

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Клюева Алексея Викторовича на тему «Флуктуационные эффекты в полупроводниковых структурах с потенциальными барьерами и физических системах с правилами льда» представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальному сти 1.3.4 (01.04.03) – Радиофизика

Диссертационная работа А.В. Клюева относится к классическому направлению радиофизики, посвященному изучению шумов и флуктуаций, обращаясь к современному кругу вопросов данного раздела физики, посвященному исследованиям флуктуационных эффектов в полупроводниковых структурах и спиновых системах.

Если аналогичные задачи для частных случаев полупроводниковых структур и спиновых систем известны и представлены в литературе, то разработка общего подхода к анализу шумов и флуктуаций в таких структурах является существенно новой и актуальной задачей.

Кроме того, следует особо подчеркнуть, что развитая общая теория спектральной плотности шума магнитного потока от монопольных генерационно-рекомбинационных флуктуаций выступила в качестве предсказания весьма нетривиальных физических эффектов и мотивировала их активный поиск в эксперименте, в настоящее время увенчавшийся положительным результатом, что следует рассматривать как заметное научное достижение, см. недавнюю работу [Dusad R. et al. Magnetic monopole noise. Nature, 571 (2019) 234], авторы которой подчеркивают данный факт.

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

Во **введении** приводится мотивация актуальности задачи, стоявшей перед данным исследованием, обоснованная кратким обзором основных классических и современных подходов к задачам исследования шумов, а также представляющими интерес для современных объектов исследования методами, развитыми в радиофизике. Обсуждается степень разработанности темы исследования, на основе обоснованной актуальности работы формулируются её цель и задачи, указываются научная новизна и выносимые на защиту положения, приводятся сведения о теоретической и практической значимости, о методологии и методах исследования, достоверности, апробации и публикации результатов, личном вкладе автора, а также анонсируется краткое содержание в распределении по главам.

В первой главе приводится краткий, но содержательный обзор основных моделей фликкерного шума (причем следует особо отметить ясность изложения, выделяющего наиболее важные физические и математические предпосылки, иллюстрированные наглядными графиками и схемами), детальной физической картины процессов, отражающихся в вольтамперной характеристике реального диода, в том числе в конкретной связи с основной темой данной диссертационной работы – флюктуационных предпосылок специфических шумовых эффектов. В заключительной части главы указываются необходимые модификации рассмотренных механизмов, о которых свидетельствуют работы автора.

Материал достаточно объемной **второй главы** посвящен анализу вольтамперных и спектральных характеристик диодов и лазеров, построенных на полупроводниковых гетероструктурах. В качестве наиболее существенного результата, представленного в данной главе, можно выделить разложение полученных данных на компоненты, соответствующие линейным и нелинейным утечкам, комбинация которых с высокой точностью воспроизводит экспериментальные данные. Помимо этого, для данного разложения приведена мотивация, обсуждающая соответствующие физические механизмы, на основе чего сделан вывод о том, что неоднородность протекания тока, обусловленная формированием квазиомических шунтов и возникновением областей с пониженной высотой барьера, является причиной фликкерного шума в таких светодиодах и лазерах.

В заключительной части главы проводится анализ корреляции между флюктуациями напряжения и флюктуациями интенсивности оптического излучения лазеров с квантовыми ямами на основе функции взаимной когерентности для образцов, что привело к подтверждению существенной корреляции шумов оптического и электрического каналов.

В третьей главе приведены результаты исследований вольтамперных характеристик и низкочастотных шумов диодов Шоттки, которые позволили сделать вывод о том, что термополевая эмиссия электронов сквозь вершину барьера на границе металл-полупроводник даёт вклад в вольтамперную характеристику диода. Показано, что фликкерные шумы напряжения, наблюдающиеся в диодах, обусловлены флюктуациями тока термополевой эмиссии. Наибольший интерес вызывает разработка методики разделения шумовых компонент и их анализ с учетом телеграфного переключения между состояниями в силу того что подобное поведение не только отмечается в электронных приборах, но и характерно для биологических, в частности, нейрональных мембран, то есть

разработанные математические методы имеют перспективу использования и в задачах биофизики, а также разработки электронных нейроморфных систем.

Четвёртая глава содержит результаты исследований низкочастотных шумов в смесителях на базе диодов Шоттки, которые имеют перспективную практическую ценность для инженерно-радиофизических приложений. Аналитически решена задача о влиянии флуктуаций электрофизических параметров диодов Шоттки на выходную форму спектра в смесителях на базе таких диодов, позволяющая определить выходную форму спектра сигнала на выходе смесителя, зная шумовые характеристики диода. Ценность данного результата состоит в том, что по шумовым характеристикам диода Шоттки можно сделать оценку шумовых характеристик смесителя. Из отношения сигнал/шум, для рассматриваемых типов диодов и смесителей, оценена пороговая величина амплитуды принимаемого сигнала и её зависимость от амплитуды сигнала гетеродина.

Материал **пятой главы** также непосредственно связан с возможными практическими приложениями разрабатываемой теории, так как детекторы на основе наноразмерных полупроводниковых диодов Шоттки с δ-легированием, для которых исследованы шумовые характеристики, рассматриваются как перспективные простые и недорогие устройства контроля уровня электромагнитного излучения от различных приборов в широком диапазоне частот. При этом отыскание статистических характеристик выходного процесса данного типа устройств в случае, если входным является произвольный случайный процесс, оказывается чрезвычайно трудной задачей в силу нелинейности преобразователя.

Для преодоления сложности, связанной с требованием решения бесконечной системы зацепляющихся уравнений для кумулянтов и кумулянтных функций искомого случайного процесса при условии, что входная переменная является марковским процессом, использовано модельное приближение гауссовского стационарного марковского процесса с нулевым средним и гауссовского приближения для совокупности входной и выходной переменной.

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 исследованы флуктуационные процессы в физических системах, подчиняющихся правилам льда.

В начале главы обсуждается водяной лёд, структура протонной подрешетки которого имеет аналогию с распределение магнитных моментов в твер-

дых телах, получивших вследствие этого название спинового льда. В ходе этого обсуждения представлены и оригинальные результаты авторского исследования, рассматривающие состояние системы водородных связей льда как жидкое (при сохранении кислородной подрешетки) при условии множественной концентрации дефектов протонной подрешетки.

Соответственно, всплеск интереса к спиновому льду обусловлен предсказанием в спиновом льду магнитных дефектов, которые при этом являются аналогами магнитных монополей, что делает исследование соответствующей системы задачей общефизической важности.

На основе методов стохастического анализа впервые создана теория генерационно-рекомбинационного шума магнитных монополей в спиновом льду, которая моделирует флюктуации концентрации магнитных монополей процессом Орнштейна-Уленбека. В работе, входящей в число основных публикаций соответствующих содержанию главы, на основе исследования спектра шума генерации–рекомбинации магнитных монополей было предсказано, что флюктуации концентрации магнитных монополей должны проявляться во флюктуациях магнитного момента. В настоящее время это предсказание успешно подтверждено в эксперименте. В заключительной части главы приведен вывод выражения для спектра генерационно-рекомбинационного шума магнитных монополей, учитывавшего возможность суперпозиции спектров с различными временами релаксации.

В **заключении** диссертации приведены основные результаты всей работы.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации достаточно полно обоснованы, обладают несомненной научной новизной, а их достоверность обусловлена использованием известных теоретических методов исследования стохастических процессов и соответствием теоретических результатов данным, полученным в эксперименте, в том числе в работах других исследователей.

Таким образом, диссертационная работа представляет законченное комплексное исследование с выдержанной логической последовательностью научного исследования, убеждающей в достоверности полученных результатов и имеет теоретическую и практическую значимость для соответствующей области знаний. Вместе с тем, к изложению материала в тексте диссертации имеется ряд замечаний иcommentариев.

1. Хотелось бы обратить внимание автора на упомянутый им из вида статистический подход к выявлению происхождения фликкерного шума на основе статистики обобщенных линейных процессов, приводящих к распределению

нию Твиди и степенной зависимости между моментами измеряемой флюктуирующей 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 вопросы 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 icefields. *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].

Однако следует отметить, что указанные замечания и вопросы относятся прежде всего к тексту представленной диссертации, но не ставят под сомнение качество самих проведенных исследований, достоверность и обоснованность полученных результатов и сделанных из них выводов, их новизну и значимость. Подтверждением этому служит то, что они прошли апробацию на ряде крупных научных конференций, соответствующих тематике диссертационного исследования, публикация результатов, выносимых на защиту, в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах по данной тематике, известных достаточно жестким отбором поступающих рукописей по критерию актуальности тематики, в частности это “Applied Physics Letters”, “Journal of Statistical Mechanics”; “Chaos, Solitons & Fractals”; “Fluctuation and Noise Letters”, “Письма

в ЖЭТФ”, а также их цитирование широким кругом исследователей и использование ими разработанных подходов для постановки новых экспериментов.

Автореферат содержит всю необходимую информацию и адекватно отражает содержание диссертации.

Таким образом, можно заключить, что данная диссертационная работа содержит всю необходимую совокупность оригинальных научных результатов, обобщений и выводов, которые можно квалифицировать как заметное научное достижение в области радиофизики, 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), предъявляемых к докторским диссертациям, а её автор, Клюев Алексей Викторович, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 (01.04.03) – Радиофизика.

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук (05.13.18 –
Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ), доцент,
профессор кафедры физики и нанотехнологий,
заведующий отделом теоретической физики
Научно-исследовательского центра физики
конденсированного состояния
Курского государственного университета

Постников Евгений Борисович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Курский государственный университет» (ФГБОУ ВО «Курский государственный университет»). Почтовый адрес: ул. Радищева, 33, Курск, 305000

Телефон: +7 (4712) 51-04-69; электронная почта: postnicov@gmail.com

Согласен на обработку персональных данных

