

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
Нижегородского государственного технического
университета им. Р.Е. Алексеева,
д.ф.-м.н., профессор



_____ Куркин А.А.

_____ 2021 г.

М.П.

ОТЗЫВ

**Ведущей организации на диссертацию Клюева Алексея Викторовича
«Флуктуационные эффекты в полупроводниковых структурах с потенциальными
барьерами и физических системах с правилами льда»,
представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук
по научной специальности 01.04.03 «Радиофизика»**

Диссертация А.В. Клюева посвящена исследованию флуктуационных эффектов в электронных твердотельных системах.

Флуктуации в полупроводниковых микро- и наносистемах, а также в системах, подчиняющихся правилам льда обсуждаются в последнее время в научной литературе достаточно активно. Это связано с тем, что флуктуации зачастую ограничивают функциональные возможности устройств нанoeлектроники, накладывая ограничения на их характеристики. При этом корректный учет флуктуаций тока утечки также важен и для работы приемников на основе сверхпроводниковых туннельных структур, а шумы двухуровневых систем в подложках и туннельных барьерах ограничивают времена когерентности сверхпроводниковых кубитов. Следует также отметить, что интерес к флуктуациям в спиновом льду стимулировали пионерские работы автора диссертации, в которых предсказан спектр генерационно-рекомбинационного шума магнитных монополей в спиновом льду, измеренный позднее другими исследователями. Поэтому актуальность вопросов, связанных с описанием, измерением и уменьшением шумов, рассмотренных в диссертации, не вызывает сомнений и в будущем будет только расти.

В этой связи автор ставит своей целью развитие единого подхода к анализу флуктуаций и флуктуационных эффектов в электронных твердотельных системах, который позволил бы сделать выбор адекватной физической модели первичных источников флуктуаций (шума), её экспериментальную проверку, предложить методику определения статистических характеристик этих источников по результатам измерений.

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.

Кратко охарактеризуем диссертацию по главам. В первой главе рассмотрены основные физические модели фликкерного шума: модель Дю Пре – Ван дер Зила, модель двухуровневых систем. Приводится описание вольтамперной характеристики (ВАХ) диода, формируемой различными компонентами, присутствующими в полном токе. Обсуждаются источники фликкерного шума в полупроводниковом диоде. Используется подход, согласно которому считается, что фликкерный шум является следствием перемещения точечных дефектов в материале. В качестве причин фликкерного шума рассматриваются бистабильные дефекты, приводящие к флуктуациям электрофизических параметров полупроводникового материала и, как следствие, к флуктуациям различных токовых компонент. В основе описания модифицированных эффектов насыщения шума,

эффекта А.К. Нарышкина и эффекта максимизации шума лежит информация о различных компонентах ВАХ диода и их количественном соотношении.

Во второй главе исследованы шумовые характеристики наноразмерных светоизлучающих приборов. Показано, что в лазерах и светодиодах на квантовых ямах и квантовых точках, причиной фликкерного шума является неоднородность протекания тока, обусловленная формированием квазиомических шунтов и возникновением областей с пониженной высотой барьера. Обнаружена корреляция между флуктуациями напряжения, выделяющегося на лазерном диоде с квантовыми ямами, и флуктуациями интенсивности его излучения, наблюдающаяся в спектральной области фликкерного шума, что указывает на общий источник этих флуктуаций. Это даёт возможность на основании исследования флуктуаций напряжения, выделяющегося на лазерном диоде, делать выводы об излучательных свойствах диода.

В третьей главе представлены результаты исследования диодов Шоттки. Проведено исследование вольтамперных характеристик, спектров электрических шумов и их зависимости от тока через образец. Предложена модель диода Шоттки, 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 диодов Шоттки. При анализе шумового напряжения в диодах Шоттки обнаружен взрывной шум в смеси с фликкерным шумом, функция плотности вероятности которого имеет гауссову форму. Исходная реализация шума разделена на две независимые компоненты, с целью исследования их отдельно друг от друга для установления источников флуктуаций каждой компоненты. Сделан вывод о том, что фликкерные шумы напряжения, наблюдающиеся в диодах Шоттки, обусловлены флуктуациями тока термополевой эмиссии и флуктуациями тока утечки.

В четвёртой главе показано, что для рассмотренного типа диодов Шоттки, 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. Рассмотрено прохождение гармонического колебания через смеситель, коэффициент передачи которого флуктуирует. Показано, что форма спектра сигнала на выходе смесителя искажается флуктуациями коэффициента передачи смесителя. Впервые аналитически решена задача о влиянии флуктуаций электрофизических параметров диодов с контактами металл-полупроводник на выходную форму спектра в смесителях на базе таких диодов, позволяющая определить выходную форму спектра сигнала на выходе смесителя, зная шумовые характеристики диода.

В пятой главе представлены результаты исследования низкобарьерных диодов Шоттки. 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), что может быть обусловлено флуктуациями эффективного числа атомов донорной примеси в δ – слое. Установлена обратно пропорциональная зависимость уровня спектральной плотности мощности дробового шума в диодах Шоттки и в диодах с р-п переходом от коэффициента неидеальности вольтамперной характеристики. 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 обратной связи, 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 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. Показано, что при относительно большой дисперсии входного шума имеет место переход в режим безынерционного детектирования.

В шестой главе проведён анализ флуктуаций концентрации магнитных дефектов, т.е. процессов рождения (генерации) и уничтожения (рекомбинации) пар магнитных дефектов (магнитных монополей). Впервые показано, что флуктуации можно описывать с помощью уравнения типа Ланжевена. Определён спектр шума генерации–рекомбинации магнитных монополей. Впервые предложен новый метод экспериментального обнаружения магнитных монополей в спиновом льду. На сегодняшний день это самый прямой из существующих методов обнаружения магнитных монополей в спиновом льду. Впервые показано, что флуктуации концентрации монополей проявляются во флуктуациях плотности магнитного момента, что подтверждено в эксперименте других авторов. Впервые разработана обобщённая модель генерационно-рекомбинационного шума магнитных монополей, в которой результирующий спектр формируется суперпозицией множества спектров генерационно-рекомбинационных процессов.

Автором получен целый ряд новых и значимых результатов, среди которых следует отметить следующие:

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.

Положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются в полной мере аргументированными и обоснованными и подтверждены экспериментально.

Их достоверность обеспечивается для экспериментальных результатов их повторяемостью, для теоретических выводов – подтверждается результатами экспериментов. Кроме того, полученные результаты подтверждают и развивают существующие научные концепции, касающиеся рассматриваемого в диссертации круга вопросов. Основная часть теоретических выводов подтверждена экспериментальными данными, полученными при участии диссертанта, и результатами экспериментальных исследований независимых учёных.

Новизна результатов, полученных в диссертации, заключается в том, что впервые доказано, что в лазерах и светодиодах с квантовыми ямами и квантовыми точками причиной фликкерного шума является неоднородность протекания тока. Впервые показано, что фликкерные шумы в диодах Шоттки, обусловлены флуктуациями тока термополевой эмиссии и флуктуациями тока утечки. Впервые аналитически решена задача преобразования случайных процессов детекторами на базе низкочастотных диодов Шоттки. Впервые создана теория шума магнитных монополей в спиновом льду. Впервые предложен новый метод экспериментального обнаружения магнитных монополей в спиновом льду.

Таким образом, полученные автором диссертации результаты являются значимыми для развития физики шумовых и стохастических процессов.

Результаты и выводы, приведенные в диссертации, могут быть использованы в низкочастотной шумовой спектроскопии для диагностики свойств наноструктурных светодиодов и лазеров. Информация о том, что селективное δ -легирование низкочастотных диодов Шоттки приводит к возникновению эффекта “насыщения” интенсивности фликкерных шумов, может быть использована для диагностики структуры и выявления возможных источников фликкерных шумов низкочастотных 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 r - p переходом с неидеальной вольтамперной характеристикой. Информация о выходном спектре детектирующей системы на базе диодов Шоттки с δ -легированием востребована для задач приёма излучения. Результаты, касающиеся связи шумовых характеристик диодов с формой спектра выходного сигнала смесителя, крайне важны в инженерных приложениях. Созданная теория генерационно-рекомбинационного шума магнитных монополей в спиновом льду, и основанный на ней новый метод обнаружения магнитных монополей в спиновом льду, использован коллективом зарубежных авторов (со ссылками на работу соискателя), экспериментально подтвердивших предсказанный спектр генерационно-рекомбинационного шума магнитных монополей.

Научная и практическая ценность диссертации, заключается в том, что ряд результатов, полученных соискателем, имеет фундаментальное значение в физике шумов. Ценность полученных результатов подтверждается присуждением ему в составе коллектива авторов премий Института Физики Твёрдого Тела Российской Академии Наук в 2018 и 2019 году по итогам конкурса научно-исследовательских работ в номинации

«Физика конденсированного состояния».

Также ценность научных работ соискателя подтверждается использованием полученных результатов при выполнении федеральных целевых программ и грантов.

Результаты диссертации достаточно полно отражены в 132 научных публикациях, из них 43 – статьи в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах, рекомендованных ВАК и входящих в международные базы цитирования WoS и Scopus. 17 работ (в том числе 9 статей) из 132 выполнены без соавторов. В диссертации ссылки на работы, выполненные в соавторстве, имеются.

По работе имеется замечание:

На стр. 79 во втором абзаце есть утверждение, что собственный шум напряжения измерительной установки составляет примерно 10^{-18} В²/Гц, однако не указано на какой частоте. Обычно в паспортных характеристиках усилителей указывается уровень шума на частоте 1кГц, и на этой частоте достичь такого низкого уровня шума напряжения при комнатной температуре чрезвычайно сложно. Ситуация проясняется только при анализе графиков спектров в диссертации, где видно что автор указал минимальное значение на частотах 10 кГц и выше, и данный уровень шума соответствует используемым малозумящим усилителям типа 5113 с паспортным уровнем шума 4нВ/√Гц и 5184 с паспортным уровнем шума 0.8нВ/√Гц. Приведённое замечание не снижает общей высокой оценки проведённых Клюевым А.В. теоретических и экспериментальных исследований.

Оценивая работу в целом, можно заключить, что диссертация Клюева А. В. «Флуктуационные эффекты в полупроводниковых структурах с потенциальными барьерами и физических системах с правилами льда» представляет собой законченное научное исследование, имеющее высокую научную и практическую ценность, научная новизна и достоверность результатов которого не вызывают сомнений.

Диссертация Клюева Алексея Викторовича «Флуктуационные эффекты в полупроводниковых структурах с потенциальными барьерами и физических системах с правилами льда» отвечает критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 01.04.03 «Радиофизика».

Диссертационная работа Клюева Алексея Викторовича обсуждена и одобрена на заседании семинара лаборатории сверхпроводниковой наноэлектроники НГТУ им. Р.Е. Алексева 27 сентября 2021 г.

Отзыв составили:



Кузьмин Леонид Сергеевич, д.ф.-м.н. (по специальности 01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики), главный научный сотрудник лаборатории сверхпроводниковой наноэлектроники



Гордеева Анна Валерьевна, PhD, руководитель лаборатории сверхпроводниковой наноэлектроники

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева"

Минина ул., 24, г. Нижний Новгород, 603950

<https://www.nntu.ru/>

(831)436-23-25

nntu@nntu.ru