 64-68. – 100 экз. – ISBN 978-1-4799-6019-4, ISBN 978-5-7782-2507-7.

A18. Микроволновая диагностика наномеханических резонаторов / Я. С. Гринберг, Е. В. Ильичев, А. А. Штыгашев, А. Н. Султанов // Мезоскопические структуры в фундаментальных и прикладных исследованиях = Mesoscopic structures: fundamentals and applications : сб. докл. 2 междунар. конф., Бердск, 23–29 июня 2013 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 46.

A19. Исследование параметрического взаимодействия микроволнового СВЧ резонатора с наномеханическим резонатором. / Я. С. Гринберг, А. А. Штыгашев, Ю. Г. Пейсахович, Султанов А. Н. // Материалы XI-й международной конференции \"Актуальные проблемы электронного приборостроения\" (АПЭП-2012), т. 2, стр. 117-123, Новосибирск, 2-4 октября 2012 г.

Цитированная литература

- [1] **Zheng H.** Persistent quantum beats and long-distance entanglement from waveguide-mediated interactions/ Zheng H., Baranger H. U. // Phys. Rev. Lett. – 2013 – V. 110 – Art. 113601.
- [2] **Shen J. T.** Coherent single photon transport in a one-dimensional waveguide coupled with superconducting quantum bits/ Shen J. T., Fan S. // Phys. Rev. Lett. – 2005 – V.95 – Art. 213001.
- [3] **Shen J. T.** Coherent photon transport from spontaneous emission in one-dimensional waveguides/ Shen J. T., Fan S. // Opt. Lett. – 2005 – V.30 – iss. 15 – pp. 2001-2003.
- [4] **Fang Y.-L. L.** One-dimensional waveguide coupled to multiple qubits: photon-photon correlations/ Fang Y.-L. L., Zheng H., Baranger H. U. // EPJ Quantum Technology – 2014 – V. 1 –iss. 3.
- [5] **Shen J. T.** Theory of single-photon transport in a single-mode waveguide. I. Coupling to a cavity containing a two-level atom/ Shen J. T., Fan S. // Phys. Rev. A– 2009 – V. 79 – Art. 023837.
- [6] **Lalumiere K.** Input-output theory for waveguide QED with an ensemble of inhomogeneous atoms/ Lalumiere K., Sanders B. C., van Loo A. F., Fedorov A., Wallraff A., Blais A. // Phys. Rev. A– 2013 – V. 88 – Art. 043806.
- [7] **Fan S.** Input-output formalism for few-photon transport in one-dimensional nanophotonic waveguides coupled to a qubit/ Fan S., Kocabas S. E., Shen J.T. // Phys. Rev. A– 2010 V. 82 – Art. 063821.
- [8] **Zheng H.** Waveguide QED: many-body bound-state effects in coherent and Fock-state scattering from a two-level system/ Zheng H., Gauthier D. J., Baranger H. U. // Phys. Rev. A – 2010 – V. 82 – Art. 063816.
- [9] **Peropadre B.** Scattering of coherent states on a single artificial atom/ Peropadre B., Lindkvist J., Hoi I. - C., Wilson C. M., Garcia-Ripoll J. J., Delsing P., Johansson G. // New Journal of Physics – 2013 – V. 15 – Art. 035009 – 17 pp.
- [10] **Xu S.** Input-output formalism for few-photon transport: A systematic treatment beyond two photons/ Xu S., Fan S. // Phys. Rev. A– 2015 – V. 91 – Art. 043846.

- [11] **Motzoi F.** Backaction-driven, robust, steady-state long-distance qubit entanglement over lossy channels/ Motzoi F., Halperin E., Wang X., Whaley K. B., Schirmer S.// Phys. Rev. A – 2016 – V. 94 – Art. 032313.
- [12] **Biancetti R.** Dynamics of dispersive single qubit readout in circuit quantum electrodynamics / Biancetti R., Filipp S., Baur M., Fink J. M., Goppl M., Leek P. J., Steffen L., Blais A., Wallraff A.// Phys. Rev. A – 2009 – V. 80 – Art. 043840.
- [13] **Fink J. M.** Climbing the Jaynes-Cummings ladder and observing its nonlinearity in a cavity QED system/ Fink J. M., Goppl M., Baur M., Biancetti R., Leek P. J., Blais A., Wallraff A.// Nature– 2008 – V. 454 – pp. 315 - 318.