

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **КЛЮЕВА Алексея Викторовича** “*Флуктуационные эффекты в полупроводниковых структурах с потенциальными барьерами и физических системах с правилами льда*”, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика

Диссертационная работа А.В. Клюева посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию флуктуационных эффектов в полупроводниковых структурах и спиновых системах и относится к важному разделу специальности «Радиофизика».

Актуальность выбранной темы исследования обусловлена тем, что в связи с тенденцией к миниатюризации устройств микро- и наноэлектроники роль флуктуаций становится всё более существенной. Флуктуации (и шумы) становятся ограничивающим фактором минимального размера элемента и величины питающего напряжения, а также плотности записи информации в запоминающих устройствах. Представленная диссертация посвящена развитию радиофизических методов экспериментального и теоретического исследования природы источников шумов и флуктуаций параметров в различных наноструктурах, в спиновом льду, а также в устройствах на их основе, так что вопросы, связанные с описанием, измерением и уменьшением флуктуаций, рассмотренные в диссертации являются актуальными. При этом, как известно, шумы полупроводниковых приборов изучались и ранее другими исследователями, исследование шумов спинового льда является существенно новой задачей, что подтверждается публикацией результатов, выносимых на защиту, в ведущих научных журналах (Письма в ЖЭТФ; Радиотехника и электроника; Известия ВУЗов. Радиофизика; Appl. Phys. Lett.; Journal of Statistical Mechanics; Chaos, Solitons & Fractals; Fluctuation and Noise Letters и др.).

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации являются достаточно обоснованными. Адекватность каждой физической модели источников шумов и флуктуаций проверена экспериментально. Сделаны оценки численных значений статистических характеристик источников по результатам измерений.

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

Научная новизна диссертации состоит в следующем:

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 р-п 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. 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.

Сама диссертация (280 страниц текста, включая 107 рисунков и 9 таблиц) состоит из введения, шести глав, трёх приложений на 7 стр., заключения и библиографического списка из 390 наименований.

Во **Введении** приводится обзор литературы и степень разработанности темы исследования, обосновывается актуальность работы и формулируются поставленные цель и задачи работы, указываются научная новизна и выносимые на защиту положения, приводятся сведения о теоретической и практической значимости работы, о методологии и методах исследования, достоверности, апробации и публикации результатов, личном вкладе автора, а также приводится краткое содержание работы.

Первая глава посвящена модификации моделей, учитывающих особенности рассматриваемых приборов, обусловленные спецификой механизмов токопереноса, определяющих вольтамперную характеристику диода. В качестве источников фликкерного шума рассматриваются бистабильные точечные дефекты, приводящие к флюктуациям электрофизических параметров полупроводникового материала. Бистабильные дефекты, находящиеся в различных технологических областях диода (база, область пространственного заряда, и т.д.), приводят к появлению фликкерных флюктуаций той или иной компоненты тока диода. В зависимости от того, какая компонента подвержена наиболее сильным флюктуациям, и от того, какая компонента наиболее сильно проявляется в вольтамперной характеристике (ВАХ) диода, возникают различные эффекты в токовой зависимости спектра фликкерного шумового напряжения, выделяющегося на диоде.

Во **второй главе** проводится детальный анализ шумов прототипов светодиодов на $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ квантовых ямах и $InAs$ квантовых точках; светодиодов только на $InAs$ квантовых точках; лазеров на $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ квантовых ямах.

Проводится анализ вольтамперных характеристик (ВАХ) и спектров низкочастотных (НЧ) шумов исследуемых светодиодов и лазеров. Во всех исследованных приборах обнаружен ток утечки. 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.

Дополнительно приводятся результаты совместного анализа шумов напряжения лазерных диодов, и флюктуаций интенсивности их оптического излучения. Подтверждено, что между шумами напряжения и флюктуациями интенсивности излучения лазеров существует корреляция.

Исследованные особенности шумовых процессов, проявляющихся в образцах, дают производителю возможность минимизировать шумы в новых поколениях приборов.

В третьей главе исследуются НЧ 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 четвёртой главе исследуются НЧ шумы в смесителях на диоде с барьером Шоттки. 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.

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 спектров низкочастотного шума низкобарьерных диодов Шоттки. 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.

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. 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, равный отношению нагрузочного сопротивления к дифференциальному сопротивлению диода при нулевом напряжении.

Проанализированы найденные выходные статистические характеристики при инерционном детектировании стационарного шума с использованием диода Шоттки с б-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.

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

Последняя, шестая глава посвящена исследованию флуктуационных процессов в физических системах, подчиняющихся правилам льда.

Приведён обзор современных взглядов на водяной лёд и представлены результаты оригинальных исследований в этой области. Водяной лёд рассматривается как база для анализа спинового льда. Спиновый лёд имеет широкие перспективы для теоретических и практических исследований. Большой интерес к спиновому льду 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.

На практике обнаружить магнитные монополи в спиновом льду крайне сложно. Магнитный заряд монополя весьма мал, концентрация монополей в образце должна быть очень низкой, иначе монополи противоположных знаков компенсируют друг друга. Присутствие магнитных монополей приходится регистрировать по косвенным признакам.

Предложен новый способ обнаружения магнитных монополей в спиновом льду. Впервые исследована не стационарная концентрация магнитных монополей, а процессы их генерации и рекомбинации, имеющие флуктуационный характер. Выведено уравнение типа Ланжевена для анализа этих флуктуаций, позволившее определить и проанализировать их спектр. Получено выражение для спектра относительных флуктуаций числа пар квазичастиц. Показано, что флуктуации концентрации магнитных монополей проявляются во флуктуациях физически измеримой величины – магнитного момента.

Предложен метод определения спектра флуктуаций числа пар магнитных монополей путём измерения флуктуаций магнитного момента спинового льда. Метод, предложенный соискателем, использован коллективом зарубежных авторов (со ссылками на работу соискателя), экспериментально подтверждивших

состоятельность метода и предсказанный спектр генерационно-рекомбинационного шума магнитных монополей. Кроме того, соискателем разработана обобщённая модель генерационно-рекомбинационного шума магнитных монополей, учитывающая возможность суперпозиции спектров с различными временами релаксации. В конце главы сделаны выводы о сходствах и различиях моделей обычновенного и спинового льда и об особенностях флюктуаций концентрации магнитных монополей в спиновом льду.

В заключении диссертации суммированы основные результаты и выводы по работе в целом.

Таким образом, диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, в котором содержится решение ряда актуальных задач по исследованию флюктуационных эффектов в полупроводниковых структурах с потенциальными барьерами, а также в твердотельных системах, подчиняющихся правилам льда. Разработаны теоретические положения, совокупность которых показывает, что флюктуации в различных твердотельных системах могут быть описаны в рамках единого подхода.

К сожалению, диссертация А.В. Клюева не свободна от недостатков. Основные замечания по соответствующим разделам работы состоят в следующем:

1. На стр.5 (3-й абзац сверху) соискатель не делает различий между фликкер-шумом, и $1/f$ -шумом. На стр.6 (3-й абзац сверху) эти различия уже обозначены сообразно классическим литературным источникам. К сожалению, автор не указывает на принципиальные особенности и различия фликкер-шума и $1/f$ -шума на очень низких частотах порядка единиц миллигерц и ниже.
2. В защищаемых положениях 2, 5, 6 (стр. 36 - 37) не обозначен диапазон низких частот, для которых справедливы те или иные утверждения. Например, непонятно, имеет ли место эффект "насыщения" и эффект "максимализации" шумов в миллигерцовом диапазоне частот.
3. В диссертации и в приложениях 1 и 2 не указаны следующие характеристики экспериментальных установок:
 - 3.1 Собственные шумы источника питания на 12 В (рис. П1.1);
 - 3.2. Собственные шумы источника питания на 1,2 В (рис. П2.2);
 - 3.3. Тип и собственные шумы нагрузочных резисторов R_b на рис. П1.1 и П2.2.

Шумовые характеристики указанных элементов существенны при интерпретации полученных результатов.

4. В диссертации и в приложениях 1 и 2 не указан уровень собственных шумов и количества "активных" разрядов АЦП. Подобные характеристики могут быть получены путем измерения динамического диапазона измерительного тракта при фиксированном коэффициенте усиления. Динамический диапазон важен

при измерении спектров фликкер-шума в широком диапазоне частот, порядка 4 декад (см., например, рис. 2.16, 3.11, 3.13 - 3.15, 4.12 - 4.15, 5.4, 5.5).

5. В диссертации в разделах 2 и 3 не проведены оценки верхней границы диапазона частот измерительных трактов, с учетом влияния переменной по величине нелинейной динамической емкости исследуемых диодов и паразитных входных емкостей предуслителей.

Отметим, что в целом, указанные замечания не ставят под сомнение качество самих проведенных исследований, их достоверность и обоснованность полученных результатов и сделанных из них выводов, новизну и значимость. Тем не менее, учитывая широту охвата исследованных вопросов и большой объем проделанной работы, эти замечания скорее можно считать пожеланиями. Они не снижают общей высокой оценки научного уровня проведенных исследований.

Таким образом, данная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям пп. 9–14 действующего «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (в редакции от 01.10.2018, с изменениями от 26.05.2020), предъявляемым к докторским диссертациям, а сам автор, Алексей Викторович Клюев, несомненно, заслуживает присуждения ему искомой учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 - Радиофизика. Содержание автореферата диссертации соответствует указанной специальности.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук (01.04.04 – Физическая электроника, в том числе квантовая), профессор,
профессор кафедры физической электроники и нанофизики физико-технического института Башкирского государственного университета

Бахтизин Рауф Загидович

Я согласен на обработку своих персональных данных

Почтовый адрес: 450076, РФ Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32А, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет» (ФГБОУ ВО Башкирский государственный университет (БашГУ)).
Телефоны: +7 (347) 229-96-47 (раб.); +7 (917) 410-98-71 (моб.). Факс: +7 (347) 273-65-74; E-mail: raouf@bsunet.ru

Дата

Подпись <u>P.З. Баймова</u>
Заверяю: ученый секретарь Ученого совета
Башкирского государственного университета
<u>С.Р. Баймова</u>
« 02 » <u>сентября</u> 2021 г.

