

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.340.03 (Д 212.166.07), СОЗДАННОГО НА
БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 27.10.2021 г. № 25.

О присуждении Клюеву Алексею Викторовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Диссертация «Флуктуационные эффекты в полупроводниковых структурах с потенциальными барьерами и физических системах с правилами льда» по специальности 01.04.03 – радиофизика принята к защите 23 июня 2021 г., протокол № 16, диссертационным советом 24.2.340.03 (Д 212.166.07), созданным на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования российской федерации, 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, приказом Рособнадзора № 1990-1015/130 от 4 сентября 2007 г.

Соискатель, Клюев Алексей Викторович, 3 марта 1982 года рождения, в 2005 году окончил радиофизический факультет Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского.

Диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук «Источники низкочастотных шумов в квантово-размерных светоизлучающих структурах и диодах Шоттки с дельта–легированием» защитил в 2009 году в диссертационном совете, созданном на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный

исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

Соискатель работает доцентом кафедры статистической радиофизики и мобильных систем связи радиофизического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в научно-образовательном центре «Физика твердотельных наноструктур» ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный консультант – доктор физико-математических наук, профессор, Якимов Аркадий Викторович работает профессором кафедры статистической радиофизики и мобильных систем связи радиофизического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

Официальные оппоненты:

1. Бахтизин Рауф Загидович, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук (специальность 01.04.04 – Физическая электроника, в том числе квантовая), профессор, профессор кафедры физической электроники и нанофизики физико-технического института ФГБОУ ВО Башкирского государственного университета (БашГУ);
2. Литвинов Владимир Георгиевич, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук (специальность 01.04.10 – Физика полупроводников), доцент, заведующий кафедрой «Микро- и наноэлектроника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина»;
3. Постников Евгений Борисович, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук (специальность - 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), профессор кафедры

физики и технологий, заведующий отделом теоретической физики НИЦ физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Курский государственный университет»

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», НГТУ), г. Нижний Новгород, в своем положительном отзыве, подписанном доктором физико-математических наук (по специальности 01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики), главным научным сотрудником лаборатории сверхпроводниковой наноэлектроники Кузьминым Леонидом Сергеевичем и руководителем лаборатории сверхпроводниковой наноэлектроники, PhD, Гордеевой Анной Валерьевной, указала, что диссертация Клюева Алексея Викторовича удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор Клюев Алексей Викторович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Соискатель имеет 132 опубликованных работы по теме диссертации, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 43 работы. Основные результаты диссертации были представлены на международных и всероссийских конференциях. Личный вклад соискателя в опубликованные в соавторстве работы заключается в постановке задач, проведении экспериментов, в получении и анализе экспериментальных результатов, в работе с литературными источниками по теме исследований, а также в подготовке результатов к публикации.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

Монографии:

- M1. **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.
- M2. 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. 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.
2. 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.
 3. Рыжкин, И.А. Об устойчивости кулоновской фазы в спиновом льде при конечной температуре / И.А. Рыжкин, **А.В. Ключев**, М.И. Рыжкин, И.В. Цыбулин // Письма в ЖЭТФ. – 2012. – Т. 95. – Вып. 6. – С. 330-335.
 4. 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.
 5. Ключев, А.В. Детектирование случайного процесса с использованием диода Шоттки с δ -легированием / **А.В. Ключев** // Радиотехника и электроника. – 2013. – том 58. – № 2. – С. 199-206. DOI: 10.7868/S0033849413010063.
 6. 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.
 7. Ключев, А.В. Обобщенная диэлектрическая проницаемость льда / **А.В. Ключев**, И.А. Рыжкин, М.И. Рыжкин // Письма в ЖЭТФ. – 2014. – Т. 100. – Вып. 9. – С. 683-687. DOI: 10.7868/S0370274X14210139.
 8. Ключев, А.В. Описание спектра естественных шумов полупроводниковых диодов на основе модифицированного соотношения Ван дер Зила / **А.В. Ключев**, Е.И. Шмелев, А.В. Якимов // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2014. – Том 57. – №12. – С. 995-1004.
 9. 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>.
 10. 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.
 11. 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.
 12. 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.
 13. Рыжкин, М.И. Жидкое состояние системы водородных связей льда / М.И. Рыжкин, **А.В. Ключев**, В.В. Сеницын, И.А. Рыжкин // Письма в ЖЭТФ. – 2016. – Т. 104. – Вып. 4. – С. 248-253. DOI: 10.7868/S0370274X16160074.
 14. 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.
 15. 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.

16. 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.
17. Рыжкин, И.А. Модель квазижидкого поверхностного слоя льда / И.А. Рыжкин, М.И. Рыжкин, В.В. Сеницын, **А.В. Ключев** // Письма в ЖЭТФ. – 2017. – Т. 106. – Вып. 11. – С. 724-728. DOI: 10.7868/S0370274X17230138.
18. Рыжкин, М.И. Экранирование электрического поля в воде / М.И. Рыжкин, И.А. Рыжкин, **А.В. Ключев** // Письма в ЖЭТФ – 2019. – Т. 110. – Вып. 2. – С. 112-117. DOI: 10.1134/S0370274X1914008X.
19. 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.
20. 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>.

В диссертации отсутствуют достоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

На диссертацию и автореферат поступило 9 отзывов от:

1. Ларцов Сергей Викторович, доктор технических наук (05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства радионавигации, радиолокации и телевидения), профессор, Главный инженер проекта Бюро ГИПов Нижегородского филиала ООО "Газпром проектирование", лауреат Премии Совета Министров СССР за работу в области радиоэлектроники;

2. Лебедев Игорь Александрович, доктор физико-математических наук (специальность: 01.04.23 - Физика высоких энергий), заведующий лабораторией ядерной физики и радиационной экологии, Физико-технический институт Министерства образования и науки Республики Казахстан;

3. Молотков Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук (01.04.07 – Физика конденсированного состояния), главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук (ИФТТ РАН);

4. Радостин Андрей Викторович, доктор физико-математических наук (специальность: 01.04.06 – Акустика), старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный

исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации;

5. Рыжкин Иван Александрович, кандидат физико-математических наук (01.04.02 - теоретическая физика), старший научный сотрудник Лаборатории Квантовых Кристаллов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН;

6. Сергеев Вячеслав Андреевич, доктор технических наук (специальность: 05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах), профессор, директор Ульяновского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук;

7. Силаев Андрей Михайлович, доктор физико-математических наук (специальность: 01.04.03 – Радиофизика), профессор, заведующий кафедрой математической экономики Нижегородского филиала Национального исследовательского университета “Высшая школа экономики”;

8. Титаренко Алексей Александрович, доктор технических наук (специальность: 05.12.07 - Антенны, СВЧ устройства и их технологии), доцент, главный конструктор Федерального государственного унитарного предприятия "Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики" (РФЯЦ-ВНИИЭФ) по микроэлектронике;

9. Щитов Аркадий Максимович, доктор технических наук (специальности: 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии, 05.11.08 – Радиоизмерительные приборы), главный научный сотрудник, заместитель начальника отдела Нижегородского филиала акционерного общества “Научно-производственная фирма “Техноякс” (НФ АО "НПФ "Техноякс"), старший научный сотрудник.

Все отзывы положительные. В отзывах отмечается актуальность темы исследования, новизна полученных результатов и их значимость для науки и практики.

В отзывах на диссертацию и автореферат содержатся следующие замечания:

– **Замечание из отзыва ведущей организации:**

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 малошумящим усилителям типа 5113 с паспортным уровнем шума $4\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ и 5184 с паспортным уровнем шума $0.8\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Приведённое замечание не снижает общей высокой оценки проведённых Ключевым А.В. теоретических и экспериментальных исследований.

– **Замечания и недостатки из отзыва официального оппонента Бахтизина Рауфа Загидовича:**

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 предусилителей.

– **Замечания из отзыва официального оппонента Литвинова Владимира Георгиевича:**

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.

– **Замечания из отзыва официального оппонента Постникова Евгения Борисовича:**

1. Хотелось обратить внимание автора на упущенный им из вида статистический подход к выявлению происхождения фликкерного шума на основе статистики обобщенных линейных процессов, приводящих к распределению Твиди и степенной зависимости между моментами измеряемой флуктуирующей величины [см., например, Kendal, W. S., & Jørgensen, B. Tweedie convergence: A mathematical basis for Taylor's power law, 1/f noise, and multifractality. *Phys. Rev. E*, 84 (2011), 066120].

2. Вызывают вопросы принципы разложения на компоненты вольт-амперных и спектральных характеристик, представленных на ряде графиков, в частности, рис. 2.9, 2.10, где сложная нелинейная кривая проведена практически только по двум экспериментальным точкам. Следует ли это понимать как использование функциональной формы, найденной для случаев с большим количеством данных (как, например, не вызывающие вопросов рис. 2.5 и 2.6)? В этом случае стоило бы подробнее остановиться на методике практического пересчета соответственных состояний.

3. На рис. 2.18 и 2.20, построенных в полулогарифмическом масштабе, можно отметить характерный изгиб функции взаимной когерентности при высоких частотах; возможно, следовало бы построить дополнительный график в двойных логарифмических координатах для проверки того, не переходит ли зависимость в высокочастотной области к степенной (дробно-степенной), что было бы интересно с точки зрения теории обобщенных фликкерных шумов.

4. В обзорной части шестой главы недостаточное внимание уделено работам последних десятилетий, относящихся к современному состоянию теории структур, как водяного льда, так и неупорядоченных структур в конденсированных средах с правилами льда, см., например, обзоры [Bartels-Rausch T. et al. Ice structures, patterns, and processes: A view across the icelands. *Rev. Mod. Phys.*, 84 (2012) 885; Ortiz-Ambriz A. et al. Ice rule and emergent frustration in particle ice and beyond. *Rev. Mod. Phys.*, 91 (2019) 041003].

– **Замечания из отзывов на автореферат:**

В отзыве Сергея Викторовича Ларцова содержится замечание:

В этом смысле вызывает сожаление, что в автореферате только дается название разработанного Метода определения спектра флуктуаций числа пар магнитных монополий путём измерения флуктуаций магнитного момента спинового льда и утверждается о его успешном использовании зарубежными исследователями.

Замечание не снижает благоприятного впечатления о диссертационном исследовании А. В. Ключева.

В отзыве Сергеева Вячеслава Андреевича содержатся замечания:

1. При рассмотрении модели подвижных бистабильных дефектов в квантово-размерных светодиодах с квантовыми точками и лазерах с квантовыми ямами не указан возможный механизм, определяющий широкий набор постоянных времени случайного телеграфного процесса и фликкерную составляющую шума исследуемых объектов в диапазоне частот от 1 до 10^4 Гц. Не является ли это специфической особенностью исследуемых объектов?
2. В автореферате на приведены оценки погрешностей измерения спектральной плотности мощности шумового напряжения исследуемых приборов в разных частотных диапазонах.

Однако, в отзыве отмечается, что указанные замечания не затрагивают основных положений, выносимых на защиту, и не снижают высокого научного уровня работы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается значительным опытом выполнения ими научно-исследовательских работ по тематике диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Развита и апробирована теоретическая модель, заключающаяся в создании адекватной физической модели источников шумов и флуктуаций, её экспериментальной проверке, с последующей верификацией и оценкой статистических характеристик источников по результатам измерений, позволяющий 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 низкobarьерных 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. На основе теоретического анализа преобразования случайного процесса детектором с низкobarьерным диодом типа селективно легированной микроструктуры металл-полупроводник объяснена зависимость спектральных характеристик процесса на выходе детектора от режима его работы.

4. Теоретически и экспериментально 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. Теоретически количественно оценено влияние флуктуаций электрофизических параметров диода с контактом металл-полупроводник смесителя на выходную форму спектра сигнала, что важно для практических приложений.

6. Предложены теория генерационно-рекомбинационного шума магнитных монополей в спиновом льду и метод обнаружения монополей. Рассчитана спектральная плотность мощности шума генерации-рекомбинации магнитных монополей. Показано, что флуктуации концентрации монополей связаны с флуктуациями плотности магнитного момента. Разработанная соискателем теория, подтверждена экспериментально другими авторами.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

1. Показано, что применение методов кумулянтного анализа к рассмотрению преобразования случайных процессов детекторами на основе селективно легированных микроструктур, позволяет предсказать и объяснить особенности спектра процесса на выходе детектирующей системы в безынерционном и инерционном режимах.

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

3. Созданная теория генерационно-рекомбинационного шума магнитных монополей в спиновом льду позволила предложить метод обнаружения таких монополей.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

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.

2. Установленная связь коэффициента неидеальности вольтамперной характеристики со спектральной плотностью мощности дробового шума позволяет вычислять спектральную плотность мощности дробового шума в диодах Шоттки и в диодах с *p-n* переходом с неидеальной вольтамперной характеристикой.

3. Полученные аналитические результаты по влиянию флуктуаций электрофизических параметров диодов с контактами металл–полупроводник на спектр выходного сигнала смесителя с таким диодом позволяют находить выходную форму спектра смесителя.

Оценка достоверности полученных результатов исследования выявила, что достоверность экспериментальных результатов обеспечивается их повторяемостью, а теоретических выводов и обобщений – результатами экспериментов. Полученные результаты не противоречат результатам, полученным другими исследователями.

Личный вклад соискателя состоит в том, что 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.

В ходе защиты диссертации членом совета (по специальности: 01.04.06 (1.3.7.) – акустика) д.ф.-м.н. профессором А.А. Мальцевым были высказаны следующие критические замечания: методы, применяемые для анализа флуктуационных эффектов в полупроводниковых структурах имеют ограниченное практическое значение для современной микроэлектроники и радиоэлектронных систем; оценка новизны результатов; применение метода Ван дер Поля к анализу флуктуаций в конкретных системах требует дополнительного физического обоснования; для описания изменений количества дефектов используется модель без учёта взаимодействия между магнитными дефектами.

Соискатель Клюев А.В. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, не согласился ни с одним из замечаний д.ф.-м.н. профессора А.А. Мальцева и привел собственную аргументацию: применение апробированных методов отвечает требованиям обоснованности и достоверности полученных результатов и имеет физическое обоснование; перечислена новизна результатов по главам; метод Ван дер Поля вообще не использовался в диссертации, в диссертации рассмотрена модель Ван дер Зила; магнитные дефекты (магнитные монополи) – это удобный язык описания возбужденных состояний спинового льда, вместо описания спинов, которых очень много и которые сильно взаимодействуют, можно описывать возбужденные состояния только небольшим числом магнитных монополей, при этом монополи можно считать невзаимодействующими, что значительно упрощает теоретическое исследование – это типичный для физики конденсированного состояния метод квазичастиц, используемый при описании различных сильно коррелированных систем.

На заседании 27.10.2021 г. диссертационный совет принял решение за разработку теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, присудить Клеюеву А.В. ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 7 докторов наук по специальности 01.04.03 – радиофизика, участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 15, против – 1, недействительных бюллетеней – 1.

Председатель
диссертационного совета



Гурбатов Сергей Николаевич

И.о. учёного секретаря
диссертационного совета

Канаков Олег Игоревич

27.10.2021