ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Клюева Алексея Викторовича на тему **«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 (1.3.4.) – Радиофизика

Актуальность темы

Научно-технический прогресс сопровождается внедрением в экономику цифровых технологий, позволяющих оперировать громадным количеством данных. Для успешной реализации внедрения цифровой экономики необходимо во все большей степени использовать высокоскоростные цифровые телекоммуникации. Развитие цифровых технологий идет по пути повышения доступности, снижения массогабаритных показателей, быстродействия и функциональных возможностей, снижения и оптимизации энергопотребления. Поэтому требуется проектировать и создавать новое быстродействующее телекоммуникационное радиоэлектронное оборудование. Производство радиоэлектронного оборудования сопровождается решением проблемы создания элементной базы микро- и наноэлектроники и повышения ее качественных характеристик. Для совершенствования элементной базы необходимо искать и синтезировать новые материалы и структуры, развивать и отрабатывать технологию их изготовления, изучать физические процессы и явления в наноструктурах, развивать физику наносистем. Появление новых материалов и структур, уменьшение активных областей полупроводниковых приборов влечет за собой необходимость адаптации известных и разработки новых методов контроля их параметров и характеристик, уточнения физических моделей, лежащих в основе применяемых методов исследования. В частности, важными и перспективными приборами наноэлектроники

являются структуры, активной областью которых являются полупроводниковые гетероструктуры, содержащие квантовые ямы и квантовые точки. Для изучения свойств таких структур требуется использование новейших разработок в области измерительного и диагностического оборудования, а также совершенствование известных экспериментальных методик и математического аппарата для обработки и интерпретации результатов измерений. Для обеспечения комплексности исследования электрофизических свойств полупроводниковых структур целесообразно наряду с методиками, основанными на использовании электрических методов, дополнительно использовать спектроскопию низкочастотного шума.

Диссертационная работа Клюева Алексея Викторовича посвящена исследованию флуктуационных эффектов в полупроводниковых структурах и спиновых системах. В связи с вышеизложенным, тема диссертационной работы, несомненно, является актуальной и имеет важное научное и практическое значение. Выбранная тема соответствует наиболее актуальным направлениям исследований в физике шумов и флуктуаций. Подтверждением этому служит публикация результатов, выносимых на защиту, в ведущих рецензируемых журналах с высоким индексом цитирования и в трудах российских и международных конференций.

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научная новизна представленных в работе результатов заключается 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 *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 приема 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. Определен 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 обобщенная модель генерационно-рекомбинационного шума магнитных монополей, учитывающая наличие распределения времен релаксации. В этом случае результирующий спектр формируется суперпозицией множества спектров генерационно-рекомбинационных процессов.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность новых результатов работы, сформулированных научных положений и выводов подтверждается непротиворечивостью полученных результатов общепринятым положениям теории генерации электрического шума в проводящих материалах и структурах, использованием теоретических методов физики стохастических процессов, обеспечивается использованием известного математического аппарата физики полупроводников и подтверждается результатами исследований, полученными независимыми методами. Достоверность полученных результатов подтверждается также соответствием теоретических результатов данным, полученным в ходе экспериментальных исследований.

Положения, выносимые на защиту, результаты и выводы по работе сформулированы достаточно ясно и вполне обоснованны.

Полученные автором результаты отличаются оригинальностью и новизной. Предложенный в диссертации новый метод экспериментального обнаружения магнитных монополей в спиновом льду получил международное признание.

Значимость результатов для науки и практики

Данная работа посвящена изучению низкочастотных электрических 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 приема 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.

Оценка содержания

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, трех приложений и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи, научная новизна и выносимые на защиту положения, указана практическая значимость результатов работы, описана апробация работы, указан личный вклад автора.

В первой главе рассмотрены модели шумообразования в полупроводниковых диодах. В качестве источников флуктуаций

электрофизических параметров полупроводниковых диодов рассматриваются бистабильные точечные дефекты.

Во второй главе исследованы низкочастотные шумы светодиодов на квантовых ямах и квантовых точках; светодиодов на квантовых точках, лазеров на квантовых ямах, изготовленных на основе арсенида галлия и его твердых растворов. Сделан вывод о том, что неоднородность протекания тока, обусловленная формированием квазиомических шунтов и возникновением областей с пониженной высотой потенциального барьера, является причиной фликкерного шума в таких светодиодах и лазерах.

В третьей главе проведено исследование низкочастотных шумов диодов Шоттки, в ходе которого сделан вывод о том, что фликкерные шумы напряжения, наблюдающиеся в диодах, обусловлены флуктуациями тока термополевой эмиссии.

В четвертой главе исследованы низкочастотные шумы в смесителях на базе диодов Шоттки. Аналитически решена задача о влиянии флуктуаций электрофизических параметров диодов Шоттки на выходную форму спектра сигнала в смесителях на базе таких диодов.

В пятой главе исследованы шумы наноразмерных полупроводниковых диодов Шоттки с δ–легированием и преобразования шумов в детекторах на базе таких диодов. Выявлены 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 исследованы флуктуационные процессы в физических системах, подчиняющихся правилам льда. Предложен новый способ обнаружения магнитных монополей в спиновом льду. Проведен стохастический анализ шума генерации–рекомбинации магнитных монополей. Предсказано, что флуктуации концентрации магнитных монополей проявляются во флуктуациях магнитного момента. Разработанный в диссертации метод использован группой авторов,

подтвердивших в эксперименте предсказанный спектр шума магнитных монополей.

В заключении формулируются основные результаты работы.

Диссертационная работа представляет законченное научное исследование, имеющее значимые теоретические и практические результаты.

Соответствие автореферата основным идеям и выводам диссертации

Автореферат правильно отражает содержание диссертации и представляет краткое изложение всех основных результатов диссертационной работы. Расхождений между выводами в автореферате и диссертации нет.

Недостатки работы

К содержанию диссертации есть ряд замечаний:

1. Во второй главе говорится об анализе вольт-амперных характеристик (ВАХ) полупроводниковых барьерных структур с квантовыми ямами и точками, а в третьей главе – об исследовании ВАХ диодов с барьером Шоттки. Для надежной идентификации механизмов токопереноса следовало бы детально изучить температурную зависимость ВАХ.

2. В работе говорится про рекомбинационные процессы с участием дефектов, которые образуют глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника и на гетерограницах. Однако отсутствует оценка параметров этих дефектов (энергии активации, концентрации, сечения захвата), которые можно использовать для моделирования процессов генерации-рекомбинации.

3. В главе 4 говорится про изучение зависимости спектральной плотности мощности (СПМ) шума диода Шоттки от величины протекающего прямого тока. Не ясно, какую роль при этом играют дефекты с глубокими энергетическими уровнями и в чем основная причина флуктуации линейного сопротивления утечки.

4. Изучение температурной зависимости СПМ шума представленных структур позволило бы получить дополнительную информацию о наличии или отсутствии термоактивационных процессов генерации шума.

Однако высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку выполненной работы. Отмеченные замечания не снижают научной и практической значимости диссертационной работы, не затрагивают научных положений и не влияют на достоверность и значимость полученных результатов. Структура работы является последовательной, ее содержание изложено достаточно логично. Диссертационная работа оформлена в полном соответствии с требованиями ВАК. Объем и качество иллюстративного материала также не вызывает критических нареканий.

Личный вклад автора не вызывает сомнений, заключается в постановке задач и проведении экспериментов, разработке физических моделей, разработке основных методов и средств для проведения исследований. Автором внесен основной вклад в получение, анализ и обобщение теоретических и экспериментальных результатов.

Основные результаты диссертационной работы достаточно полно отражены в 132 научных публикациях, в том числе в двух монографиях и в 43 статьях в рецензируемых изданиях, включенных в список ведущих научных журналов и изданий, утвержденный ВАК РФ. Получен патент на изобретение. Результаты работы широко представлены на ряде научных конференций и совещаний.

Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы

Результаты, полученные в диссертации А.В. Клюева, способствуют развитию физики полупроводников, радиофизики, могут повысить уровень конструирования и моделирования полупроводниковых приборов для улучшения их технических и эксплуатационных характеристик.

Заключение. Диссертация А.В. Клюева удовлетворяет всем требованиям пп. 9–14 действующего «Положения о присуждении ученых

степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (в редакции от 01.10.2018, с изменениями от 26.05.2020), предъявляемых к докторским диссертациям, автор работы Клюев Алексей Викторович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 (1.3.4.) – Радиофизика.

Официальный оппонент:

Литвинов Владимир Георгиевич,
доктор физико-математических наук (специальность
01.04.10 (1.3.11.) – Физика полупроводников), доцент,
заведующий кафедрой «Микро- и наноэлектроника»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина»

Дата: 27 сентября 2021 года _____Литвинов Владимир Георгиевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина»
Почтовый адрес: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1
Раб. телефон: +7(4912)720366;
моб. телефон: +7 9206340628
электронная почта: litvinov.v.g@rsreu.ru
Согласен на обработку персональных данных.

Подпись руки Литвинова Владимира Георгиевича удостоверяю

Ученый секретарь Ученого совета ФГБОУ ВО «РГРТУ»,
к.т.н. Пржегорлинский Виктор Николаевич