

На правах рукописи

КЛЮЕВ Алексей Викторович

**ИСТОЧНИКИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ШУМОВ
В КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ
СТРУКТУРАХ И ДИОДАХ ШОТТКИ
С ДЕЛЬТА–ЛЕГИРОВАНИЕМ**

01.04.03 – Радиофизика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2008

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор **Якимов Аркадий Викторович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор **Кисляков Альберт Григорьевич**,
кандидат физико-математических наук,
доцент **Медведев Сергей Юрьевич**

Ведущая организация: Институт физики микроструктур РАН.

Защита состоится « 21 » января 2009 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского (603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим отправлять по указанному адресу учёному секретарю совета.

Автореферат разослан « 17 » декабря 2008 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



Черепеников В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы

Настоящая работа представляет собой развитие цикла исследований, выполняемых на кафедре бионики и статистической радиофизики Нижегородского государственного университета (ННГУ). Основные результаты, полученные ранее, обобщены в диссертациях С.В. Макарова, М.Ю. Перова, А.В. Белякова и А.В. Моряшина.

Фликкерный шум, иначе называемый $1/f$ шумом (что отражает вид его спектра, примерно обратно пропорциональный частоте), был обнаружен при исследовании шума электронных ламп на низких частотах.

Исследования фликкерного шума проводятся более 80 лет, однако его природа до конца не выявлена. На данный момент имеется значительный материал по физическим и статистическим свойствам фликкерного шума различных объектов, который был получен рядом исследователей: A. Van der Ziel, F.K. Du Pre, А.Н. Малахов, F.N. Hooge, T.G.M. Kleinpenning и L.K.J. Vandamme, Ш.М. Коган, P. Dutta и P.M. Horn, J. Clarke и R.F. Voss, M.B. Weissman, Г.Н. Бочков и Ю.Е. Кузовлев, В.П. Паленскис, Н.Б. Лукьянчикова, Р.З. Бахтизин и С.С. Гоц, А.К. Нарышкин и А.С. Врачев, Г.П. Жигальский, В.В. Потемкин, С.А. Корнилов, В.Н. Кулешов, М.Е. Левинштейн и С.Л. Румянцев, С.Ф. Тимашев, Г.А. Леонтьев, T. Musha и M. Yamamoto, В.П. Коверда и В.Н. Скоков, P.H. Handel, К.А. Казаков, и др.

Помимо изучения фундаментальных аспектов, касающихся природы $1/f$ шума, отдельный интерес представляет практическое приложение шумового анализа. Одним из направлений, активно развиваемых в последние годы, является использование $1/f$ шумового анализа в качестве неразрушающего инструмента для диагностики качества структуры прибора. Во фликкерных флуктуациях, по-видимому, находят свое отражение электронные и атомные процессы в веществе, характеризующие особенности микроструктуры твердых тел. Это дает возможность использовать $1/f$ шум для получения информации о качестве и надежности полупроводниковых структур.

На данный момент одной из наиболее распространенных моделей для объяснения $1/f$ шума в полупроводниках является модель двухуровневых систем (ДУС) – систем, имеющих атомарную структуру, обладающих двумя метастабильными состояниями, разделенными относительно невысоким потенциальным барьером.

Предполагается, что в образце присутствует ансамбль ДУС, характеризующийся достаточно широким (в масштабе kT) распределением высот внутренних энергетических барьеров. Спонтанные (термоактивированные) переключения между состояниями отдельной ДУС приводят к изменению электрофизических параметров образца (например, проводимости), имеющему вид случайного телеграфного процесса (СТП). Суперпозиция случайных процессов, генерируемых ансамблем ДУС, имеет спектр вида $1/f$, хотя и в ограниченном, но достаточно широком диапазоне частот. Разновидностями такой модели являются модель Когана и Нагаева для туннельного перехода частиц, а также модель, развиваемая в настоящей работе, связывающая возникновение шума с наличием подвижных дефектов в твердом теле.

Многие из разработанных статистических методов касаются проверки гауссовости и стационарности $1/f$ шума. Для этого, в частности, используются оценки вероятностного распределения (гистограммы) шума, кумулянтов высших порядков, в основном, коэффициентов асимметрии и эксцесса. На основе исследования статистических свойств $1/f$ шума возможно тестирование и контроль качества полупроводниковых приборов.

Часто исследование $1/f$ шума затрудняется из-за влияния внешних электромагнитных наводок (помех). Этой проблеме в работе уделено отдельное внимание.

В диссертации исследованы флуктуационные характеристики наноразмерных источников и приемников излучения.

В настоящее время развивается область наноэлектроники, связанная с разработкой полупроводниковых приборов с квантово-размерными структурами – квантовыми ямами (КЯ) и квантовыми точками (КТ). Предполагается, что такие приборы из-за малых размеров активной области должны обладать более высокой температурной стабильностью и радиационной стойкостью, а также сравнительно небольшим количеством подвижных дефектов, которые могут быть причиной негауссовости $1/f$ шума.

В представленной работе продолжены исследования флуктуационных характеристик светоизлучающих диодов и лазеров, имеющих наноразмерную структуру, изготовленных в Научно-исследовательском физико-техническом институте ННГУ на основе GaAs и его твердых растворов.

Другими приборами, исследуемыми в данной работе, являются низкобарьерные диоды Шоттки, разрабатываемые в Институте физики мик-

роструктур РАН. Диод с барьером Шоттки является одним из основных нелинейных элементов, используемых при приеме микроволнового излучения. Однако, из-за относительно большой высоты барьера Шоттки, “обычные” диоды обладают большим начальным сопротивлением. Это приводит к необходимости использования дополнительного внешнего смещения. Уменьшение эффективной высоты барьера позволяет уменьшить дифференциальное сопротивление диода и, тем самым, получить детектор сигналов или умножитель частоты, работающие без постоянного смещения.

В настоящей работе представлены предварительные результаты исследования вольтамперных характеристик (ВАХ) и спектра 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, полученное в процессе выращивания структуры.

ВАХ этих диодов детально исследовались производителем. Здесь используется иной подход, ориентированный на выявление технологических областей в структуре диода, содержащих источники наблюдаемого фликкерного шума.

Основные цели диссертации

- уточнение и пересмотр существующих представлений об источниках фликкерного шума в наноразмерных диодных структурах на основе GaAs и его твёрдых растворов;

- выявление и дифференциация источников фликкерного шума путём анализа токовой зависимости спектра низкочастотного шумового напряжения, генерируемого исследуемой структурой;

- анализ спектральных и простейших статистических характеристик низкочастотного шума с целью выявления новых механизмов шумообразования в наноразмерных светоизлучающих структурах;

- модификация существующих методов анализа ВАХ, предназначенных для диагностики структуры низкобарьерных диодов Шоттки, с целью дифференциации возможных источников низкочастотных шумов.

Научная новизна

1. Модифицированы модели, описывающие источники и проявление фликкерного шума в полупроводниковых диодных структурах. Впервые проанализировано влияние возможных флуктуаций электрофизических параметров квантово-размерных объектов (ям и точек) на электрические и оптические свойства светоизлучающих структур; предложена модель, описывающая фликкерные шумы в низкочастотных диодах Шоттки.

2. Обнаружено возникновение существенной негауссовости шума, сопровождающееся сменой механизма генерации низкочастотного шума, в лазерах на квантовых ямах при переходе через порог генерации индуцированного излучения.

3. Модифицирована процедура анализа ВАХ низкочастотных диодов Шоттки, что, в дополнение к диагностике структуры, позволяет выявить возможные источники низкочастотных шумов. Показано, что фликкерные шумы в исследуемых образцах могут быть обусловлены флуктуациями эффективного числа атомов донорной примеси в δ – слое перехода Шоттки.

4. Впервые доказано, что модель Ван дер Зила, определяющая спектр естественных шумов в полупроводниковом диоде, не применима при коэффициенте неидеальности ВАХ, отличном от единицы.

Практическая значимость работы

Выявление преобладающего шума тока утечки в светоизлучающих структурах указывает на необходимость совершенствования технологии их изготовления.

Обнаруженное изменение статистических характеристик низкочастотного шума в лазерах на КЯ (при переходе через порог генерации индуцированного излучения) может быть использовано для дополнительного анализа физических процессов в квантово-размерных объектах.

Предложенная процедура анализа ВАХ низкочастотных диодов Шоттки может быть использована и для других типов диодов с целью диагностики их структуры и выявления возможных источников (низкочастотных) шумов.

Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы учреждениями, занимающимися вопросами разработки и использования квантово-размерных светоизлучающих структур и низкочастотных диодов Шоттки (ННГУ, НИФТИ, ИФМ РАН и др.).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Уточнены и расширены существующие представления об источниках фликкерного шума в полупроводниковых диодах, включая наноразмерные светоизлучающие структуры и диоды Шоттки с δ – легированием.

2. В лазерах и светодиодах на КЯ и КТ, работающих в темновом режиме и в режиме спонтанного излучения, источником фликкерного шума является шум тока утечки. Возможные флуктуации электрофизических параметров КЯ и КТ в этих режимах не проявляются.

3. Установлено, что при токах, близких к пороговому значению, в лазерах на КЯ появляется дополнительный белый шум. Оценки плотности вероятности и зависимостей коэффициентов асимметрии и эксцесса шумового напряжения от тока через прибор выявили негауссовость и/или нестационарность шума при переходе в режим индуцированного излучения. В режиме спонтанного излучения нарушение гауссовости и стационарности не наблюдалось. Это свидетельствует о смене механизма шумообразования при переходе через порог генерации индуцированного излучения.

4. Флуктуации интенсивности спонтанного излучения лазеров на КЯ обусловлены фликкерным шумом тока утечки, модулирующим (вследствие питания прибора от источника тока) величину тока через КЯ.

5. Фликкерные шумы напряжения, наблюдающиеся в диодах Шоттки с δ – легированием, могут быть обусловлены флуктуациями эффективного числа атомов донорной примеси в δ – слое перехода Шоттки.

Апробация результатов и публикации

Обоснованность научных положений и выводов, полученных в диссертации, обеспечивается строгостью применяемых методов статистической радиофизики и твердотельной электроники. Адекватность разработанных моделей подтверждается удовлетворительным описанием экспериментальных данных, полученных для разных типов приборов. Кроме того, некоторые полученные результаты согласуются с исследованиями других авторов.

Основные результаты диссертационной работы отражены в 30 научных публикациях, в том числе в 6 статьях в рецензируемых изданиях.

По теме диссертации соискателем опубликованы: одна статья в журнале “Известия ВУЗов. Радиофизика”, пять статей в журнале “Вестник

Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского”.

Результаты работы регулярно докладывались на семинарах кафедры бионики и статистической радиофизики ННГУ, а также прошли апробацию на ряде научных конференций и совещаний:

- ежегодный международный научно-методический семинар “Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах” (2005–2007 г., МНТОРЭС им. А.С.Попова, Москва);
- международная научно-техническая конференция INTERMATIC – 2006 “Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения”, 24-28 октября 2006 г., Москва;
- международная научная конференция “Тонкие пленки и наноструктуры” 22-26 ноября 2005 г., Москва;
- 19-я международная конференция по шумам и флуктуациям (International Conference on Noise and Fluctuations) ICNF-2007, Japan, Tokyo, 2007;
- XII Международный Симпозиум. “Наноп физика и наноэлектроника”. 10-14 марта 2008 г., Н.Новгород;
- ежегодная “Научная конференция по радиофизике” (2004–2008 г., ННГУ, Н.Новгород);
- ежегодная “Нижегородская сессия молодых ученых” (Н.Новгород, 2004-2008 г.).

Личный вклад автора

Диссертант принимал непосредственное участие как в постановке задач, так и в расчетах, построении аналитических моделей, экспериментальных работах, обсуждении и физической интерпретации результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы и пяти приложений. Общий объем диссертации составляет 158 страниц, из них основной текст 131 страницу, приложения – 13 страниц, библиографический список – 14 страниц (165 наименований). Работа содержит 101 рисунок и 7 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обоснована актуальность рассматриваемой темы исследования, изложено современное состояние подобных исследований в мире, проведен обзор литературы по теме диссертации, приведены результаты, выносимые на защиту.

В **Первой главе** представлены модифицированные модели, учитывающие особенности рассматриваемых приборов, обусловленные спецификой механизмов токопереноса, определяющих ВАХ диода. В качестве источников фликкерного шума рассматриваются бистабильные точечные дефекты, приводящие к флуктуациям электрофизических параметров полупроводникового материала.

Бистабильные дефекты, находящиеся в различных технологических областях диода (база, область пространственного заряда – ОПЗ, и т.д.), приводят к появлению фликкерных флуктуаций той или иной компоненты тока. В зависимости от того, какая компонента подвержена наиболее сильным флуктуациям, и от того, какая компонента наиболее сильно проявляется в ВАХ диода, возникают различные эффекты в токовой зависимости спектра $1/f$ шумового напряжения, выделяющегося на диоде.

В **Разделе 1.1** рассмотрены механизмы токопереноса, определяющие различные составляющие ВАХ полупроводникового диода, такие как диффузионный ток, рекомбинационный ток и ток утечки.

Диффузионный и рекомбинационный токи, при напряжении V_d , приложенном к $p-n$ переходу, имеют вид:

$$I_{\lambda} = I_{s\lambda} \left[\exp\left(\frac{V_d}{\eta_{\lambda} V_T}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

где $V_T = kT/q$ – тепловой потенциал, определяемый элементарным зарядом q , постоянной Больцмана k , и абсолютной температурой T , η_{λ} – коэффициент неидеальности (для диффузионной компоненты тока $\lambda=d$, $\eta_d=1$; для рекомбинационной компоненты тока $\lambda=r$, $\eta_r=2$).

Ток утечки в общем случае содержит две компоненты – линейную I_{ll} и нелинейную I_{nl} ($I_l = I_{ll} + I_{nl}$). Линейная компонента описывается сопротивлением R_{ll} ($I_{ll} = V/R_{ll}$). Для моделирования нелинейной компоненты здесь используется характеристика обычного диода типа (1), с параметрами $\lambda=nl$ и, как правило, $\eta_{nl} \gg 1$. Следует отметить, что нелинейная

компонента тока утечки I_{nl} – весьма общее понятие. В каждом конкретном типе полупроводниковых приборов к выражению вида (1) могут приводить различные физические механизмы.

Приведена эквивалентная схема полупроводникового диода с соответствующими дифференциальными сопротивлениями (рис.1). Учтено сопротивление базы диода и его омических контактов.

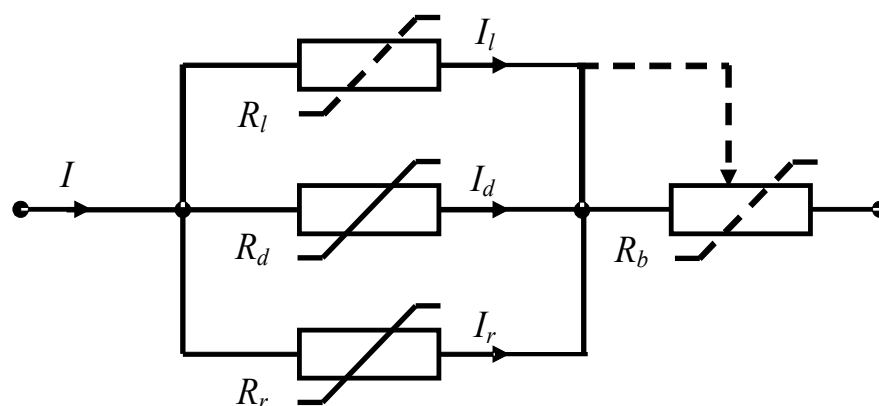


Рис. 1

В Разделе 1.2 предполагается, что фликкерный шум обусловлен присутствием подвижных точечных дефектов в материале. Используется модель двухуровневых систем (ДУС), согласно которой дефект может находиться в одном из двух метастабильных состояний. Переход из одного состояния в другое происходит достаточно быстро, по сравнению с временем пребывания в одном из состояний. Следовательно, изменение электрофизических параметров образца (например, подвижности, концентрации носителей тока) при перемещении дефекта из одного состояния в другое и обратно может быть представлено случайным телеграфным процессом (СТП). В полупроводнике имеется определенное количество дефектов и $1/f$ шум образуется суперпозицией (ансамблем) СТП.

Стохастические (термоактивированные) переключения состояний бистабильного дефекта приводят к изменениям его электрофизических параметров, например, сечения рассеяния и энергии ионизации. Изменение первого параметра проявляется через флуктуации подвижности, второго – через флуктуации подвижности и концентрации носителей тока.

Рассмотрены механизмы возникновения флуктуаций различных компонент тока полупроводникового диода. Показано, что эти механизмы могут быть учтены путём введения флуктуаций сопротивлений, входящих в эквивалентную схему диода.

Представлены модифицированные модели, учитывающие особенности рассматриваемых приборов, обусловленные спецификой механизмов токопереноса, определяющих ВАХ диода. В качестве источников фликкерного шума рассматриваются бистабильные дефекты, находящиеся в различных технологических областях диода (база, ОПЗ, и т.д.).

Бистабильные дефекты, находящиеся в (нейтральной) базе диода, приводят к флуктуациям диффузионной компоненты тока. Бистабильные дефекты, находящиеся в области пространственного заряда приводят к флуктуациям рекомбинационной компоненты. Флуктуации тока утечки могут быть связаны с процессами, происходящими по периметру диода.

Показано, что причиной флуктуаций диффузионной компоненты тока могут быть флуктуации концентрации и/или подвижности носителей, вызванные бистабильными дефектами, локализованными в базе диода.

В качестве механизма возникновения флуктуаций рекомбинационной компоненты тока могут выступать флуктуации времени жизни (либо скорости рекомбинации) носителей заряда в ОПЗ. Указанные флуктуации рассматриваются в качестве возможной причины возникновения флуктуаций рекомбинационного тока.

Обязательным условием проявления эффекта “насыщения” фликкерного шума, наблюдавшегося в германиевых диодах и объясненного А.Н. Малаховым, является наличие лишь одной токовой компоненты, подверженной флуктуациям.

Такой компонентой в Ge диодах является диффузионный ток. При малых токах через диод спектр $1/f$ шумового напряжения пропорционален квадрату тока через образец (как в линейных резистивных элементах). При больших токах, когда дифференциальное сопротивление изменяется примерно обратно пропорционально току, зависимость спектра шума от тока пропадает, то есть возникает эффект насыщения шума. Наличие резистора нагрузки, шунтирующего диод по малому сигналу, приводит к тому, что насыщение наступает при бóльших значениях тока через диод.

В светодиодах и лазерах с КТ и КЯ эффект насыщения наблюдается в случае преобладания рекомбинационной компоненты тока, подверженной фликкерным флуктуациям.

В диодах, характеризующихся относительно большой шириной ОПЗ, наблюдалась зависимость спектра $1/f$ шумового напряжения, обратно пропорциональная току в первой степени. Объяснение этого эффекта было дано А.К. Нарышкиным и заключается в учете диффузионной компоненты тока через диод (не флуктуирующей) и относительно слабой рекомбинационной компоненты, подверженной фликкерным флуктуациям.

В диссертации показано, что при учете “не шумящей” диффузионной и флуктуирующей рекомбинационной компоненты тока через диод, если они сравнимы по величине, в области малых токов имеет место рост спектра пропорционально квадрату тока, а в области больших токов спектр обратно пропорционален току в первой степени. Таким образом, “эффект Нарышкина” модифицируется в эффект “максимизации” шума.

В исследованных светоизлучающих диодах и лазерах на КТ и КЯ диффузионную компоненту тока выявить не удалось. Поэтому, если ток рекомбинации (в ОПЗ, КТ, КЯ) подвержен фликкерным флуктуациям, то должен наблюдаться эффект насыщения шума.

Эффект максимизации фликкерного шума проявляется, как правило, в случае доминирующих флуктуаций тока “утечки”. Этот ток может быть обусловлен утечкой по периметру перехода, либо через дефекты структуры. Токовая зависимость спектра $1/f$ шума в этом случае имеет максимум. В области малых токов спектр нарастает пропорционально квадрату тока так же как это происходит и для фликкерного шума линейного резистора. По мере увеличения тока через диод нарастание спектра замедляется, затем, после достижения максимума, спектр шумового напряжения начинает монотонно убывать.

Раздел 1.3 содержит заключение к первой главе, дающее обзор всех приведенных в главе известных моделей и эффектов и новых результатов по модификации рассмотренных моделей.

Во **Второй главе** проводится детальный анализ шумов следующих приборов: (а) светодиоды на $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ квантовых ямах и $InAs$ квантовых точках; (б) светодиоды только на $InAs$ квантовых точках; (в) лазеры на $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ квантовых ямах.

При исследовании флуктуаций интенсивности излучения полупроводниковых лазеров было обнаружено существенное проявление негассовости $1/f$ шума при переходе через порог генерации индуцированного излучения.

Также было установлено, что после порога генерации лазерного излучения происходит увеличение мощности шума за счет появления дополнительного белого шума.

В Разделе 2.1 описаны структуры исследованных светодиодов и лазеров (изготовленных в группе Б.Н. Звонкова, НИФТИ ННГУ).

В Разделе 2.2 рассмотрена рекомбинационная (через квантовые ямы/точки и центры рекомбинации в ОПЗ) составляющая ВАХ светоизлучающих диодов и лазеров. Впервые исследовано проявление возможных флуктуаций скорости рекомбинации через квантовые ямы/точки. Показано, что в этом случае в токовой зависимости спектра должен наблюдаться эффект насыщения. Подтверждены выводы о том, что флуктуации тока рекомбинации через квантовые ямы/точки не проявляются в исследованных приборах.

В Разделе 2.3 проводится анализ ВАХ и токовых зависимостей спектра НЧ шумов исследуемых светодиодов и лазеров. Во всех приборах был обнаружен ток утечки.

Приведены экспериментальные результаты: вольтамперные характеристики, токовые зависимости спектра $1/f$ шумового напряжения.

В ряде лазеров и светодиодов на КТ и КЯ утечки имеют линейный характер. В некоторых образцах обнаружены нелинейные утечки. На рис.2, 3 показана ВАХ и токовая зависимость спектра $1/f$ шума светодиода № 1, содержащего в своей структуре КЯ и слой КТ.

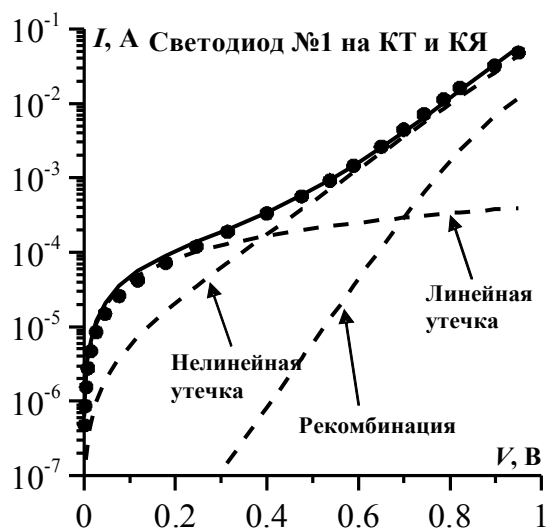


Рис. 2. ВАХ светодиода

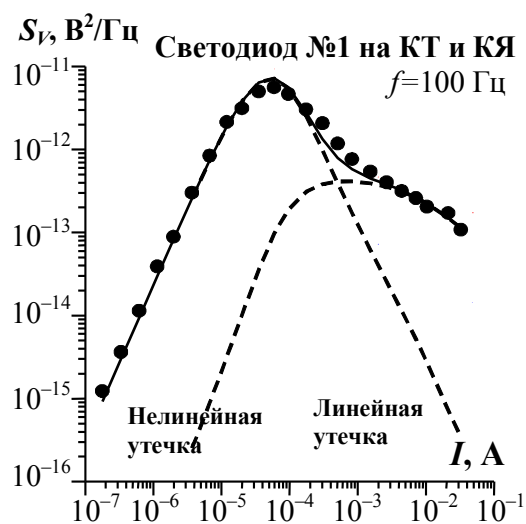


Рис. 3. Токовая зависимость спектра шумового напряжения

Основным результатом исследований, представленных в данном разделе, является подтверждение того, что источником фликкерных шумов, наблюдаемых в анализируемых образцах, является шум утечки. Подчеркнем, что шумов в КТ и КЯ в этих образцах нами выявлено не было.

В Разделе 2.4 установлено, что после порога генерации лазерного излучения происходит увеличение мощности шумового напряжения за счет проявления дополнительного белого шума.

В Разделе 2.5 проведено исследование негауссовости $1/f$ шума. Для оценки плотности вероятности шумового напряжения используется гистограмма, что позволило выявить существенные отклонения от распределения Гаусса при переходе через порог излучения.

В допороговой области (рис.4а) гистограмма не показывает отклонения от распределения Гаусса. При переходе через порог генерации шум становится существенно негауссовым (рис. 4б). В режиме индуцированного излучения нарушение гауссовости исчезает (рис.4в).

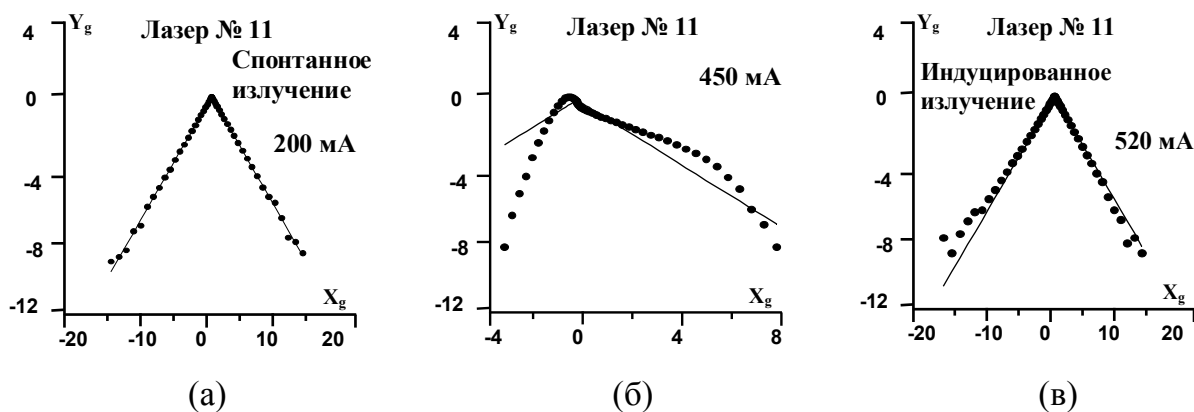


Рис. 4. Гистограмма в гауссовых координатах для лазера № 11 для токов: (а) 200 мА (режим спонтанного излучения); (б) 450 мА (начало генерации излучения); (в) 520 мА (режим лазерной генерации).

Сплошные линии – гауссово приближение по заданной дисперсии шума.

Проведено исследование зависимости коэффициентов асимметрии и эксцесса шумового напряжения лазера от тока через прибор.

Большая часть полученных данных для коэффициентов асимметрии и эксцесса лежит вблизи нулевого значения, имеют место отдельные выбросы в разных режимах работы прибора. Наибольшие отклонения от нуля проявляются при индуцированном излучении лазера. Полученные данные характеризуют наличие негауссовости и/или нестационарности шума в режиме индуцированного излучения.

В Разделе 2.6 приводятся результаты анализа электрических шумов лазеров на квантовых ямах и флуктуаций интенсивности оптического

излучения. Подтверждено наличие выявленной ранее существенной корреляции между этими случайными процессами.

В настоящее время диагностика светодиодов и лазеров производится с помощью исследования картины перераспределения светового потока по объему диаграммы излучения в процессе наработки.

В разделе показано, что из-за корреляции электрических и оптических шумов появляется возможность проводить диагностику приборов, исследуя только 1/f шумы напряжения.

В Разделе 2.7 обобщены результаты второй главы. Сделаны выводы о характеристиках исследуемых образцов. Представлены особенности шумовых процессов, проявляющихся в образцах, что дает производителю потенциальную возможность ликвидировать их в новых поколениях приборов.

В Третьей главе проводится детальный анализ шумов наноразмерных полупроводниковых диодов Шоттки с δ – легированием.

В Разделе 3.1 описана структура диодов, исследованных в данной работе (диоды изготовлены в группе В.И. Шашкина, ИФМ РАН).

В Разделе 3.2 проводится анализ ВАХ исследуемых диодов.

Ток I_D через барьер Шоттки с приповерхностным δ – легированием описывается соотношением:

$$I_D = I_s \cdot \exp\left(-\frac{\alpha V_D}{V_T}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{V_D}{\eta V_T}\right) - 1\right]. \quad (2)$$

Здесь V_D – напряжение, приложенное к барьеру Шоттки, η – коэффициент неидеальности, $\alpha = d/D \ll 1$ – относительная толщина δ – слоя (d – ширина туннельного барьера на границе с металлом ~ единиц нанометра, D – ширина барьера Мотта ~100 нм), I_s – характерный ток.

Характерный ток равен:

$$I_s = A^{**} T^2 \exp(-\Delta_0/kT), \quad (3)$$

где A^{**} – модифицированная постоянная Ричардсона, Δ_0 – эффективная высота барьера при нулевом смещении, зависящая от параметров δ – легирования:

$$\Delta_0 = \left[\Phi - \frac{q^2 N_s d}{\epsilon} \right] \cdot \left[1 - \frac{d}{D} \right]. \quad (4)$$

Здесь Φ – высота барьера на границе металл-полупроводник, N_s – поверхностная концентрация атомов донорной примеси, ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника.

Предложена модель низкобарьерного диода Шоттки с δ – легированием, в которой учтено сопротивление омических контактов и базы диода, а также возможность существования утечки.

Разработана процедура декомпозиции ВАХ таких диодов. Исследованы ВАХ диодов; получено удовлетворительное согласие модели и эксперимента.

Показана необходимость учета последовательного сопротивления базы и контактов R_b . Помимо снижения высоты барьера с целью уменьшения дифференциального сопротивления R_{D0} при нулевом напряжении, необходимо уделять внимание проблеме уменьшения сопротивления базы и контактов.

В Разделе 3.3 приведены измеренные спектры НЧ шумов исследуемых диодов (рис.5).

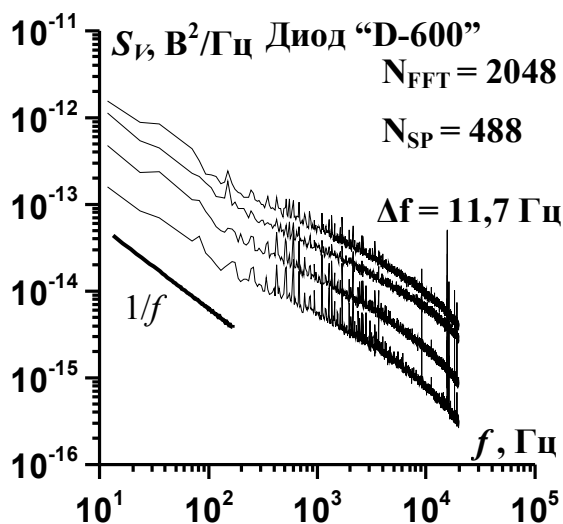


Рис. 5. Семейство спектров шумового напряжения диода D-600 при разных токах через диод

Выполнен анализ токовых зависимостей этих спектров.

На основе анализа ВАХ диода Шоттки (2 – 4), предложена модель флуктуаций эффективного числа атомов донорной примеси в δ – слое перехода Шоттки, объясняющая экспериментальные данные. Атомы примеси должны быть полностью ионизованы. Однако в рассматриваемом слое могут присутствовать подвижные атомы неконтролируемых примесей, например, атомов кислорода, водорода и т.д. Предполагается, что каждый такой атом формирует

ДУС. Стохастические (термоактивированные) переключения между состояниями ДУС могут проявляться через стохастические (типа СТП) изменения энергии ионизации подобных (бистабильных) атомов примеси. Эти изменения приводят к флуктуациям эффективного числа атомов донорной примеси. Оценки, сделанные на основе модели, показывают, что эффективно один из 1 млн. (для некоторых диодов – один из 100 тыс.) атомов может изменять степень ионизации.

Согласно модели спектр фликкерного шума сначала нарастает пропорционально квадрату тока через диод, а при больших значениях тока наступает эффект насыщения.

На рис. 6 представлена токовая зависимость спектра $1/f$ шумового напряжения для диода D-600 на частоте 12 Гц. Точками показаны экспериментальные данные, сплошная линия – модель флуктуаций эффективного числа атомов донорной примеси в δ – слое перехода Шоттки.

В разделе выявлена неприменимость модели Ван дер Зила для описания естественных шумов в полупроводниковых диодах, имеющих коэффициент неидеальности ВАХ, отличный от единицы.

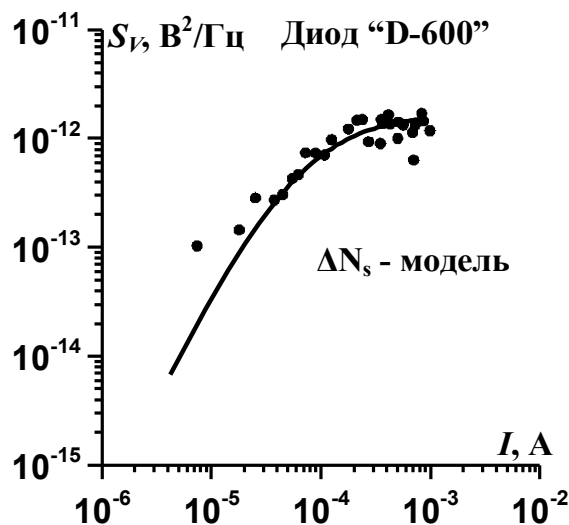


Рис. 6. Токовая зависимость спектра шумового напряжения для диода D-600 на частоте 12 Гц.

В Разделе 3.4 обобщены результаты третьей главы. Сделаны выводы о характеристиках исследуемых образцов. Представлены особенности шумовых процессов, проявляющихся в образцах.

В **Заключении** изложены основные результаты и выводы.

В **Приложении 1** представлено описание экспериментальной установки для измерения низкочастотных шумов светоизлучающих приборов, приведены основные характеристики приборов, входящих в её состав.

В **Приложении 2** представлено описание основных характеристик приборов установки для измерения НЧ шума диодов с барьером Шоттки.

В **Приложении 3** представлено описание программного комплекса для исследования НЧ шума.

В **Приложении 4** представлено описание характеристик атмосферных и промышленных помех, воздействующих на экспериментальную установку.

В **Приложении 5** приведен список сокращений и обозначений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Модифицированы модели, описывающие источники и проявление фликкерного шума в полупроводниковых диодных структурах.

2. На основе детального изучения ВАХ и токовой зависимости спектра $1/f$ шумового напряжения светодиодов и лазеров на квантовых ямах и квантовых точках подтверждено, что фликкерный шум в исследуемых образцах обусловлен шумом тока утечки. В указанных структурах, работающих как в “темновом” режиме, так и в режиме спонтанного излучения, возможные флуктуации электрофизических параметров КЯ и КТ не проявляются.

3. Показано, что флуктуации интенсивности спонтанного излучения лазеров на КЯ обусловлены $1/f$ шумом тока утечки, модулирующим рекомбинационную компоненту тока через прибор.

4. Обнаружено существенное проявление негауссовости $1/f$ шума в лазерах на КЯ при переходе через порог генерации индуцированного излучения. После порога генерации индуцированного излучения происходит увеличение мощности шума за счет появления дополнительного белого шума, что свидетельствует о смене механизма шумообразования.

5. На основе предварительного анализа ВАХ и токовых зависимостей спектра шумового напряжения диодов Шоттки с δ – легированием обнаружено, что фликкерные шумы в исследуемых образцах могут быть обусловлены флуктуациями эффективного числа атомов донорной примеси в δ – слое перехода Шоттки.

6. Доказано, что модель Ван дер Зила, определяющая спектр естественных шумов в полупроводниковом диоде, не применима при коэффициенте неидеальности ВАХ, отличном от единицы.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах:

1. Беляков, 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. Беляков, А.В. Влияние фликкерного шума тока утечки на флуктуации интенсивности излучения лазеров на квантовых ямах / А.В. Беляков, А.В. Клюев, А.В. Якимов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика. – 2005. – Вып. 1 (3). – С.3-12.

3. Ключев, А.В. Анализ воздействия электромагнитного импульса на длинную линию в дальней зоне / А.В. Ключев // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика. – 2006. – Вып. 1 (4) – С.121-130.

4. Ключев, А.В. Анализ помех при измерениях низкочастотных шумов / А.В. Ключев, А.В. Якимов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2007. – № 6. – С.52-55.

Прочие публикации:

5. Belyakov, A.V. 1/F Noise in leakage current of nanoscale light emitting structures / A.V. Belyakov, A.V. Klyuev, A.V. Yakimov // ICNF-2007. 19th International conference on Noise and Fluctuations, Tokyo, Japan, 9–14 Sept. 2007. – AIP, 2007. – Vol. 922. – P. 329-332.

6. Беляков, А.В. Исследование 1/f шума в наноразмерных светоизлучающих структурах / А.В. Беляков, А.В. Ключев, А.В. Якимов // Нанопфизика и наноэлектроника: XII Международный Симпозиум, Нижний Новгород, 10–14 марта. 2008. – ИФМ РАН, 2008. – Т. 2. – С. 323-324.

7. Беляков, А.В. Фликкерный шум тока утечки в светодиодах на гетероструктурах с квантовыми ямами и квантовыми точками / А.В. Беляков, А.В. Ключев, А.В. Якимов // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: Материалы международного научно-методического семинара “Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах”. М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, МЭИ, 2007. – С.73-78.

8. Беляков, А.В. Исследование низкочастотных шумов наноразмерных InGaAs/GaAs/InGaP лазеров на квантовых ямах с целью диагностики их физических свойств / А.В. Беляков, А.В. Ключев, А.В. Якимов // Тонкие пленки и наноструктуры: Материалы Международной научной конференции, Москва, 22-26 ноября. 2005. – М., 2005. – Ч. 1. – С.205-207.

9. Ключев, А.В. Исследование токовой зависимости спектра 1/f шумового напряжения низкобарьерных диодов Шоттки с δ -легированием / А.В. Ключев, Е.И. Шмелев // XIII Нижегородская сессия молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины: Тезисы докладов. – Изд. Гладкова О.В. – 2008.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

1. Модификация физических моделей, описывающих токовые зависимости спектра фликкерных шумов в полупроводниковых диодах

1.1 ВАХ полупроводникового диода

1.2 Источники фликкерного шума в полупроводниковом диоде

(Модель $1/f$ шума на основе бистабильных дефектов. Фликкерные флуктуации параметров диода. Эффект насыщения. Эффект, обусловленный флуктуациями рекомбинационного сопротивления диода. Эффект максимизации.)

1.3 Выводы по первой главе

2. Низкочастотные шумы в светоизлучающих гетероструктурах на квантовых ямах и точках

2.1. Структуры исследованных светодиодов и лазеров

2.2. Токи рекомбинации в светодиодах и лазерах на КЯ/КТ

2.3. НЧ шумы утечки в светодиодах и лазерах на КЯ/КТ

(Светодиоды на КТ и КЯ. Светодиоды на КТ. Лазеры на КЯ.)

2.4 Анализ спектра НЧ электрических шумов лазерных структур в области порога индуцированного излучения

(Декомпозиция спектров. Зависимость спектральных компонент от тока.)

2.5 Исследование негауссовости НЧ шума.

(Проявление негауссовости НЧ шума в лазерах. Негауссовость $1/f$ шума в светодиодах.)

2.6. Флуктуации интенсивности оптического излучения лазеров на КЯ

(Флуктуации интенсивности оптического излучения. Спектры электрических шумов и флуктуаций интенсивности излучения. Функция взаимной когерентности.)

2.7 Выводы по второй главе

3. НЧ шум в наноразмерных полупроводниковых диодах с барьером Шоттки

3.1. Структура диодов

3.2. Декомпозиция ВАХ диодов с барьером Шоттки

(Модель диода. Процедура аппроксимации экспериментальных данных и оценка точности аппроксимации. Полные ВАХ диодов.)

3.3. Анализ спектра НЧ шумов диодов с барьером Шоттки

(Шум типа $1/f$. Токовые зависимости спектра $1/f$ шума. Оценка спектра НЧ шума при малом токе.)

3.4. Выводы по третьей главе

Заключение

Приложения. 1. Основные характеристики приборов установки для измерения низкочастотных шумов светоизлучающих приборов. 2. Основные характеристики устройств, входящих в состав установки для измерения $1/f$ шума диодов с барьером Шоттки. 3. Программный комплекс для исследования НЧ шума. 4. Анализ помех при измерениях низкочастотных шумов. 5. Сокращения и обозначения.

Список литературы

Подписано в печать 09.12.2008. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 851

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии
Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского
Лиц. ПД № 18-0099 от 14.05.2001 г.
603000, Н.Новгород, ул. Б. Покровская, 37