На правах рукописи

КЛЮЕВ Алексей Викторович

ФЛУКТУАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ С ПОТЕНЦИАЛЬНЫМИ БАРЬЕРАМИ И ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ПРАВИЛАМИ ЛЬДА

01.04.03 – Радиофизика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Нижний Новгород – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор Якимов Аркадий Викторович.

Официальные оппоненты: **Бахтизин Рауф Загидович,** Доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Физическая электроника и нанофизика» физико-технического института ФГБОУ ВО «БашГУ», г. Уфа

Литвинов Владимир Георгиевич, Доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Микро- и наноэлектроника» ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», г. Рязань

Постников Евгений Борисович, Доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Кафедра физики и технологий», заведующий отделом теоретической физики НИЦ физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Курский государственный университет», г. Курск

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Защита состоится « 27 » октября 2021 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.340.03 (Д 212.166.07) при Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского по адресу https://diss.unn.ru/1127

Автореферат разослан «_____» _____ 20__ г.

И.о. учёного секретаря диссертационного совета, д.ф.-м.н., профессор Канаков Олег Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы и степень её разработанности

Исследование электрических шумов и флуктуаций параметров, существующих в твердотельных электронных приборах, является фундаментальной задачей современной радиофизики. Шумы и флуктуации, с одной стороны, ограничивают чувствительность радиоустройств, как в отношении точности измерений, так и величины сигналов, которые могут быть приняты и обработаны существующими методами. С другой стороны, анализ статистических характеристик этих шумов и флуктуаций позволяет осуществлять неразрушающую диагностику исследуемых приборов, дающую информацию о физических процессах, происходящих на атомарном уровне. Актуальность подобного исследования обусловлена постоянным развитием элементной базы, используемой в устройствах для приёма, обработки и хранения информационных сигналов.

К наиболее часто встречающимся шумам относятся: тепловой; дробовой; генерационно-рекомбинационный; а также фликкерный. Природа первых трёх типов шума считается изученной достаточно хорошо. Сложнее обстоит дело с фликкерным шумом (называемым также 1/f шумом), природа которого до конца не выявлена. Этот шум обусловлен флуктуациями параметров радиоэлементов (эквивалентных сопротивлений, емкостей и др.). Он хотя и является низкочастотным, имеет модуляционный характер, то есть приводит к возмущению информационных параметров исследуемых сигналов.

На данный момент имеется значительный теоретический и экспериментальный материал по физическим и статистическим свойствам фликкерного шума различных объектов, полученный рядом исследователей: Ван дер Зил (A. Van der Ziel), Дю Пре (F.K. Du Pre), А.Н. Малахов, Хоухе (F.N. Hooge), Клайнпеннин (T.G.M. Kleinpenning) и Фандамме (L.K.J. Vandamme), Ш.М. Коган, Датта (P. Dutta) и Хорн (P.M. Horn), Кларк (J. Clarke) и Восс (R.F.Voss), Вейсман (M.B. Weissman), Г.Н. Бочков и Ю.Е. Кузовлев, В.П. Паленскис, Н.Б. Лукьянчикова, Р.З. Бахтизин и С.С. Гоц, А.К. Нарышкин и А.С. Врачев, Г.П. Жигальский, В.В. Потемкин, С.А. Корнилов, В.Н. Кулешов, М.Е Левинштейн и С.Л. Румянцев, С.Ф. Тимашев, Г.А. Леонтьев, Муша (T. Musha) и Ямомото (M. Yamamoto), В.П. Коверда и В.Н. Скоков, Хандель (P.H. Handel), К.А. Казаков, Бернардо Спаньоло (B. Spagnolo) и др.

В подавляющем большинстве исследований фликкерный шум анализируется либо с чисто математической, либо с чисто технической точек зрения. В первом случае исследуются уравнения динамики линейных и нелинейных электрических схем под воздействием шума с известными статистическими свойствами. Во втором случае анализируется шум в конкретных типах электронных приборов.

Предлагаемая диссертация посвящена развитию радиофизических методов экспериментального и теоретического исследования природы источников шумов и флуктуаций параметров в различных диодных структурах (с переходами типа *p-n* и Шоттки, с квантовыми ямами и квантовыми точками), в спиновом льду, а также устройств на их основе.

В диссертации развит подход, который позволяет объяснить и предсказать ряд флуктуационных эффектов. Подход заключается в создании адекватной физической модели источников шумов и флуктуаций, её экспериментальной проверке, с последующей верификацией и оценкой статистических характеристик источников по результатам измерений.

Настоящая работа представляет собой развитие цикла исследований, выполняемых под научным руководством профессора А.В. Якимова в Национальном исследовательском Нижегородском госуниверситете им. Н.И. Лобачевского. Основные результаты, полученные ранее, обобщены в кандидатских диссертациях С.В. Макарова, М.Ю. Перова, А.В. Белякова, А.В. Моряшина, Е.И. Шмелёва и А.В. Клюева.

Основная цель и задачи диссертации

Целью диссертации является развитие единого подхода к анализу флуктуаций и флуктуационных эффектов в электронных твердотельных системах.

Целью обусловлены следующие задачи, решаемые в диссертационной работе:

- экспериментальные исследования и построение физических моделей фликкерных и естественных шумов в наноразмерных полупроводниковых светоизлучающих гетероструктурах на основе GaAs и его твёрдых растворов, полупроводниковых низкобарьерных диодах на основе селективно легированных микроструктур и диодах с контактом металл–полупроводник;
- анализ преобразования случайных процессов детекторами на базе низкобарьерных диодов, изготовленных на основе селективно легированных микроструктур металл–полупроводник;
- анализ влияния флуктуаций электрофизических параметров диодов Шоттки на выходную форму спектра в смесителях на таких диодах;
- создание теории флуктуаций концентрации магнитных монополей в спиновом льду, то есть процессов генерации и рекомбинации пар магнитных монополей; исследование спектра шума генерации–рекомбинации магнитных монополей; разработка нового метода обнаружения магнитных монополей в спиновом льду на основании измерения шума магнитных монополей.

Научная новизна

1. Впервые доказано, что в лазерах и светодиодах с квантовыми ямами и квантовыми точками причиной возникновения фликкерного шума напряжения и фликкерных флуктуаций интенсивности излучения (для лазеров) является неоднородность протекания тока, обусловленная формированием

квазиомических шунтов и возникновением областей с пониженной высотой барьера.

2. Впервые показано, что фликкерные шумы напряжения, наблюдающиеся в диодах Шоттки, обусловлены флуктуациями тока термополевой эмиссии и флуктуациями тока утечки.

3. Впервые показано, что селективное δ–легирование низкобарьерных диодов Шоттки приводит к возникновению эффекта “насыщения” интенсивности фликкерных шумов напряжения, тогда как в диодах Шоттки без δ–легирования имеет место эффект “максимизации” шумов. Определено и экспериментально подтверждено влияние величины коэффициента неидеальности вольтамперной характеристики на спектральную плотность мощности дробового шума в диодах Шоттки и в диодах с *p-n* переходом.

4. Впервые аналитически решена задача преобразования случайных процессов детекторами на базе низкобарьерных диодов, выполненных на основе селективно легированных микроструктур металл–полупроводник. Полученные результаты позволяют определить особенности поведения спектра на выходе детектирующей системы в безынерционном и инерционном режимах, что актуально для задач приёма излучения.

5. Впервые получено аналитическое решение задачи о влиянии флуктуаций электрофизических параметров диодов с контактами металл–полупроводник на форму спектра выходного сигнала в смесителях на таких диодах. Эта информация позволяет оценивать спектр этого сигнала, зная шумовые характеристики диода.

6. Впервые создана теория флуктуаций числа пар магнитных монополей в спиновом льду, то есть процессов генерации и рекомбинации пар магнитных монополей. Показано, что эти флуктуации можно описывать с помощью уравнения типа Ланжевена. Определён спектр шума генерации–рекомбинации магнитных монополей. Предложен новый метод экспериментального обнаружения магнитных монополей в спиновом льду. На сегодняшний день это самый прямой из существующих методов обнаружения новых квазичастиц – магнитных монополей. Показано, что флуктуации концентрации монополей проявляются во флуктуациях плотности магнитного момента, что подтверждено в эксперименте других авторов. Разработана обобщённая модель генерационно-рекомбинационного шума магнитных монополей, учитывающая наличие распределения времён релаксации. В этом случае результирующий спектр формируется суперпозицией множества спектров генерационно-рекомбинационных процессов.

Теоретическая и практическая значимость работы

Данная работа посвящена изучению низкочастотных шумов и флуктуаций параметров в твердотельных системах. Исследованы шумы в наноразмерных полупроводниковых структурах (светодиодах, лазерных диодах, диодах с барьером Шоттки). Изучено преобразование шумовых сигналов в системах на их основе. Проанализированы флуктуации в физических системах, подчиняющихся правилам льда. Исследованы частотные и токовые зависимости спектров, а также другие статистические характеристики: взаимная корреляция флуктуаций напряжения и флуктуаций интенсивности оптического излучения в лазерных диодах; влияние различных токовых компонент в ВАХ на токовые зависимости спектров; спектр естественных шумов диодов; особенности преобразования шумов детекторами на основе селективно легированных микроструктур; влияние флуктуаций электрофизических параметров диодов с контактами металл–полупроводник на спектр выходного сигнала в смесителях; флуктуации концентрации магнитных монополей и их связь с флуктуациями магнитного момента в спиновом льду. Полученные результаты имеют как теоретическую, так и практическую значимость.

1. Показана перспективность применения низкочастотной шумовой спектроскопии для диагностики свойств наноструктурных светодиодов и лазеров. Показано, что низкочастотный (фликкерный) шум напряжения и фликкерные флуктуации интенсивности излучения (для лазеров) несут информацию о неоднородности протекания тока в таких светодиодах и лазерах и, как следствие, позволяет выявлять дефекты их структуры.

2. Информация о том, что селективное δ–легирование низкобарьерных диодов Шоттки приводит к возникновению эффекта “насыщения” интенсивности фликкерных шумов напряжения, тогда как в диодах Шоттки без δ–легирования имеет место эффект “максимизации” шумов, может быть использована для диагностики структуры и выявления возможных источников фликкерных шумов низкобарьерных диодов. Установленная связь коэффициента неидеальности вольтамперной характеристики со спектральной плотностью мощности дробового шума позволяет правильно вычислять спектральную плотность мощности дробового шума в диодах Шоттки и в диодах с *p*-*n* переходом с неидеальной вольтамперной характеристикой.

3. Анализ преобразования случайных процессов детекторами на основе селективно легированных микроструктур, базирующийся на методах кумулянтного анализа, позволил предсказать и объяснить особенности поведения спектра процесса на выходе детектирующей системы в безынерционном и инерционном режимах. Информация о выходном спектре детектирующей системы актуальна для задач приёма излучения.

4. Результаты, касающиеся механизмов протекания тока в диодах с контактом металл–полупроводник, дают представление о причинах возникновения фликкерного шума в таких диодах.

5. Аналитически решена задача о влиянии флуктуаций электрофизических параметров диодов с контактами металл–полупроводник на спектр выходного сигнала в смесителях на таких диодах. Это позволяет, зная шумовые характеристики диода, делать оценки выходной формы спектра смесителя, что крайне важно в инженерных приложениях.

6. Созданная теория генерационно-рекомбинационного шума магнитных монополей в спиновом льду имеет фундаментальное значение. Предложен новый метод обнаружения магнитных монополей в спиновом льду. Этот метод использован коллективом зарубежных авторов (со ссылками на работу соискателя), экспериментально подтвердивших предсказанный спектр генерационно-рекомбинационного шума магнитных монополей.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач в работе были использованы методы статистической радиофизики, методы математического анализа, методы физики полупроводников и физики твёрдого тела, методы радиофизических измерений и методы компьютерного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Развит и апробирован подход, позволивший исследовать флуктуационные эффекты в области низких модуляционных частот в лазерах и светодиодах с квантовыми ямами и квантовыми точками, в диодах Шоттки, в низкобарьерных диодах Шоттки с δ–легированием.

2. С использованием развитого подхода теоретически и экспериментально показано, что селективное δ–легирование низкобарьерных диодов Шоттки приводит к возникновению эффекта “насыщения” интенсивности фликкерных шумов напряжения, тогда как в диодах Шоттки без δ–легирования имеет место эффект “максимизации” шумов. Установлена обратно пропорциональная зависимость уровня спектральной плотности мощности дробового шума в диодах Шоттки и в диодах с *p*-*n* переходом от коэффициента неидеальности вольтамперной характеристики.

3. Впервые проведён теоретический анализ преобразования случайного процесса детектором на базе низкобарьерного диода, изготовленного на основе селективно легированной микроструктуры металл–полупроводник. Объяснена зависимость спектральных характеристик процесса на выходе детектора от режима его работы. Теоретически обнаружен эффект перехода в режим безынерционного детектирования при росте мощности входного шума.

4. Показано, что ток термополевой эмиссии, обусловленный наличием областей с локально избыточной концентрацией донорных примесей в диодах с контактом металл–полупроводник (*n*-типа), наряду с током утечки, является причиной возникновения фликкерного шума.

5. Выявлено и количественно оценено влияние флуктуаций электрофизических параметров диода с контактом металл–полупроводник смесителя на выходную форму спектра сигнала, что важно для практических приложений.

6. Впервые предложены теория генерационно-рекомбинационного шума магнитных монополей в спиновом льду и метод обнаружения монополей. Определена спектральная плотность мощности шума генерации–рекомбинации магнитных монополей. Показано, что флуктуации концентрации монополей проявляются во флуктуациях плотности магнитного момента. Теория, разработанная соискателем, подтверждена экспериментально другими авторами.

Достоверность обеспечивается для экспериментальных результатов их повторяемостью, для теоретических выводов и обобщений – подтверждается результатами экспериментов. Кроме того, полученные результаты подтверждают и развивают результаты, полученные другими исследователями. Основная часть теоретических выводов подтверждена экспериментально.

Апробация результатов и публикации

Результаты диссертационной работы отражены в 132 научных публикациях, в том числе в двух монографиях [M1], [M2] и в 43 статьях в рецензируемых изданиях, включенных в список ведущих научных журналов и изданий, утвержденный ВАК РФ. Список основных публикаций приведён в конце автореферата [1]-[30]. Результаты работы представлены на ряде научных конференций и совещаний:

- международные конференции по шумам и флуктуациям (International Conference on Noise and Fluctuations) ICNF–2007 (Япония), 2009 (Италия), 2011 (Канада), 2013 (Франция), 2015 (Китай), 2019 (Швейцария);
- международные конференции по разработке электрических, компьютерных, электронных и коммуникационных приложений ICECECE (International Conference on Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering) 2012 (Австралия), 2013 (ЮАР), 2014 (Австралия), 2015 (Австралия);
- международная конференция по нерешённым проблемам шума UPoN 2012 (Индия);
- международная конференция по статистической механике в Ситджесе 2012 (Испания);
- международные конференции по статистической физике в Эриче 2018, 2019 (Италия);
- международные научно-технические конференции INTERMATIC – 2006 - 2018 “Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения” (Москва, МИРЭА);
- ежегодные международные научно-методические семинары “Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах” (2005–2011 г., МНТОРЭС им. А.С. Попова, Москва);

– международная научная конференция “Тонкие пленки и наноструктуры” 22–26 ноября 2005 г. (Москва, МИРЭА);
– XII Международный Симпозиум “Нанофизика и наноэлектроника” 10–14 марта 2008 г., Н.Новгород;
– ежегодная “Научная конференция по радиофизике” (2004–2020 г., ННГУ, Н.Новгород);
– ежегодная “Нижегородская сессия молодых ученых” (Н.Новгород, 2004–2012 г.).
– Результаты работы регулярно докладывались на семинарах научно-исследовательской лаборатории стохастических мультистабильных систем Научно-образовательного центра “Физика твердотельных наноструктур” отдела фундаментальных и прикладных исследований, а также кафедры статистической радиофизики и мобильных систем связи (до 2019 года – кафедра бионики и статистической радиофизики) Национального исследовательского Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского.

Личный вклад

17 работ (в том числе 9 статей) из 132 выполнены без соавторов. В остальных работах диссертант принимал непосредственное участие как в постановке задач, так и в расчётах, построении аналитических моделей, экспериментальных работах, обсуждении и физической интерпретации результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, трёх приложений и списка цитируемой литературы из 390 источников. Общий объём работы – 280 страниц, включая 107 рисунков и 9 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обоснована актуальность рассматриваемой темы исследования, изложено современное состояние подобных исследований в мире, проведен обзор литературы по теме диссертации, приведены результаты, выносимые на защиту.

В **Первой главе** диссертации представлены модифицированные модели, учитывающие особенности рассматриваемых приборов, обусловленные спецификой механизмов токопереноса, определяющих ВАХ диода. В качестве источников фликкерного шума рассматриваются бистабильные точечные дефекты, приводящие к флуктуациям электрофизических параметров полупроводникового материала.

Бистабильные дефекты, находящиеся в различных технологических областях диода (база, область пространственного заряда – ОПЗ, и т.д.), приводят к появлению фликкерных флуктуаций той или иной компоненты тока

диода. В зависимости от того, какая компонента подвержена наиболее сильным флуктуациям, и от того, какая компонента наиболее сильно проявляется в ВАХ диода, возникают различные эффекты в токовой зависимости спектра фликкерного (1/f) шумового напряжения, выделяющегося на диоде.

В Разделе 1.1 рассмотрены основные физические модели фликкерного шума: модель Дю Пре – Ван дер Зила, модель двухуровневых систем.

В Разделе 1.2 рассмотрены механизмы токопереноса, определяющие различные составляющие ВАХ полупроводникового диода, такие как диффузионный ток, рекомбинационный ток и ток утечки. Приведена эквивалентная схема полупроводникового диода с соответствующими дифференциальными сопротивлениями. При большом прямом токе необходимо учитывать (последовательное) сопротивление базы и контактов, которое может иметь нелинейный характер.

В Разделе 1.3 описываются простейшие точечные дефекты и образованные ими комплексы в кристаллической решетке. Рассматривается свойство мультистабильности дефектов [11]. Предполагается, что фликкерный шум обусловлен присутствием подвижных точечных дефектов в материале. Используется модель двухуровневых систем (ДУС), согласно которой дефект может находиться в одном из двух метастабильных состояний. Каждая ДУС описывает поведение отдельного дефекта. Переход из одного состояния в другое происходит достаточно быстро, по сравнению со временем пребывания в одном из состояний. Следовательно, изменение электрофизических параметров образца (например, подвижности, концентрации носителей тока) при перемещении дефекта из одного состояния в другое и обратно может быть представлено случайным телеграфным процессом (СТП). В полупроводнике имеется определенное количество таких дефектов, и фликкерный шум образуется суперпозицией (ансамблем) СТП.

При исследовании диодных структур за основу взята теория диода с *p-n* переходом. Представлены модифицированные модели, учитывающие специфику рассматриваемых приборов [М1], [М2]. Рассмотрены физические механизмы возникновения флуктуаций различных компонент тока диода. Показано, что эти механизмы могут быть учтены путём введения флуктуаций сопротивлений [2], [17], [29], входящих в эквивалентную схему диода. Таким образом, проведено физическое обоснование адекватности используемого подхода на основе эквивалентной схемы диода.

Бистабильные дефекты, находящиеся в различных технологических областях диода (базы, ОПЗ, и т.д.), приводят к появлению фликкерных флуктуаций той или иной компоненты тока. В зависимости от того, какая компонента подвержена наиболее сильным флуктуациям, и от того, какая компонента наиболее сильно проявляется в ВАХ диода, возникают различные эффекты в токовой зависимости спектра шумового напряжения, выделяющегося на диоде.

“Эффект насыщения” заключается в том, что при относительно малых токах величина спектра S_V фликкерного шума (в напряжении) на фиксированной частоте возрастает пропорционально квадрату тока I через диод (как в

линейных резисторах). При дальнейшем увеличении I токовая зависимость “насыщается”, переходя в плато, $S_V \sim I^0$.

Впервые такая зависимость обнаружена в германиевых диодах. Её объяснение было предложено А.Н. Малаховым. Поэтому здесь эффект насыщения будет называться “эффектом Малахова”. Считалось, что эффект возникает в том случае, когда в диоде присутствует только диффузионная компонента тока, подверженная фликкерным флуктуациям.

В настоящей работе показано, что, при определенных условиях, к эффекту насыщения могут привести и флуктуации рекомбинационной компоненты тока. Кроме того, наличие сопротивления нагрузки, шунтирующего диод по малому сигналу, приводит к тому, что насыщение наступает при большем значении тока через диод.

В светодиодах и лазерах с квантовыми точками (КТ) и квантовыми ямами (КЯ) эффект насыщения наблюдается в случае преобладания рекомбинационной компоненты тока, подверженной фликкерным флуктуациям.

Другой эффект состоит в том, что величина спектра напряжения фликкерного шума диода, выделяющегося на диоде, обратно пропорциональна току через диод, $S_V \sim 1/I$. Такая зависимость часто наблюдается в кремниевых диодах.

Впервые объяснение этого эффекта было дано А.К. Нарышкиным, исследовавшим шумы германиевых диодов с большой шириной ОПЗ. Данный эффект будет называться здесь “эффектом Нарышкина”. Предполагалось, что токовая зависимость вида $S_V \sim 1/I$ обусловлена совместным действием двух механизмов. В диоде присутствует достаточно большая диффузионная компонента тока, не подверженная флуктуациям. Кроме того, присутствует и рекомбинационная компонента, практически не проявляющаяся в ВАХ диода, но являющаяся основным источником фликкерного шума.

Клайнпеннином предложена альтернативная модель для описания подобной токовой зависимости. Она основана на использовании эмпирической формулы Хоухе – Клайнпеннина – Фандамме, не имеющей физического обоснования.

В настоящей диссертации осуществлена модификация эффекта Нарышкина. Показано, что при учете “не шумящей” диффузионной компоненты и флуктуирующей рекомбинационной компоненты тока через диод в области малых токов имеет место рост спектра пропорционально квадрату тока, а в области больших токов спектр обратно пропорционален току в первой степени. Таким образом, “эффект Нарышкина” модифицируется в эффект “максимизации” шума.

В зависимости от соотношения между током рекомбинации и диффузионным током возможны три случая.

– Ток рекомбинации на несколько порядков меньше диффузионного тока. При этом наблюдается зависимость, аналогичная вышерассмотренному случаю. Однако имеется количественное различие, заключающееся в том, что, в отличие от предыдущей ситуации, эффект максимизации шума наблюдается при токе, равном обратному току насыщения диода $I = I_s$.

– Существует область малых токов, в которой явно выражена рекомбинационная компонента. В этом случае в токовой зависимости спектра образуется плато.

– Ток рекомбинации на несколько порядков больше диффузионного тока. В этом случае в токовой зависимости спектра имеет место эффект насыщения.

В исследованных светоизлучающих диодах и лазерах на КТ и КЯ диффузионную компоненту тока выявить не удалось. Поэтому, если ток рекомбинации (в ОПЗ, КТ, КЯ) подвержен фликкерным флуктуациям, то должен наблюдаться эффект насыщения шума.

Третий эффект, наблюдаемый в токовой зависимости спектра S_V фликкерных шумов напряжения, – эффект максимизации. При увеличении тока I через диод сначала наблюдается зависимость вида $S_V \sim I^2$, типичная для линейных резисторов. Затем, при достижении определенного тока I^*, спектр достигает максимального значения. Дальнейшее увеличение тока приводит к ярко выраженному уменьшению шума. Этот эффект обусловлен проявлением флуктуаций тока утечки.

В настоящей диссертации выполнен детальный анализ эффекта максимизации шума в светоизлучающих структурах. На основе анализа ВАХ и токовых спектральных зависимостей шумов напряжения в наноразмерных лазерах и светодиодах подтверждено, что фликкерные шумы в исследуемых образцах обусловлены шумами тока утечки [1], [2]. Ток утечки обусловлен утечкой по периметру перехода, либо через дефекты структуры. Этот ток может быть нелинеен.

Раздел 1.4 содержит заключение к первой главе, дающее обзор известных моделей и эффектов, а также новых результатов по модификации рассмотренных моделей.

Во **Второй главе** проводится детальный анализ шумов прототипов следующих приборов: (а) светодиодов на $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ квантовых ямах и InAs квантовых точках; (б) светодиодов только на InAs квантовых точках; (в) лазеров на $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ квантовых ямах.

В Разделе 2.1 описаны структуры исследованных приборов, изготовленных в группе Б.Н. Звонкова, Научно-исследовательский физико-технический институт (НИФТИ) ННГУ.

В Разделе 2.2 рассмотрена излучательная и безызлучательная рекомбинация. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках может носить как излучательный, т.е. с испусканием фотонов, так и безызлучательный характер. В излучающих устройствах преобладает первый тип рекомбинации. Однако на практике безызлучательную рекомбинацию никогда не удаётся свести к нулю. Поэтому, в разделе проведён анализ конкуренции между двумя видами рекомбинации в полупроводниках.

В Разделе 2.3 проводится анализ выявленных отклонений от идеальной вольтамперной характеристики. Эти отклонения могут быть обусловлены

наличием паразитных сопротивлений (последовательных или параллельных) в эквивалентной схеме диода.

В Разделе 2.4 проводится анализ ВАХ и токовой зависимости спектра НЧ шума исследуемых светодиодов и лазеров [1], [2]. Во всех исследованных приборах обнаружен ток утечки. Приведены экспериментальные результаты: вольтамперные характеристики, токовые зависимости спектра 1/f шумового напряжения. Основным результатом является вывод о том, что наблюдается неоднородность протекания тока, обусловленная формированием квазиомических шунтов и возникновением областей с пониженной высотой барьера. Показано, что именно этот механизм является причиной фликкерного шума в таких светодиодах и лазерах.

В Разделе 2.5 приводятся результаты совместного анализа шумов напряжения $v(t)$, выделяющегося на лазерных диодах, и флуктуаций интенсивности $p(t)$ их оптического излучения [17], [23]. Для удобства анализа использована функция взаимной когерентности Γ_{vp} (см. Рис. 1). Она представляет собой модуль коэффициента корреляции электрической $v(t)$ и оптической $p(t)$ спектральных шумовых компонент. Подтверждено, что между шумами напряжения и флуктуациями интенсивности излучения лазеров существует корреляция. Данный факт проявляется в наличии близкой к единице функции взаимной когерентности в частотной области фликкерного шума.

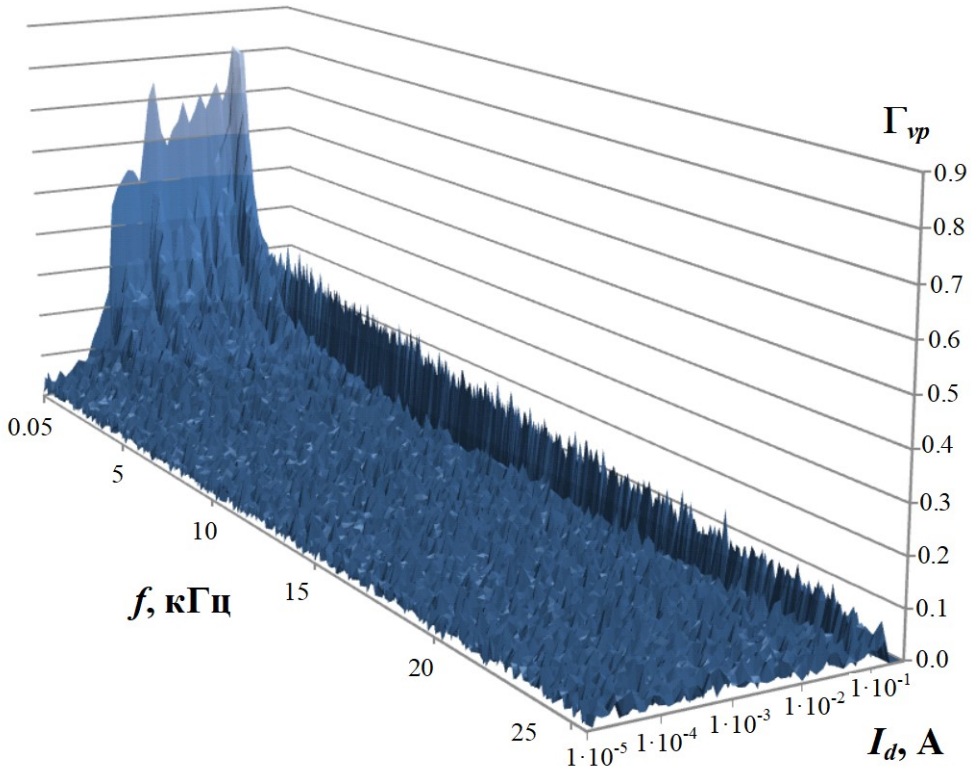


Рис. 1. Функция взаимной когерентности электрических шумов и флуктуаций интенсивности оптического излучения лазера на КЯ в зависимости от частоты анализа и от тока

Обнаруженная корреляция объясняется следующим образом. Поскольку полный ток через образец фиксирован, ток утечки модулирует ток через

квантовую яму и трансформируется во флуктуации интенсивности оптического излучения. Таким образом, появляется возможность проводить диагностику приборов, исследуя только электрические шумы.

В Разделе 2.6 обобщены результаты второй главы. Сделаны выводы о характеристиках исследуемых образцов. Представлены особенности шумовых процессов, проявляющихся в образцах, что даёт производителю возможность минимизировать шумы в новых поколениях приборов.

В **Третьей главе** исследуются низкочастотные шумы в полупроводниковых диодах с барьером Шоттки. Проведено исследование вольтамперных характеристик, спектров электрических шумов и их зависимости от тока через образец. Предложена модель диода, в которой учтено сопротивление омических контактов и базы диода, а также возможность существования утечки. На основе предложенной модели разработана процедура декомпозиции ВАХ таких диодов, ориентированная на шумовой анализ. Показано, что фликкерные шумы напряжения, наблюдающиеся в диодах, обусловлены флуктуациями тока термополевой эмиссии.

В Разделе 3.1 описана структура диодов, исследованных в данной работе. В диссертации исследовались планарные диоды с барьером Шоттки, образованным контактом Ti-Au с GaAs. Исследуемые прототипы диодов предоставлены Федеральным государственным унитарным предприятием (Научно-производственное предприятие) “Салют”.

В Разделе 3.2 рассмотрены механизмы токопрохождения в барьерах Шоттки. Проанализированы механизмы токопрохождения через контакт металл–полупроводник: термоэлектронная эмиссия электронов над барьером; термополевая эмиссия электронов сквозь вершину барьера (см. Рис. 2).

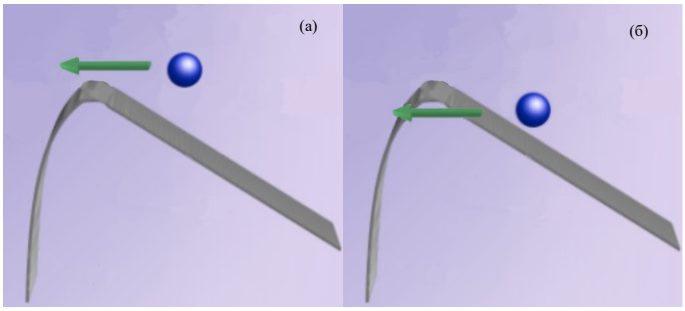


Рис. 2. Механизмы протекания тока в контакте металл–полупроводник: а) термоэлектронная эмиссия электронов над барьером; б) термополевая эмиссия электронов сквозь вершину барьера.

Показано, что диоды, у которых преобладает механизм термоэлектронной эмиссии, имеют почти идеальные характеристики. Участие в токопрохождении механизмов термополевой эмиссии электронов сквозь вершину барьера приводит к отклонению от “идеальной” ВАХ барьера Шоттки.

В Разделе 3.3 исследовано влияние сил изображения на ВАХ диодов Шоттки. Показано, что для исследуемых диодов влиянием сил изображения на прямую ветвь ВАХ можно пренебречь.

В Разделе 3.4 исследуется туннельное прохождение сквозь барьер Шоттки. Экспериментальные ВАХ объясняются в предположении, что в полупроводник диффундируют атомы, проявляющиеся как доноры, или в полупроводнике появляются электрически активные дефекты, вследствие чего изменяется эффективная концентрация легирующей примеси. При увеличении степени легирования барьер становится тоньше, и начинает проявляться термополевая эмиссия.

В Разделе 3.5 проведено исследование ВАХ диодов. Показано, что учёт неоднородности контакта удовлетворительно объясняет экспериментально наблюдаемое у диодов Шоттки, обладающих малой площадью контакта, искажение ВАХ в области достаточно больших токов, проявляющееся в увеличении коэффициента неидеальности по сравнению с единицей [19].

Таким образом, полый ток диода может быть представлен в виде (см., например, Рис. 3):

$$I = I_l + I_{tfe} + I_{te},$$

где I_l – омическая компонента тока (линейная утечка – leakage), I_{tfe} – ток термополевой эмиссии (thermionic-field emission), I_{te} – диодная компонента тока (термоэлектронная эмиссия – thermionic emission). Этим компонентам соответствуют включённые параллельно дифференциальные сопротивления R_l, R_{te}, R_{tfe}.

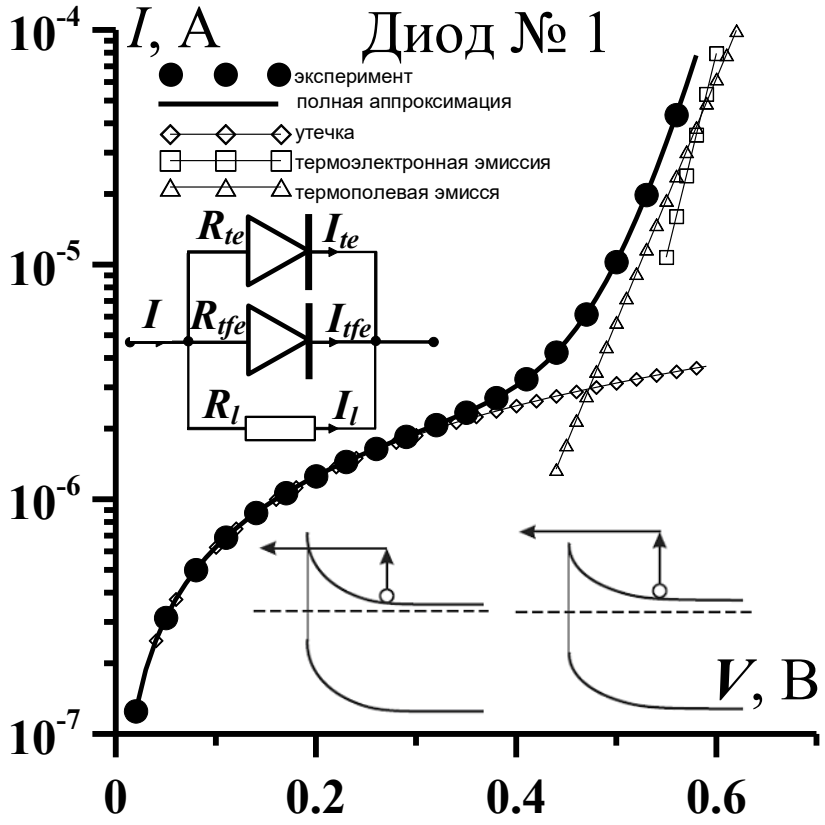


Рис. 3. Пример декомпозиции ВАХ диода. В верхней части рисунка (слева) показана эквивалентная схема диода. В нижней части рисунка показаны различные пути, по которым электроны могут преодолевать барьер на границе металл–полупроводник при прямом смещении: термополевая эмиссия (слева) и термоэлектронная эмиссия (справа).

Как видно из Рис. 3, суммарный ток удовлетворительно описывает экспериментальные данные. Из Рис. 3 также видно, что экспериментальные данные в диапазоне малых напряжений (V < 0.3 В) хорошо описываются омической компонентой тока; экспериментальные данные в диапазоне средних значений напряжений ВАХ (0.3 В < V < 0.5 В) соответствуют току термополевой эмиссии (туннелирование сквозь вершину барьера); экспериментальные данные в диапазоне больших напряжений ВАХ (0.5 В < V) соответствуют диодной компоненте тока.

В Разделе 3.6 исследуются характеристики низкочастотных шумов диодов Шоттки [14], [19]. Во всех диодах обнаружен гауссов 1/f шум. Кроме 1/f шума, в некоторых образцах обнаружен взрывной шум [20], имеющий характер случайного телеграфного процесса (СТП). Взрывной шум вызывается локальными микропробоями, например, в областях, где присутствуют дефекты структуры. Для выделения взрывного шума применена процедура, основанная на стандартной теории обнаружения сигналов на фоне шумов. Оцифрованная реализация шума была разделена на две компоненты. Первая – взрывной шум, вторая – гауссов 1/f шум. В некоторых диапазонах токов наблюдался только 1/f шум, в то время как в других диапазонах наблюдалась смесь взрывного шума и 1/f шума. Из проведённого анализа сделан вывод, что в исследованных диодах взрывной шум и 1/f шум имеют различную физическую природу.

В Разделе 3.7 приводятся результаты измерения и анализа спектра 1/f шумового напряжения диодов Шоттки. На Рис. 4. показано полное семейство спектров шумового напряжения диода №1 при токах через диод в диапазоне (~ 0.3 мкА) ÷(~ 10 мкА) и осциллограмма шума.

В Разделе 3.8 приведены результаты исследования токовых зависимостей шумовых спектров диодов с барьером Шоттки [19]. Показано, что фликкерные шумы напряжения, выделяющегося на диоде, обусловлены флуктуациями тока термополевой эмиссии. Экспериментальные данные, на примере одного из диодов, для спектра НЧ шума, на частоте f=10 Гц, в зависимости от полного тока I показаны точками на Рис. 5; сплошная линия – токовая зависимость спектра шума, полученная из объединенной модели флуктуаций линейного сопротивления утечки и нелинейного сопротивления термополевой эмиссии.

Как видно, модель флуктуаций тока термополевой эмиссии хорошо описывает шумы напряжения рассмотренного диода в области больших токов, в то время как в области малых токов экспериментальные данные описываются моделью флуктуаций линейного сопротивления утечки.

В Разделе 3.9 обобщены результаты третьей главы.

В **Четвёртой главе** исследуются низкочастотные шумы в смесителе на диоде с барьером Шоттки с дополнительным защитным диэлектрическим слоем SiO_2. Исследуемые прототипы диодов предоставлены Федеральным государственным унитарным предприятием (Научно-производственное предприятие) “Салют”. Анализируются вольтамперные характеристики, спектры электрических шумов и их зависимости от тока через диод.

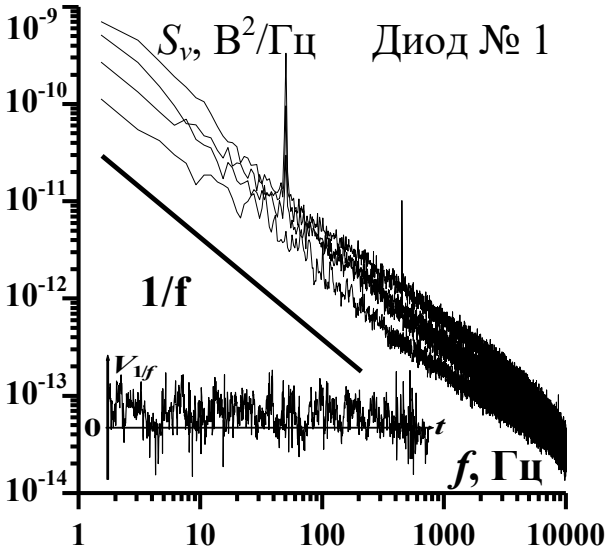


Рис. 4. Семейство спектров шумового напряжения диода №1 при токах через диод в диапазоне (~ 0.3 мкА) ÷(~ 10 мкА). Осциллограмма шумового напряжения (встав-

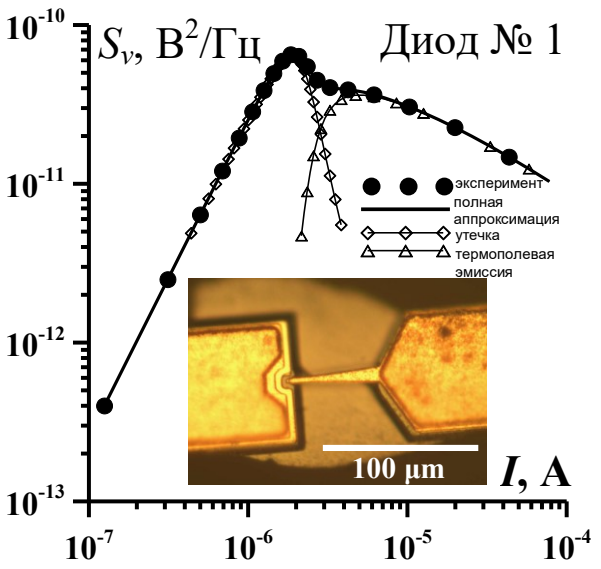


Рис. 5. Токовая зависимость спектра 1/f шума диода №1 и микрофотография диода (вставка).

Уточнена модель диода, в которой учтено сопротивление омических контактов и базы, а также возможность существования параллельного линейного сопротивления утечки и тока термополевой эмиссии. Показано, что фликкерные шумы напряжения, наблюдающиеся в диодах, обусловлены флуктуациями линейного сопротивления утечки и шумом тока термополевой эмиссии.

Получено выражение для спектра относительных флуктуаций коэффициента передачи смесителя. Показано, что зависимость спектра относительных флуктуаций коэффициента передачи смесителя от напряжения гетеродина имеет максимум. Из отношения сигнал/шум определена пороговая величина амплитуды принимаемого сигнала и её зависимость от амплитуды сигнала гетеродина [22].

В Разделе 4.1 описана структура диодов, исследованных в данной работе.

В Разделе 4.2 проведено исследование ВАХ диодов. Аналогично разделу 3.5 настоящей диссертации для данного типа диодов неоднородность контакта объясняет искажение ВАХ в области достаточно больших токов (увеличение коэффициента неидеальности по сравнению с единицей).

В Разделе 4.3 исследуются характеристики низкочастотных шумов диодов Шоттки данного типа. Во всех диодах обнаружен 1/f шум. Приводятся результаты измерения и анализа спектра 1/f шумового напряжения диодов.

В Разделе 4.4 исследованы флуктуации коэффициента передачи смесителя на таком диоде. Оценена спектральная плотность мощности относительных флуктуаций коэффициента передачи [22].

В Разделе 4.5 проведена оценка величины пороговой амплитуды входного сигнала смесителя [22]. Зависимости эффективного напряжения шума $v_{эфф}$ в полосе частот Δf (в данном случае [1 Гц, 20 кГц]), а также величины пороговой амплитуды V_{s0} от амплитуды сигнала гетеродина для отношения сигнал/шум (SNR), равного 3 и 10 дБ, показаны на Рис. 6.

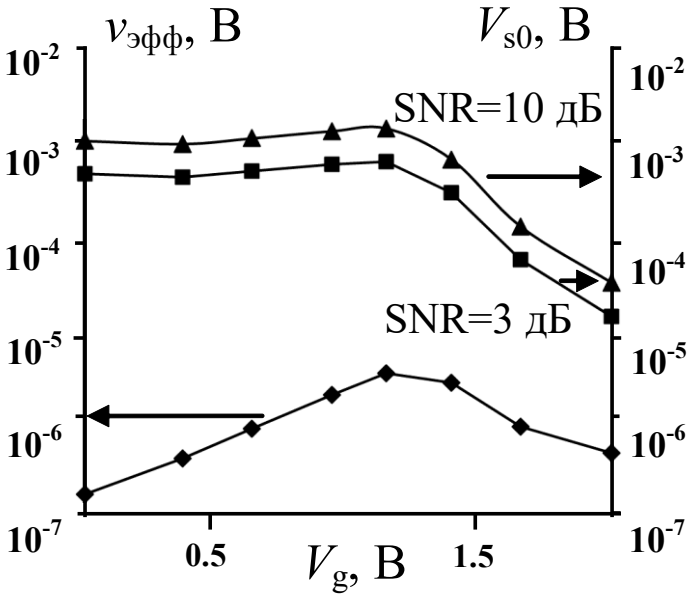


Рис. 6. Зависимости величины пороговой амплитуды V_{s0} и эффективного напряжения шума в полосе частот Δf (в диапазоне [1 Гц, 20 кГц]) от амплитуды сигнала гетеродина для SNR=3 дБ и SNR=10 дБ.

В Разделе 4.6 исследованы флуктуации коэффициента передачи смесителя на диоде Шоттки. Коэффициент передачи смесителя не постоянен во времени, а испытывает флуктуации, порождённые фликкерным шумом диода. В связи с этим решена задача определения формы спектра сигнала на выходе смесителя [22].

В Разделе 4.7 приведены результаты данной главы.

В **Пятой главе** проводится анализ шумов прототипов наноразмерных полупроводниковых диодов Шоттки с δ–легированием и преобразования шумов в детекторах на таких диодах. Представлены результаты исследования вольтамперных характеристик и спектра низкочастотного шума низкобарьерных диодов Шоттки [5]. Анализ ВАХ нужен для диагностики структуры диодов. В частности, из ВАХ могут быть определены параметры диода: дифференциальное сопротивление, сопротивление базы и контактов, высота барьера Шоттки, и т.д. Особенно важно, что из анализа ВАХ может быть уточнено значение толщины δ–слоя, полученного в процессе выращивания структуры.

ВАХ этих диодов детально исследовалась производителем. Здесь используется иной подход, ориентированный на выявление технологических областей в структуре диода, содержащих источники наблюдаемого фликкерного шума [18].

В Разделе 5.1 описана структура диодов, исследованных в данной работе (прототипы диодов изготовлены в группе В.И. Шашкина, Институт физики микроструктур (ИФМ) РАН). Проводится анализ ВАХ исследуемых диодов. Предложена модель низкобарьерного диода Шоттки с δ–легированием, в которой учтено сопротивление омических контактов и базы, а также возможность существования утечки.

Осуществлена декомпозиция ВАХ таких диодов. Исследованы ВАХ диодов; получено удовлетворительное согласие модели и эксперимента.

Показана необходимость учета последовательного сопротивления базы и контактов R_b. Помимо снижения высоты барьера с целью уменьшения дифференциального сопротивления диода R_{D0} при нулевом напряжении, необходимо уделять внимание проблеме уменьшения сопротивления базы и контактов.

Приведены измеренные спектры НЧ шумов исследуемых диодов. Выполнен анализ токовых зависимостей этих спектров.

На основе анализа ВАХ диода предложена модель флуктуаций эффективного числа атомов донорной примеси в δ–слое перехода Шоттки, объясняющая экспериментальные данные. Атомы основной примеси полностью ионизованы. Однако в рассматриваемом слое могут присутствовать подвижные атомы неконтролируемых примесей, например, кислорода, водорода и т.д. Предполагается, что каждый такой атом формирует ДУС. Стохастические (термоактивированные) переключения между состояниями ДУС могут проявляться через стохастические (типа СТП) изменения энергии ионизации подобных (бистабильных) атомов примеси. Эти изменения приводят к флуктуациям эффективного числа атомов донорной примеси.

Согласно предложенной модели, спектр фликкерного шумового напряжения, выделяющегося на диоде, сначала нарастает пропорционально квадрату тока через диод, а при больших значениях тока наступает эффект насыщения.

Выявлена неприменимость модели Ван дер Зила для описания спектра естественных шумов в полупроводниковых диодах, имеющих коэффициент неидеальности ВАХ, превышающий единицу. Предложено и экспериментально подтверждено модифицированное соотношение, устраняющее этот недостаток [3], [4], [8], [16].

В Разделе 5.2 для случая действующего на вход детектора стационарного гауссовского шума, в рамках гауссовской аппроксимации совокупности входной и выходной переменных найдены статистические характеристики выходного сигнала, когда в качестве нелинейного элемента используется диод Шоттки с δ–легированием [6], [7], [12], [13]. На Рис. 7 (а) показан потенциальный профиль на границе металл–полупроводник, на Рис. 7 (б) – типичная ВАХ диода, на Рис. 7 (в) приведена эквивалентная схема безынерционного детектора. Здесь $x(t)$ – входная переменная, соответствующая приложенному к детектору напряжению, а в качестве выходной переменной выступает ток через нагрузочное сопротивление R, $y(t) = i(t)$.

Зависимость постоянной составляющей m_y и дисперсии D_y выходной переменной от дисперсии D_x входного шума найдена с помощью известного метода ковариационных рядов, с учётом того, что выражение для выходных переменных через входную является неявным:

$$m_y = \langle F \rangle,\ D_y = \langle F' \rangle^2 \left[1 + R\langle F' \rangle\right]^{-2} D_x,$$

где

$$\langle F\rangle = I_s\left\langle \exp\left(\left(\frac{1}{\eta V_T}-\frac{\alpha}{V_T}\right)v\right)\right\rangle - I_s\left\langle \exp\left(-\frac{\alpha}{V_T}v\right)\right\rangle,$$

$$\langle F'\rangle = \left(\frac{1}{\eta V_T}-\frac{\alpha}{V_T}\right)\langle F\rangle + \frac{I_s}{\eta V_T}\left\langle \exp\left(-\frac{\alpha}{V_T}v\right)\right\rangle.$$

Здесь F – вольтамперная характеристика; v – напряжение, приложенное к барьеру Шоттки; η – коэффициент неидеальности ВАХ; $\alpha=d/D_M$ <<1 – относительная толщина δ–слоя (d – ширина туннельного барьера на границе с металлом ~ единиц нанометра, D_M – ширина барьера Мотта ~100 нм); I_s – характерный ток; V_T – тепловой потенциал. При этом α принимает значения от 0.04 до 0.08.

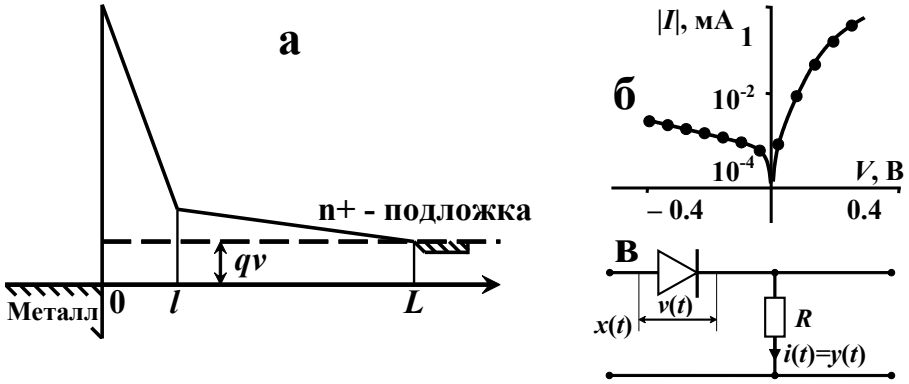


Рис. 7. (а) Потенциальный профиль. (б) Типичная ВАХ диода. (в) Эквивалентная схема безынерционного детектора.

В результате, для m_y и D_y получаем достаточно громоздкую систему трансцендентных уравнений, которую здесь приводить не будем, а вместо этого сразу обратимся к её графическому анализу.

Для удобства графического анализа удобно ввести следующие безразмерные переменные и параметры:

$$\sigma^2 = \left(\frac{1}{\eta V_T}-\frac{\alpha}{V_T}\right)^2 D_x,\ m = \left(\frac{1}{\eta V_T}-\frac{\alpha}{V_T}\right)Rm_y,\ D = \left(\frac{1}{\eta V_T}-\frac{\alpha}{V_T}\right)^2 R^2 D_y.$$

Первая переменная σ^2 является безразмерной дисперсией входного случайного процесса, вторая m – безразмерным средним значением и третья D – дисперсией безразмерной выходной переменной.

На Рис. 8 представлены зависимости среднего значения m от дисперсии входного случайного процесса σ^2 для трёх диодов 1, 2 и 3 различающихся параметрами ВАХ.

Зависимости дисперсии выходной переменной от дисперсии входного случайного процесса $D=D(\sigma^2)$ для тех же диодов приведены на Рис. 9.

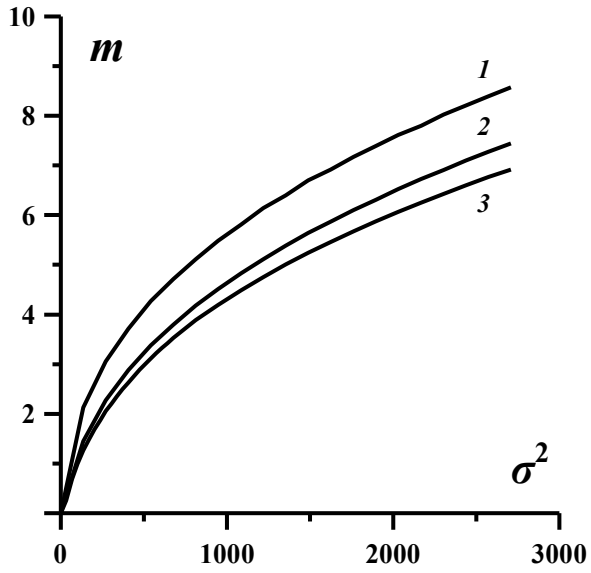


Рис. 8. Зависимости среднего значения m от дисперсии входного шума σ^2.

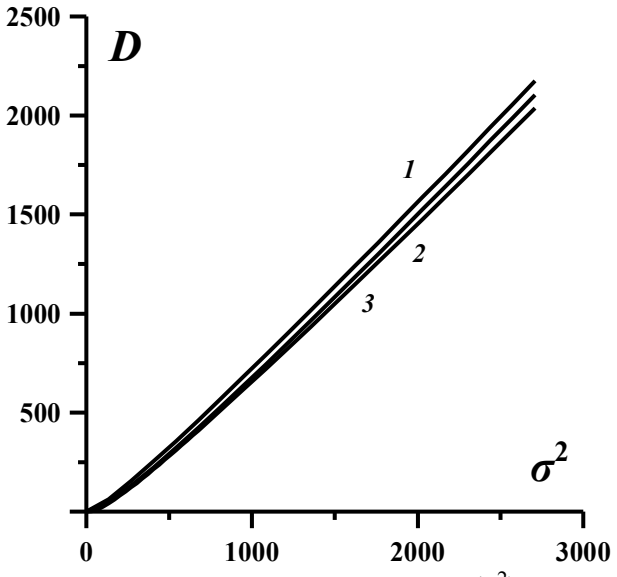


Рис.9. Зависимости $D=D(\sigma^2)$.

Анализ полученных зависимостей показывает, что при малой дисперсии входного шума имеют место зависимости вида: $m \sim \sigma^4$, $D \sim \sigma^6$. При большой дисперсии безразмерное среднее значение растет пропорционально кубическому корню из безразмерной дисперсии входного шума, $m \sim \sigma^{2/3}$, а дисперсия безразмерной выходной переменной растет линейно с увеличением безразмерной дисперсии входного шума, $D \sim \sigma^2$. Эти закономерности можно объяснить тем, что при малой мощности входного шума эффект детектирования обусловлен только первыми членами в разложении вольтамперной характеристики диода, а при больших мощностях на эффекте детектирования сказываются все нелинейности.

В Разделе 5.3 рассмотрена инерционная детектирующая система, на входе которой действует гауссовский стационарный марковский процесс. Решена задача нахождения выходных статистических характеристик и их зависимостей от параметров входного шума при инерционном детектировании с использованием диода Шоттки с δ–легированием в гауссовском приближении для совокупности входной и выходной переменной [9], [12], [13]. На Рис.10 (а) показана микрофотография диода и (б) эквивалентная схема инерционного детектора.

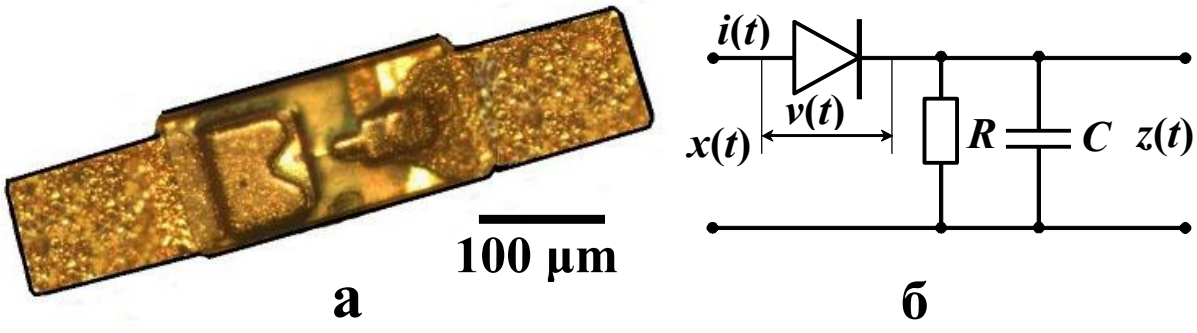


Рис. 10. (а) Микрофотография диода Шоттки с δ–легированием. (б) Эквивалентная схема инерционного детектора.

Дифференциальное уравнение, связывающее выходное исследуемое напряжение $z(t)$ с входным $x(t)$ имеет вид:

$$dz/dt = -az + a\,\tilde{F}(x-z).$$

Здесь введены обозначения: $a = (RC)^{-1}$ – обратная постоянная времени усредняющего звена; $\tilde{F}(v)=RF(v)$; $x(t)$ – гауссовский стационарный шум – марковский процесс, обладающий дисперсией D_x и удовлетворяющий уравнению:

$$dx/dt = -\beta x + \xi(t),$$

где $\xi(t)$ – гауссовский стационарный белый шум, β – множитель, характеризующий полосу входного шума. При этом среднее значение входного процесса $\langle x(t)\rangle=0$, а ковариационная функция входного процесса $x(t)$, в силу стационарности входного процесса, зависит от разности моментов времени τ: $B_x[\tau] = D_x\exp(-\beta|\tau|)$. Таким образом, спектральная плотность мощности входного процесса $x(t)$ имеет вид: $S_x(\omega) = 2D_x\,\beta\,/(\omega^2+\beta^2)$. То есть, ширина полосы входного процесса определяется параметром β.

Уравнения, определяющие установившиеся значения кумулянтов:

$$\langle z\rangle = \left\langle \tilde{F}\right\rangle_G,$$

$$\langle z,x\rangle = a\left\langle \tilde{F}'\right\rangle_G\left[\beta + a\left(1+\left\langle \tilde{F}'\right\rangle_G\right)\right]^{-1} D_x,$$

$$D_z = \left\langle \tilde{F}'\right\rangle_G\left[1+\left\langle \tilde{F}'\right\rangle_G\right]^{-1}\langle z,x\rangle.$$

Здесь $\langle \tilde{F}'\rangle_G$ – производная по аргументу функции, усредненная в предположении его гауссовости. Скобка $\langle\ldots,\ldots\rangle$, в которой имеется запятая, разделяющая переменные, является кумулянтной скобкой: $\langle z, x\rangle=\langle z\cdot x\rangle - \langle z\rangle\langle x\rangle$.

В результате для $\langle z\rangle$ и D_z получаем довольно громоздкую систему трансцендентных уравнений, которую здесь приводить не будем, а вместо этого сразу обратимся к её графическому анализу.

Для удобства графического анализа удобно ввести следующие безразмерные переменные и параметры:

$$\sigma^2 = \left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right)^2 D_x,\ \tilde{m} = \left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right)\langle z\rangle,\ \tilde{D} = \left(\frac{1}{\eta V_T} - \frac{\alpha}{V_T}\right)^2 D_z.$$

Введённые параметры отличаются от использованных ранее в разд. 5.2 отсутствием зависимости от сопротивления R, что связано с тем, что $\tilde{F}(v)=RF(v)$. При этом, как и ранее, первая переменная σ^2 пропорциональна мощности воздействующего шума, вторая $\tilde{m}$ – является безразмерным средним значением и третья $\tilde{D}$ – дисперсией безразмерной выходной переменной. На рисунках ниже представлены результаты, полученные для диодов 1, 2 и 3.

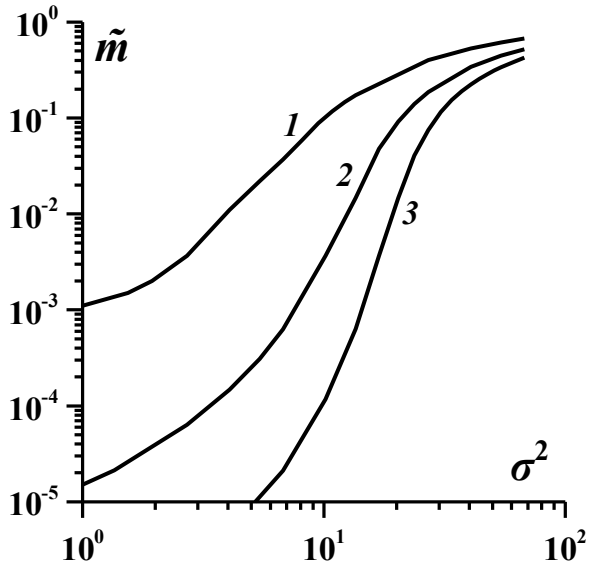


Рис. 11. Зависимости $\tilde{m}$ от σ^2.

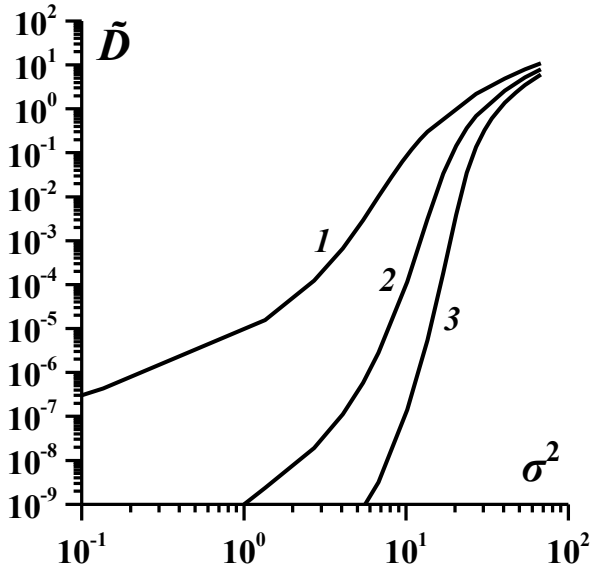


Рис.12. Зависимости $\tilde{D}=\tilde{D}(\sigma^2)$.

На Рис. 11 показана зависимость $\tilde{m}(\sigma^2)$. Она при относительно больших значениях мощности входного шума ведёт себя аналогично соответствующей зависимости $\tilde{m}$ (σ^2) из разд. 5.2 данной работы, т.е. $\tilde{m} \sim \sigma^{2/3}$. Это означает, что произошел переход в режим безынерционного детектирования.

На Рис. 12 показана зависимость $\tilde{D}(\sigma^2)$. При относительно больших σ^2, дисперсия безразмерной выходной переменной растет линейно с увеличением безразмерной дисперсии входного процесса $\tilde{D} \sim \sigma^2$, что также указывает на переход в режим безынерционного детектирования.

Теперь можно получить спектральную плотность мощности на выходе детектора в гауссовском приближении:

$$S_y(\omega) = < y >^2 \delta(\omega) + S_y^{\,fl}(\omega).$$

В этом выражении первое слагаемое представляет собой постоянную составляющую, а второе – флуктуационную, причём:

$$S_y^{\,fl}(\omega) = \frac{D_y}{\pi} \frac{a\beta\left[a\left(1+\left\langle \tilde{F}' \right\rangle_G\right)+\beta\right]\left(1+\left\langle \tilde{F}' \right\rangle_G\right)}{\left(a^2\left(1+\left\langle \tilde{F}' \right\rangle_G\right)^2+\omega^2\right)\left(\beta^2+\omega^2\right)}.$$

Таким образом, в гауссовском приближении статистические характеристики выходного процесса определяются параметром $<\tilde{F}'>_G$, взаимоотношением a и β и мощностью входного шума.

Для дальнейшего рассмотрения необходимо разграничить две области, связанные с соотношением полос входного шума и системы. При этом полосу шума можно определить как β, а полосу системы как $a(1+<\tilde{F}'>_G)$. Полоса системы представляет собой полосу изучаемой нелинейной системы, определённую в гауссовском приближении. Эта полоса зависит от интенсивности воздействующего на эту систему шума, что является следствием нелинейности системы.

Рассмотрим сначала случай широкополосного входного шума, $\beta >> a(1+<\tilde{F}'>_G)$. На Рис. 13 изображена эволюция выходного спектра. Сначала, при малой мощности входного шума, полоса выхода неизменна и равна a. При дальнейшем возрастании σ^2 полоса начинает расширяться, оставаясь при этом много меньше β, а отношение флуктуационной составляющей к дисперсии входного процесса, отложенное по вертикальной оси на нулевой частоте $S_z^{fl}(0)/(D_x/\pi\beta)$, стремится к единице. То есть при малой мощности входного шума, имеет место режим, близкий к линейному. При больших значениях мощности входного шума наблюдается существенно нелинейный режим, сопровождающийся расширением спектра.

При дальнейшем росте мощности входного шума условие широкополосности нарушается, и при росте σ^2 приходим к режиму, соответствующему $\beta << a(1+<\tilde{F}'>_G)$. Это является условием безынерционного детектирования.

Эволюция спектра происходит только “по высоте” (Рис. 14), которая возрастает при увеличении мощности входного шума.

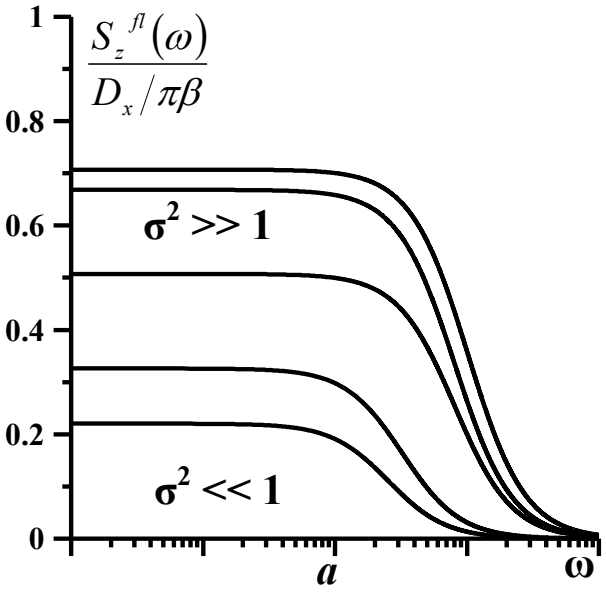


Рис. 13. Эволюция выходного спектра.

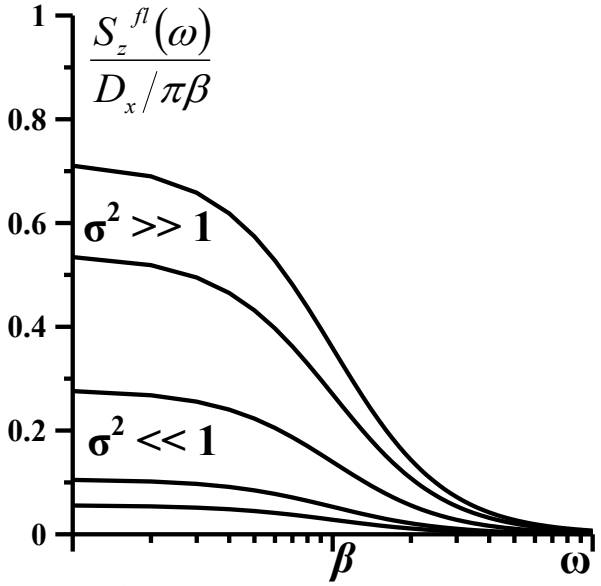


Рис.14. Эволюция спектра “по высоте”.

В Разделе 5.4 обобщены результаты пятой главы.

Найдены статистические характеристики выходного процесса при безынерционном детектировании случайного стационарного процесса с учетом обратной связи с использованием диода Шоттки с δ–легированием в гауссовском приближении. При малой дисперсии входного процесса σ^2 безразмерное среднее значение и дисперсия выходного процесса зависят от σ^2 как: $m \sim \sigma^4$, $D \sim \sigma^6$, а при большой дисперсии входного процесса полученные зависимости ведут себя аналогично зависимостями, полученными для “обычного” диода. Эти закономерности объясняются тем, что при малой мощности входного шума практически весь эффект детектирования обусловлен первыми членами разложения в ряд вольтамперной характеристики, а при больших мощностях сказываются все нелинейности. Рассмотрены предельные случаи слабой обратной связи, при которой имеет место обычное нелинейное безынерционное

детектирование, и сильной обратной связи, при которой детектируется небольшая часть входного процесса и система является практически линейной.

Для характеристики обратной связи введён безразмерный коэффициент обратной связи $A=R/R_{D0}$, равный отношению нагрузочного сопротивления к дифференциальному сопротивлению диода при нулевом напряжении.

В частности, в случае слабой обратной связи $A<<1$, большую роль играет эффект расширения полосы спектра. Это объясняется тем, что при малой обратной связи почти всё входное напряжение попадает на детектор и подвергается нелинейному преобразованию.

При возрастании обратной связи на детектор начинает поступать меньшая часть входного напряжения. Следовательно, падает выпрямлённый ток и уменьшается полоса выходного шума за счёт того, что часть шума сохранила первоначальную полосу.

При дальнейшем росте обратной связи вклад “продетектированных” шумов становится всё более малым и величина постоянного тока на выходе падает, при этом основную роль начинает играть прямое прохождение шума.

При сильной обратной связи $A>>1$ детектируется небольшая часть входного шума и система является почти линейной. Выпрямлённый ток мал, а выходной шум практически совпадает с входным. Поэтому полоса выходного шума равна полосе входного спектра.

Проанализированы найденные выходные статистические характеристики при инерционном детектировании стационарного шума с использованием диода Шоттки с δ–легированием. Зависимости выходных параметров от входных получены в гауссовском приближении. Анализ полученных зависимостей позволил выявить особенности поведения среднего значения и дисперсии выходного шума при малой интенсивности воздействующего шума.

В случае широкополосного входного шума при увеличении мощности этого шума происходит уменьшение скорости роста среднего значения на выходе. Это связано с тем, что постоянная составляющая из-за отрицательной обратной связи непрерывно сдвигает рабочую точку нелинейного элемента (диода) в область меньшей крутизны так, что при больших значениях мощности входного шума постоянная составляющая на выходе становится пропорциональной этой мощности.

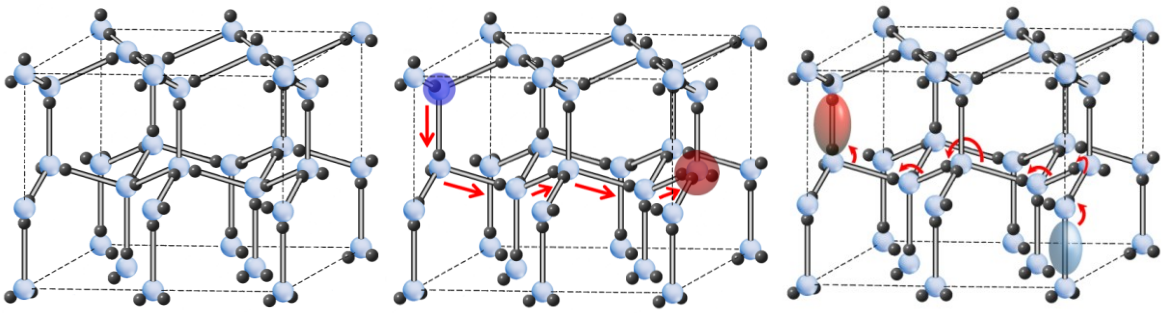
При дальнейшем росте мощности, когда полоса системы сильно возрастает, условие широкополосности нарушается и наступает режим квазистатичности, соответствующий режиму безынерционного детектирования.

Таким образом, показано, что при относительно большой дисперсии входного шума имеет место переход в режим безынерционного детектирования.

В **Шестой главе** рассмотрены флуктуационные процессы в физических системах, подчиняющихся правилам льда.

В Разделе 6.1 приведён обзор современных воззрений на водяной лёд и представлены результаты оригинальных исследований в этой области [15], [21], [25], [26]. В гексагональной модификации льда, которая реализуется в природных условиях Земли, ионы кислорода образуют упорядоченную гекса-

гональную решетку. Распределение протонов по позициям характеризуется правилами льда. Впервые правила льда были сформулированы Берналом и Фаулером: (1) два и только два протона вблизи каждого иона кислорода, (2) один и только один протон на каждой водородной связи. Фрагмент атомной решётки льда изображен на Рис. 15. Это основное состояние является замороженным. Динамика становится возможной при конечных температурах, благодаря существованию нарушений правил льда, называемых также дефектами. Вместо рассмотрения системы сильно взаимодействующих диполей с атомной концентрацией в работе [15] описывается движение зарядов путём перемещения H_3O^+, OH^- (кислородные ионы с тремя или одним протоном, соответственно) и D, L (водородные связи с двумя или нулем протонов, соответственно) – дефектов. Введение в рассмотрение дефектов позволяет найти обобщённую диэлектрическую проницаемость льда [15].



(а) (б) (в)

Рис. 15. а) Фрагмент решётки гексагонального льда. Кислородные ионы показаны светлыми кружками, они образуют гексагональную решётку. Протоны показаны тёмными кружками, их распределение удовлетворяет правилам льда. б) Рождение и разделение ионных дефектов связей: H_3O^+, OH^- – дефекты показаны большими кружками (кружки справа и слева, соответственно). в) Рождение и разделение дефектов связей: D, L дефекты показаны большими овалами (розовый овал слева соответствует D – дефекту, а голубой овал справа соответствует L – дефекту).

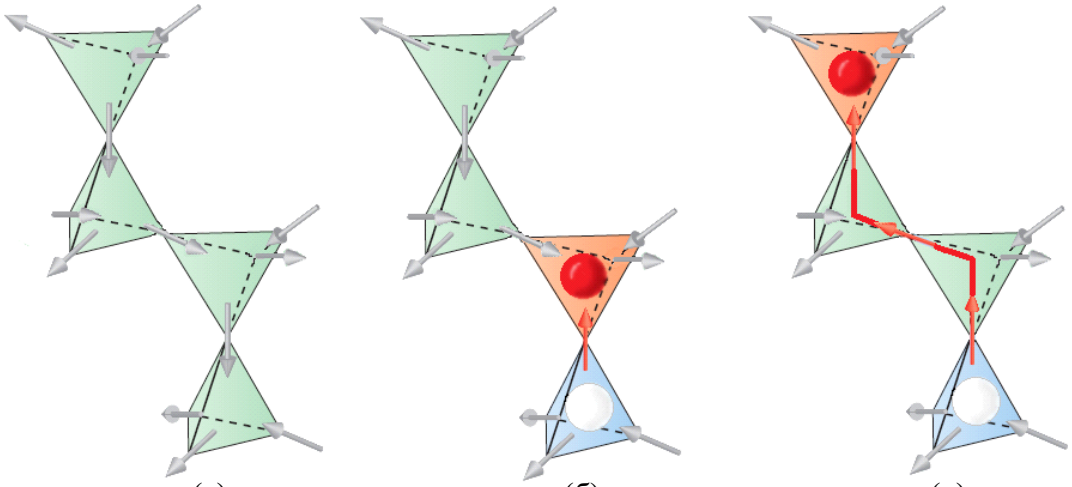
Обобщённая диэлектрическая проницаемость описывает электрический отклик как связанных зарядов (обычная диэлектрическая проницаемость), так и свободных зарядов (проводимость). В данном разделе в рамках модели классических квазичастиц вычислена обобщённая диэлектрическая проницаемость льда (воды) как функция волнового вектора и частоты в диапазоне частот, в котором отклик на приложенное электрическое поле определяется протонной подсистемой льда [15]. Полученное выражение полностью описывает электродинамику льда: распространение электромагнитных волн, экранирование и перенос заряда.

Водяной лёд является базой для анализа чрезвычайно интересного и перспективного объекта исследования – спинового льда. Спиновый лёд имеет широкие перспективы для практического использования в качестве принципиально новых устройств записи и хранения информации.

В Разделе 6.2 рассмотрен спиновый лёд. Свойства этого вещества впервые описаны Харрисом с соавторами на примере титаната гольмия, в котором ячейки кристаллической решётки имеют форму тетраэдра (Рис. 16 (а)).

В невозбужденном состоянии полный спин, а значит и магнитный момент каждой ячейки, равен нулю. Энергетический минимум системе обеспечивает такая конфигурация, при которой у двух ионов спины направлены в центр тетраэдра, а у двух — в направлении от центра («два внутрь, два наружу»), (Рис. 16 (а)). В последнее время появилось множество работ, обусловленное интересом к изучению спинового льда. Такой интерес вызван теоретическим предсказанием в спиновом льду магнитных дефектов – аналогов уединённого магнитного полюса, монополя Дирака, о котором много лет говорили физики. Впоследствии эти дефекты получили название магнитных монополей. При ненулевых температурах возможен переворот произвольного спина, который приводит к образованию двух неправильных конфигураций (Рис. 16 (б)). Четыре смежных спина с тремя магнитными диполями, направленными к центру тетраэдра, и одним диполем, направленным от центра, образуют положительный магнитный дефект. Он является магнитным аналогом положительного ионного дефекта во льду. Соответственно, отрицательный магнитный дефект (три магнитных диполя направлены от центра и один к центру), является аналогом отрицательного ионного дефекта во льду.

Последовательное повторение смены ориентации спина приводит к дальнейшему перемещению дефектов. Дефекты играют роль квазичастиц, движение которых по решётке переориентирует спины на всём пройденном пути, приводя к образованию “спинового спагетти” (Рис. 16 (в)).



(а) (б) (в)

Рис. 16. (а) Фрагмент магнитной решётки без магнитных дефектов; (б) переворот спина на вертикальной связи, приводящий к образованию пары магнитных дефектов; (в) перемещение магнитных дефектов, приводящее к образованию “спинового спагетти”.

На практике обнаружить монополь крайне сложно. Его магнитный заряд весьма мал, концентрация монополей в образце должна быть очень низкой, иначе эффекты монополей противоположных знаков компенсируют друг друга [10].

Присутствие магнитных монополей приходится регистрировать по косвенным признакам. Например, обнаружен эффект нерегулярного роста намагниченности спинового льда при увеличении внешнего магнитного по-

ля. Это аномальное поведение удалось связать с уединёнными магнитными зарядами. Другой аргумент в поддержку гипотезы о монополях – это объяснение ещё одного аномального эффекта, наблюдающегося в спиновом льду, – слишком медленное уменьшение остаточной намагниченности при выключении внешнего магнитного поля. Оба аргумента довольно сильные, но их нельзя считать окончательными.

В представленном разделе предложен альтернативный способ обнаружения магнитных монополей в спиновом льду [24]. Впервые исследована не стационарная концентрация магнитных монополей, а процессы генерации и рекомбинации квазичастиц, имеющие флуктуационный характер. Выведено уравнение типа Ланжевена для анализа этих флуктуаций, позволившее определить и проанализировать их спектр. Найдено выражение для спектра относительных флуктуаций числа пар квазичастиц [24]:

$$S_{\delta N}(f)=\frac{4\tau}{1+(2\pi f\tau)^2}\cdot\sigma_{\delta N}^2,$$

где τ – постоянная времени, определяемая через разность производных от скоростей рекомбинации и генерации по концентрации пар квазичастиц, взятую в точке установившейся средней концентрации пар квазичастиц; $\sigma_{\delta N}^2$ – дисперсия (мощность) флуктуаций. На Рис. 17 показана зависимость формы спектра и его высоты от величины τ.

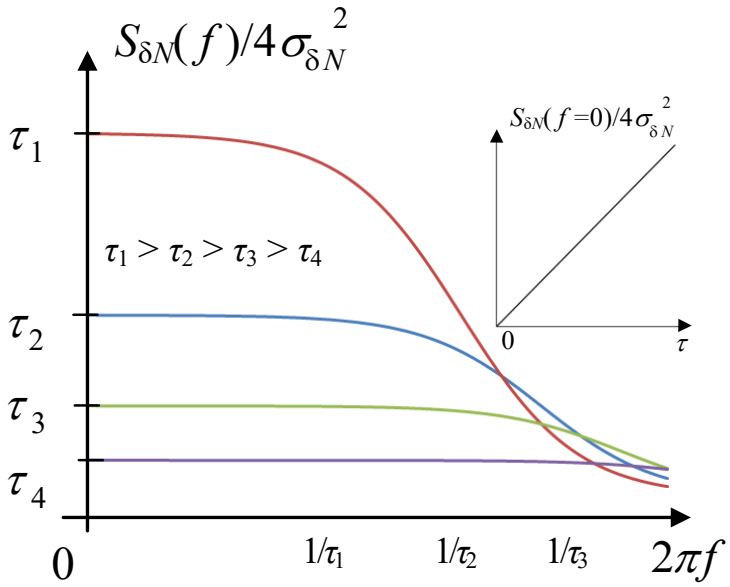


Рис. 17. Зависимость формы спектра и его высоты от величины τ. Вставка: зависимость спектра на нулевой частоте анализа (f=0) от величины постоянной времени τ.

Показано, что флуктуации концентрации магнитных монополей проявляются во флуктуациях физически измеримой величины – магнитного момента.

$$S_{\Delta M}(f)\propto\left(\frac{\mu_0 Q^3}{8\pi kT}\right)^2\cdot S_{\delta N}(f).$$

Здесь $S_{\Delta M}(f)$ – спектр абсолютных флуктуаций магнитного момента, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Q – элементарный магнитный заряд, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

Предложен метод определения спектра флуктуаций числа пар магнитных монополий путём измерения флуктуаций магнитного момента спинового льда.

Метод, предложенный соискателем, использован коллективом зарубежных авторов (со ссылками на работу соискателя [24]), экспериментально подтвердивших состоятельность метода и предсказанный спектр генерационно-рекомбинационного шума магнитных монополей [Dusad, R. Magnetic Monopole Noise / R. Dusad, F. K. K. Kirschner, J. C. Hoke, B. Roberts, A. Eyal, F. Flicker, G. M. Luke, S. J. Blundell, and J. C. S. Davis// Nature –2019. –Vol. 571. – No. 7764. – pp. 234-239].

Дополнительно соискателем разработана обобщённая модель генерационно-рекомбинационного шума магнитных монополей, учитывающая возможность распределения времён релаксации [27], [28].

В Разделе 6.3 делаются выводы о сходствах и различиях моделей обыкновенного и спинового льда и об особенностях флуктуаций концентрации квазичастиц в спиновом льду.

В **Заключении** изложены основные результаты и выводы.

В **Приложении 1** представлено описание экспериментальной установки для измерения низкочастотных шумов светоизлучающих структур. Приведены основные характеристики приборов, входящих в её состав.

В **Приложении 2** представлено описание основных характеристик приборов установки для измерения НЧ шума диодов с барьером Шоттки.

В **Приложении 3** приведен список сокращений и обозначений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты, полученные в диссертации, состоят в следующем.

1. Выявлено, что неоднородность протекания тока в квантово-размерных светодиодах и лазерах, обусловленная формированием квазиомических шунтов и возникновением областей с пониженной высотой барьера является причиной низкочастотного шума.

2. Корреляция между флуктуациями напряжения, выделяющегося на лазерном диоде с квантовыми ямами, и флуктуациями интенсивности его излучения, наблюдающаяся в спектральной области фликкерного шума, указывает на общий источник этих флуктуаций. Это даёт возможность на основании исследования флуктуаций напряжения, выделяющегося на лазерном диоде, делать выводы об излучательных свойствах диода.

3. Показано, что селективное δ–легирование низкобарьерных диодов Шоттки приводит к возникновению эффекта “насыщения” интенсивности фликкерных шумов напряжения, тогда как в диодах Шоттки без δ–легирования имеет место эффект “максимизации” шумов. Эта информация

может быть использована для диагностики структуры низкобарьерных диодов и выявления возможных источников фликкерных шумов. Установлена обратно пропорциональная зависимость уровня спектральной плотности мощности дробового шума в диодах Шоттки и в диодах с *p-n* переходом от коэффициента неидеальности вольтамперной характеристики.

4. Впервые аналитически решена задача преобразования случайных процессов детекторами на низкобарьерных диодах, выполненных на основе селективно легированных микроструктур металл–полупроводник. Полученные результаты позволяют определить особенности поведения спектра на выходе детектирующей системы в безынерционном и инерционном режимах, что актуально для задач приема излучения.

5. Показано, что ток термополевой эмиссии, обусловленный наличием областей с локально избыточной концентрацией донорных примесей в диодах с контактом металл–полупроводник (*n*-типа), наряду с током утечки, является причиной возникновения фликкерного шума.

6. Получено аналитическое решение задачи о влиянии флуктуаций электрофизических параметров диодов с контактами металл–полупроводник на форму спектра выходного сигнала в смесителях на таких диодах. Эта информация позволяет оценивать спектр этого сигнала, зная шумовые характеристики диода.

7. Исследованы флуктуационные процессы в спиновом льду. Предложен метод анализа флуктуаций числа пар магнитных дефектов (монополей) в спиновом льду, то есть процессов рождения (генерации) и уничтожения (рекомбинации) пар магнитных монополей. Доказано, что флуктуации можно описывать с помощью уравнения Ланжевена. Определён спектр шума генерации–рекомбинации магнитных монополей. Предложен новый метод экспериментального обнаружения магнитных монополей в спиновом льду. Флуктуации концентрации монополей проявляются во флуктуациях плотности магнитного момента, которые могут быть измерены, что подтверждено в эксперименте других авторов.

Таким образом, в диссертации развит единый подход к анализу флуктуаций и флуктуационных эффектов в электронных твердотельных системах.

Настоящий подход преследует цель выбора адекватной физической модели источников шумов и флуктуаций, её экспериментальную проверку и разработку методики определения статистических характеристик источников по результатам измерений.

Например, флуктуации эффективного числа атомов донорной примеси в δ–слое перехода низкобарьерных диодов Шоттки приводят к флуктуациям полного тока диода. Эти флуктуации проявляются в шумовом напряжении, выделяющемся на диоде и, как следствие, в спектральной плотности мощности флуктуаций напряжения S_V. Измеряя в эксперименте шумовое напряжение диода можно получить спектральную плотность мощности флуктуаций напряжения и сравнивая её с модельным выражением, таким образом, можно верифицировать модель флуктуаций эффективного числа атомов донорной примеси в δ–слое перехода низкобарьерных диодов Шоттки.

Флуктуации числа пар магнитных монополей приводят к флуктуациям магнитного момента ΔM, обладающим спектральной плотностью мощности $S_{\Delta M}$. Измеряя флуктуации магнитного момента можно верифицировать модель флуктуаций числа пар магнитных монополей в спиновом льду.

Таким образом, в диссертационной работе содержится решение ряда актуальных задач по исследованию флуктуационных эффектов в полупроводниковых структурах с потенциальными барьерами, а также в твердотельных системах, подчиняющихся правилам льда. Разработаны теоретические положения, совокупность которых показывает, что флуктуации в различных твердотельных системах могут быть описаны в рамках единого подхода.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Монографии:

М1. **Клюев, А.В.** Низкочастотные шумы в наноразмерных полупроводниковых структурах: источники, измерение, методы анализа. LAP LAMBERT Academic Publishing, 204 с., 2011 г. ISBN: 978-3-8433-2204-1.

М2. Якимов, А.В.; **Клюев, А.В**. Шумы в полупроводниковых диодах и устройствах на их основе: Физические модели и анализ. LAP LAMBERT Academic Publishing,172 с., 2015 г. ISBN: 978-3-659-77784-4.

Основные статьи в рецензируемых журналах:

1. Беляков, А.В. Влияние фликкерного шума тока утечки на флуктуации интенсивности излучения лазеров на квантовых ямах / А.В. Беляков, **А.В. Клюев**, А.В. Якимов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика. – 2005. – Выпуск 1 (3). – С. 3-12.
2. Клюев, А.В. Проявление 1/F шума тока утечки в наноразмерных светоизлучающих структурах / А.В. Беляков, **А.В. Клюев**, А.В. Якимов // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2008. – Т. 51. – № 2. – С.149-161.
3. Клюев, А.В. Модификация соотношения А. Ван дер Зила для естественных шумов диодов с коэффициентом неидеальности ВАХ, превышающем единицу / **А.В. Клюев**, Е.И. Шмелев, А.В. Якимов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2009. – № 4. – С.53-56. http://www.vestnik.unn.ru/ru/nomera?anum=2642
4. Шмелев, Е.И. Мобильная установка для исследования низкочастотных шумов / Е.И. Шмелев, **А.В. Клюев**, А.В. Якимов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2009. – № 5. – С.81-85. http://www.vestnik.unn.ru/ru/nomera?anum=2719
5. Клюев, А.В. Источники фликкерного шума в дельта–легированных кремнием диодах Шоттки / **А.В. Клюев**, Е.И. Шмелев, А.В. Якимов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2010. – № 5(1). – С. 57-60. http://www.vestnik.unn.ru/ru/nomera?anum=3237
6. Клюев, А.В. Безынерционное детектирование случайного процесса с учетом обратной связи с использованием диода Шоттки с δ-легированием / **А.В. Клюев** // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2011. – №3. – С. 20-23.
7. Клюев, А.В. Статистические характеристики выходного процесса при безинерционном детектировании с использованием диода Шоттки с δ-легированием / **А.В. Клюев** // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 5(3). – С. 204-207. http://www.vestnik.unn.ru/ru/nomera?anum=4502
8. Klyuev, A.V. Modification of Van der Ziel relation for spectrum of noise in p–n junction / **A.V. Klyuev**, A.V. Yakimov, E.I. Shmelev // Fluctuation and Noise Letters. – 2012. – Vol. 11. – №2. – 1250015 (11 pages). DOI: 10.1142/S0219477512500150.
9. Клюев, А.В. Инерционное детектирование шума с использованием диода

Шоттки с δ-легированием/ **А.В. Клюев** // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2012. – №. 3. – С. 13-16.
10. Рыжкин, И.А. Об устойчивости кулоновской фазы в спиновом льде при конечной температуре / И.А. Рыжкин, **А.В. Клюев**, М.И. Рыжкин, И.В. Цыбулин // Письма в ЖЭТФ. – 2012. – Т. 95. – Вып. 6. – С. 330-335.
11. Shmelev, E.I. Complexes of spatially multistable defects as the source of 1/f noise in GaAs devices / E.I. Shmelev, **A.V. Klyuev**, A.V. Yakimov // Fluctuation and Noise Letters. – 2013. – Vol.12. – №1. – 1350008 (13 pages). DOI: 10.1142/S0219477513500089.
12. Клюев, А.В. Детектирование случайного процесса с использованием диода Шоттки с δ-легированием /**А.В. Клюев** // Радиотехника и электроника. – 2013. – том 58. – № 2. – С. 199-206. DOI: 10.7868/S0033849413010063.
13. Klyuev, A.V. Cumulant analysis of detection of random process using a Schottky diode with δ-Doping / **A.V. Klyuev** // International Journal of Modern Physics B. – 2013. – Vol. 27. – № 13. – 1350049 (12 pages). DOI: 10.1142/S0217979213500495.
14. Клюев, А.В. К вопросу о физических механизмах генерации фликкерного шума в Ti-Au/GaAs диодах Шоттки / **Ал.В. Клюев**, М.Р. Киселёв, Ан.В. Клюев // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2014. – № 1(2). – С. 158-162.
15. Клюев, А.В. Обобщенная диэлектрическая проницаемость льда / **А.В. Клюев**, И.А. Рыжкин, М.И. Рыжкин // Письма в ЖЭТФ. – 2014. – Т. 100. – Вып. 9. – С. 683-687. DOI: 10.7868/S0370274X14210139.
16. Клюев, А.В. Описание спектра естественных шумов полупроводниковых диодов на основе модифицированного соотношения Ван дер Зила / **А.В. Клюев**, Е.И. Шмелев, А.В. Якимов // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2014. – Том 57. – №12. – С. 995-1004.
17. Klyuev, A.V. 1/f noise in GaAs nanoscale light-emitting structures / **A.V. Klyuev**, A.V. Yakimov // Physica B. – 2014. – Vol. 440. – p. 145-151. http://dx.doi.org/10.1016/j.physb.2014.01.021.
18. Klyuev, A.V. Physical origins of 1/f noise in Si delta-doped Schottky diodes / **A.V. Klyuev**, E. I. Shmelev, A.V. Yakimov // Fluctuation and Noise Letters. – 2014. –Vol. 13. – № 1. – 1450003 (16 pages). DOI: 10.1142/S0219477514500035.
19. Klyuev, A.V. 1/f noise in Ti-Au/n-type GaAs Schottky barrier diodes / **A.V. Klyuev**, A.V. Yakimov, I.S. Zhukova // Fluctuation and Noise Letters. – 2015. – Vol. 14. – № 3. – 1550029 (12 pages). DOI: 10.1142/S0219477515500297.
20. Klyuev, A.V. Investigation of 1/f noise and superimposed RTS noise in Ti-Au/n-type GaAs Schottky barrier diodes / **A.V. Klyuev**, A.V. Yakimov // Fluctuation and Noise Letters. – 2015. – Vol. 14. – № 4. – 1550041 (11pages). DOI: 10.1142/S0219477515500418.
21. Рыжкин, М.И. Жидкое состояние системы водородных связей льда / М.И. Рыжкин, **А.В. Клюев**, В.В. Синицын, И.А. Рыжкин // Письма в ЖЭТФ. – 2016. – Т. 104. – Вып. 4. – С. 248-253. DOI:

10.7868/S0370274X16160074.
22. Klyuev, A.V. 1/F noise in the mixer based on Schottky diode / **A.V. Klyuev**, A.V. Yakimov, I.S. Zhukova, M.I. Ryzhkin, A.V. Klyuev // Fluctuation and Noise Letters. – 2017. – Vol. 16. – № 1. – 1750001 (12 pages). DOI: 10.1142/S0219477517500018.
23. Belyakov, A.V. 1/F noise in optical output and non-Gaussianity in voltage noise of GaAs nanoscale light-emitting structures / A.V. Belyakov, **A.V. Klyuev**, A.V. Yakimov // Fluctuation and Noise Letters. – 2017. – Vol. 16. – № 3. – 1750030 (14 pages). DOI: 10.1142/S0219477517500304.
24. Klyuev, A.V. Statistics of fluctuations of magnetic monopole concentration in spin ice / **A.V. Klyuev**, M.I. Ryzhkin, A.V. Yakimov // Fluctuation and Noise Letters. – 2017. – Vol. 16. – № 4. – 1750035 (8 pages). DOI: 10.1142/S0219477517500353.
25. Рыжкин, И.А. Модель квазижидкого поверхностного слоя льда / И.А. Рыжкин, М.И. Рыжкин, В.В. Синицын, **А.В. Клюев** // Письма в ЖЭТФ. – 2017. – Т. 106. – Вып. 11. – С. 724-728. DOI: 10.7868/S0370274X17230138.
26. Рыжкин, М.И. Экранирование электрического поля в воде / М.И. Рыжкин, И.А. Рыжкин, **А.В. Клюев** // Письма в ЖЭТФ – 2019. – Т. 110. – Вып. 2. – С. 112-117. DOI: 10.1134/S0370274X1914008X.
27. Yakimov, A.V. Measurement of the activation energies of oxygen ion diffusion in yttria stabilized zirconia by flicker noise spectroscopy / A.V. Yakimov, D.O. Filatov, O.N. Gorshkov, D.A. Antonov, D.A. Liskin, I.N. Antonov, A.V. Belyakov, **A.V. Klyuev**, A. Carollo and B. Spagnolo // Appl. Phys. Lett. – 2019. – 114. - 253506. DOI: 10.1063/1.5098066.
28. Klyuev, A.V. Memory effect and generation-recombination noise of magnetic monopoles in spin ice / **A.V. Klyuev**, M.I. Ryzhkin, A.V. Yakimov, B. Spagnolo // Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment – 2019, 094005. https://doi.org/10.1088/1742-5468/ab3789.
29. Якимов, А.В. Природа вносимого фазового 1/f шума в автогенераторах диапазона СВЧ / А.В. Якимов, **А.В. Клюев**, М.А. Кревский // Радиотехника и электроника. – 2020. – Т. 65. – № 1. – С. 90 – 95. DOI: 10.31857/S0033849420010076.
30. Yakimov, A.V. Influence of oxygen ion elementary diffusion jumps on the electron current through the conductive filament in yttria stabilized zirconia nanometer-sized memristor/ A. V. Yakimov, D.O. Filatov, O.N. Gorshkov, **A.V. Klyuev**, N.I. Shtraub, V.S. Kochergin and B. Spagnolo // Chaos, Solitons & Fractals. – 2021. – Vol. 148. – 111014. https://doi.org/10.1016/j.chaos.2021.111014.

Оглавление диссертации

Введение

1. Физические модели фликкерного шума

1.1 Основные модели фликкерного шума. 1.2 Вольтамперная характеристика полупроводникового диода. 1.3 Источники фликкерного шума в полупроводниковом диоде. 1.4 Выводы по первой главе.

2. Низкочастотные шумы в квантово-размерных светоизлучающих структурах

2.1 Структуры исследованных светодиодов и лазеров. 2.2 Излучательная и безызлучательная рекомбинация в светодиодах и лазерах с квантовыми ямами и точками. 2.3 Отклонения от идеальных вольтамперных характеристик. 2.4 Шумы в светодиодах и лазерах с квантовыми ямами и точками. 2.5 Корреляция между флуктуациями напряжения и флуктуациями интенсивности оптического излучения лазеров с квантовыми ямами. 2.6 Выводы по второй главе.

3. Низкочастотные шумы в полупроводниковых диодах с барьером Шоттки

3.1 Конструкция диодов. 3.2 Механизмы токопрохождения в барьерах Шоттки. 3.3. Влияние сил изображения на вольтамперные характеристики диодов Шоттки. 3.4 Туннельное прохождение сквозь барьер Шоттки. Термополевая эмиссия. 3.5 Вольтамперные характеристики диодов. 3.6 Взрывной и 1/f шум в диодах Шоттки. 3.7 Анализ спектра НЧ шумов диодов с барьером Шоттки. 3.8 Токовые зависимости спектров шумового напряжения диодов с барьером Шоттки. 3.9 Выводы по третьей главе

4. Низкочастотные шумы в смесителях на диодах с барьером Шоттки

4.1 Структура диодов. 4.2 Декомпозиция вольтамперных характеристик диодов с барьером Шоттки. 4.3 Анализ спектра низкочастотных шумов диодов с барьером Шоттки. 4.4 Флуктуации коэффициента передачи смесителя на диоде Шоттки. 4.5 Оценка пороговой величины амплитуды принимаемого сигнала. 4.6 Прохождение гармонического сигнала через нестабильный смеситель на диоде Шоттки. 4.7 Выводы по четвёртой главе.

5. Преобразование низкочастотных шумов нелинейными системами

5.1 Низкочастотные шумы в диодах Шоттки с δ-легированием. 5.2 Безынерционное детектирование. 5.3 Инерционное детектирование. 5.4 Выводы по пятой главе.

6. Флуктуационные процессы в физических системах, подчиняющихся правилам льда

6.1 Водяной лёд. 6.2 Спиновый лёд. 6.3 Выводы по седьмой главе.

Заключение

Приложение 1. Основные характеристики приборов установки для измерения низкочастотных шумов светоизлучающих приборов

Приложение 2. Основные характеристики устройств, входящих в состав установки для измерения 1/f шума диодов с барьером Шоттки

Приложение 3. Сокращения и обозначения

Список литературы