

*На правах рукописи*

**ШМЕЛЕВ Евгений Игоревич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕЦИФИКИ ФЛИККЕРНЫХ  
И ЕСТЕСТВЕННЫХ ШУМОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ GaAs**

01.04.03 – Радиофизика

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

Нижегород – 2010

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 «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. в \_\_\_\_\_ на заседа-  
нии диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государствен-  
ном университете им. Н.И. Лобачевского (603950, Нижний Новгород,  
пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижего-  
родского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

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

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

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



Черепенников В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

### Актуальность темы

Настоящая работа представляет собой развитие цикла исследований природы низкочастотных шумов полупроводниковых приборов, 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, А.В. Моряшина и А.В. Ключева.

Флуктуационные явления (шумы) в полупроводниках обусловлены случайным характером происходящих в них физических процессов. В диссертации рассматриваются естественные шумы (тепловой; дробовой), а также фликкерный шум.

Фликкерный шум, иначе называемый  $1/f$  шумом, существенно ограничивает эксплуатационные качества приборов (например, чувствительность и стабильность), требования к которым постоянно повышаются. В связи с этим исследования  $1/f$  шума в полупроводниках является важной проблемой современной радиофизики.

Для достижения существенных результатов в исследовании природы фликкерного шума необходимо разработать модель, позволяющую адекватно объяснить механизм его формирования. Исследования шума проводятся более 80 лет, однако его природа до конца не выявлена. На данный момент имеется значительное количество публикаций по исследованиям фликкерного шума различных объектов, выполненных 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.

В настоящее время в научно-технической литературе активно обсуждается связь  $1/f$  шума в полупроводниковых структурах с флуктуациями либо концентрации носителей тока ( $\delta n$ -модель), либо их подвижности ( $\delta \mu$ -модель). Для полупроводниковых приборов выявлена связь между  $1/f$  шумом и качеством кристаллической решетки (наличием дефектов). Поведением дефектов в кристаллической решетке можно объяснить флуктуации концентрации свободных носителей, а также флуктуации подвижности. В частности, в первом случае дефект должен проявлять нестабильность заряда в результате захвата и испускания носителей тока (например, модель Мак Уортера), а во втором случае – должен быть способным изменять свою конфигурацию в пространстве.

На сегодняшний день одной из распространенных моделей для объяснения  $1/f$  шума в полупроводниках является модель бистабильных дефектов. Дан-

ные дефекты формируются, предположительно, бистабильными (в общем случае мультистабильными) дефектами кристаллической решетки образца. Модель бистабильных дефектов, первоначально разрабатываемая в рамках представлений о флуктуациях подвижности, обобщается и для учета составляющей фликкерного шума, связанной с флуктуациями концентрации свободных носителей тока. При этом достоверная информация о природе источников, вызывающих флуктуации подвижности, в рамках модели бистабильных дефектов до сих пор, по-видимому, отсутствует.

Таким образом, исследования по выявлению источников, способных приводить к флуктуациям подвижности, и исследования, позволяющие определить соотношение вклада от  $\delta\mu$ - и  $\delta n$ - составляющих данными источниками в результирующий спектр фликкерного шума, являются актуальными.

По мере того как флуктуационные исследования расширялись и углублялись, становилось очевидным, что их результаты содержат ценную информацию о физических процессах в полупроводниках и полупроводниковых структурах. Поэтому такие исследования открывают дополнительные возможности для изучения процессов, определяющих не только шумовые, но и нешумовые параметры и характеристики полупроводниковых материалов и приборов. Именно такой подход к роли и значению флуктуационных исследований наиболее полно отражает их актуальность для современной полупроводниковой электроники.

Помимо изучения фундаментальных аспектов, касающихся природы  $1/f$  шума, отдельный интерес представляет практическое приложение  $1/f$  шумового анализа. Одним из направлений, активно развиваемых в последние годы, является использование  $1/f$  шумового анализа в качестве неразрушающего инструмента диагностики качества структуры. 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. В частности, на основе исследования статистических свойств  $1/f$  шума возможно тестирование, контроль качества полупроводниковых структур и выявление потенциально ненадежных образцов.

В диссертационной работе развивается метод, направленный на выявление областей шумообразования в полупроводниковых структурах с помощью совместного анализа спектра фликкерного шума и вольтамперной характеристики (ВАХ) структуры. Исследования в части локализации области шумообразования в полупроводниковых структурах (рассматриваются полевые транзисторы с затвором Шоттки, эпитаксиальные пленки и низкочастотные диоды Шоттки с  $\delta$ -легированием), а также выявление источников фликкерного шума (дефектов) направлены на комплексный анализ природы фликкерного шума в структурах на основе GaAs.

Кроме  $1/f$  шума в работе исследуется также специфика естественных шумов (теплового, дробового) в полупроводниковых структурах.

Естественные шумы проявляются в структурах при малых токах, а также при работе без внешнего постоянного смещения. Ранее Ключевым показано, что подход Ван дер Зила не применим для определения спектра естественных шумов  $p-n$  перехода, а также барьера Шоттки, обладающих коэффициентом неидеальности ВАХ, превышающим единицу. В данной работе предлагается модификация соотношения Ван дер Зила для спектра естественных шумов диода.

Расшифровка шумовых данных осложняется тем, что в процессе измерений получаемые оценки статистических характеристик шума прибора зачастую искажаются из-за влияния внешних электромагнитных помех. Это особенно характерно для нелинейных образцов, обладающих малыми шумами (по сравнению с собственным шумом измерительной установки) и способных детектировать внешние помехи. В этой связи было уделено отдельное внимание разработке установки, позволяющей осуществлять измерения шумовых характеристик прибора в наиболее благоприятных, с точки зрения внешних помех, условиях.

## Основные цели диссертации

1. Модификация модели  $1/f$  шума в GaAs на основе анализа известных данных об электрофизических параметрах и спектре  $1/f$  шума в планарных полевых транзисторах Шоттки и эпитаксиальных пленках.

2. Выявление потенциальных источников  $1/f$  шума в структурах на основе GaAs путём исследования строения и механизма мультистабильности существующих точечных дефектов.

3. Сравнительный анализ проявления фликкерных флуктуаций подвижности и концентрации свободных электронов в GaAs, вызванных стохастическими изменениями состояния мультистабильных точечных дефектов и сложных дефектов (комплексов).

4. Разработка эквивалентной схемы низкобарьерного диода Шоттки с  $\delta$ -легированием для конкретизации природы и дифференциации возможных источников фликкерного шума на основе измерения семейства спектров низкочастотного шума при прямом и обратном напряжениях смещения.

5. Модификация соотношения Ван дер Зила для определения спектра естественных шумов диодов с  $p-n$  переходом, а также барьером Шоттки, обладающих коэффициентом неидеальности ВАХ, превышающим единицу. Экспериментальная проверка модифицированного соотношения. Уточнение шумовых параметров приборов, использующих подобные полупроводниковые диоды.

## Научная новизна

1. Предложено в качестве механизма, приводящего к мультистабильности дефектов, рассматривать влияние эффекта Яна–Теллера, которому подвергаются собственные дефекты и атомы легирующей примеси в

полупроводниках. Впервые механизм образования  $1/f$  шума связывается с дефектами, подверженными влиянию эффекта Яна–Теллера.

2. Показана способность бистабильных точечных дефектов к генерации фликкерных флуктуаций в подвижности и концентрации свободных электронов. Для наиболее типичных параметров легирования GaAs кремнием впервые показано доминирование составляющей, вызванной флуктуациями подвижности. Подобный результат свидетельствует в пользу  $\delta\mu$ -модели  $1/f$  шума.

3. Впервые показано, что в GaAs, легированном кремнием, удельный вклад спектральной составляющей фликкерного шума, определяемой бистабильными точечными дефектами с флуктуирующим зарядом, существенно превышает вклад сложных дефектов (комплексов), бистабильность которых проявляется через переориентацию в пространстве.

4. Предложена модифицированная модель, описывающая источники и проявление фликкерного шума в низкобарьерных диодах Шоттки с  $\delta$ -легированием. Показано, что фликкерные шумы в исследуемых образцах могут быть обусловлены не только флуктуациями эффективного числа атомов донорной примеси в  $\delta$ -слое перехода Шоттки, но и флуктуациями тока утечки.

5. Модифицировано соотношение Ван дер Зила для определения спектра естественных шумов  $p$ – $n$  перехода, а также барьера Шоттки, с коэффициентом неидеальности ВАХ, превышающим единицу. Модифицированное соотношение подтверждено экспериментально.

## **Практическая значимость работы**

Определена структура возможных мультистабильных дефектов как потенциальных источников фликкерного шума. Механизм образования шума связывается с дефектами, подверженными влиянию эффекта Яна–Теллера. Предложено обоснование, свидетельствующее в пользу  $\delta\mu$ -модели  $1/f$  шума в GaAs. Данные результаты могут быть использованы для конкретизации природы фликкерного шума.

Показано, что в GaAs, легированном кремнием, удельный вклад спектральной составляющей фликкерного шума, создаваемого бистабильными точечными дефектами с флуктуирующим зарядом, существенно превышает вклад сложных дефектов (комплексов), бистабильность которых проявляется через переориентацию в пространстве. Данный результат свидетельствует о том, что существование в пространстве кристаллической решетки дефектов парного типа предпочтительнее, чем наличие точечных дефектов.

Для выявления и дифференциации источников фликкерного шума выполнен совместный анализ ВАХ и токовой зависимости спектра низкочастотного шумового напряжения полупроводниковых структур при прямом и обратном смещениях. Результаты анализа при обратном смещении использованы для определения механизма шумообразования в структурах.

Предложенная модификация соотношения Ван дер Зила для спектра естественных шумов диодов с  $p$ – $n$  переходом, а также барьером Шоттки, обладающих коэффициентом неидеальности ВАХ, превышающим единицу, применена

для уточнения шумовых параметров приборов (например, для детекторов: отношение «сигнал/шум», эквивалентная шумовая мощность), использующих данные полупроводниковые диоды.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. В качестве источников фликкерного шума в эпитаксиальных пленках, планарных субмикронных полевых транзисторах с плоским затвором Шоттки, выполненных на основе GaAs, предлагается рассматривать донорно-акцепторные пары, такие как  $V_{Ga}Si_{Ga}$ ,  $V_{As}Si_{As}$ ,  $V_{Ga}V_{As}$ .

2. Механизм образования фликкерного шума в GaAs связан с дефектами, подверженными влиянию эффекта Яна-Теллера.

3. Составляющая спектра фликкерного шума, связанная с флуктуациями подвижности, превышает составляющую, связанную с флуктуациями концентрации свободных электронов для точечных дефектов с зарядовой бистабильностью в GaAs, легированном кремнием.

4. В GaAs, легированном кремнием, удельный вклад спектральной составляющей фликкерного шума, создаваемого бистабильными точечными дефектами с зарядовой мультистабильностью, существенно превышает вклад сложных дефектов (комплексов), бистабильность которых проявляется через переориентацию в пространстве.

5. Фликкерные шумы в диодах Шоттки с  $\delta$ -легированием обусловлены флуктуациями эффективного числа атомов донорной примеси в  $\delta$ -слое перехода Шоттки и флуктуациями тока утечки.

6. Предложено модифицированное соотношение Ван дер Зила, позволяющее определить спектр естественных шумов  $p$ - $n$  перехода, а также барьера Шоттки, с коэффициентом неидеальности ВАХ, превышающем единицу.

### **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 структур. Отдельные из полученных результатов согласуются с исследованиями других авторов.

Основные результаты диссертационной работы отражены в 16 научных публикациях [1-16], Среди них 5 статей в рецензируемых изданиях: опубликованы четыре статьи в журнале “Вестник ННГУ. Серия Радиофизика”; одна статья принята к печати в журнале “Fluctuation and Noise Letters”.

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

- Ежегодные международные научно-методические семинары “Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах” (2007–2009 г., МНТОРЭС им. А.С.Попова, Москва);
- Международные конференции по шумам и флуктуациям (International Conference on Noise and Fluctuations) ICNF-2007, Japan, Tokyo, 2007 г.; ICNF-2009, Italy, Piza, 2009 г.;
- XII Международный Симпозиум. “Нанозфизика и нанозлектроника”. 10-14 марта 2008 г., Н.Новгород;
- Ежегодная “Нижегородская сессия молодых ученых” (Н.Новгород, 2007-2009 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 двух приложений. Общий объем диссертации составляет 147 с., из них основной текст 128 с., приложения – 6 с., библиографический список – 13 с. (162 наименований). Работа содержит 69 рисунков и 11 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 положения, выносимые на защиту.

В **Первой главе** диссертации, посвященной выявлению природы и специфики  $1/f$  шума в структурах на основе GaAs, исследуются строение и механизм мультистабильности дефектов. Анализируется способность бистабильных точечных и сложных дефектов генерировать фликкерные флуктуации подвижности и концентрации свободных электронов.

В **Разделе 1.1** описываются простейшие точечные дефекты и образованные ими комплексы в кристаллической решетке. Рассматривается свойство мультистабильности дефектов. Приводятся энергетические диаграммы для разных вариантов проявления данного свойства у дефектов (зарядовая и пространственная мультистабильность).

В **Разделе 1.2** приводится модель бистабильных дефектов для описания  $1/f$  шума. В рамках данной модели предполагается, что шум генерируется бистабильными дефектами (как частный случай мультистабильных дефектов) в кристаллической структуре полупроводника. В качестве бистабильных дефектов рассматриваются стохастически “вращающиеся” диполи (рис. 1а), образованные донорно-акцепторными парами. Стохастические переключения



состояний дефекта описываются энергетической диаграммой (рис. 1б), которая в упрощенном виде может быть представлена двухуровневой системой (ДУС). Спонтанные (термоактивированные) переключения между состояниями отдельной ДУС приводят к изменению электрофизических параметров образца (например, проводимости), имеющему вид случайного телеграфного процесса. Суперпозиция случайных процессов, генерируемых ансамблем ДУС, при определенных условиях имеет спектр вида  $1/f$ , хотя и в ограниченном, но достаточно широком диапазоне частот.

Для объяснения спектра  $1/f$  шума, измеряемого в диапазоне частот от 1 Гц до 100 кГц, требуется набор ДУС с равномерно распределенными энергиями  $\Delta E$  в диапазоне от 0.3 до 0.6 эВ.

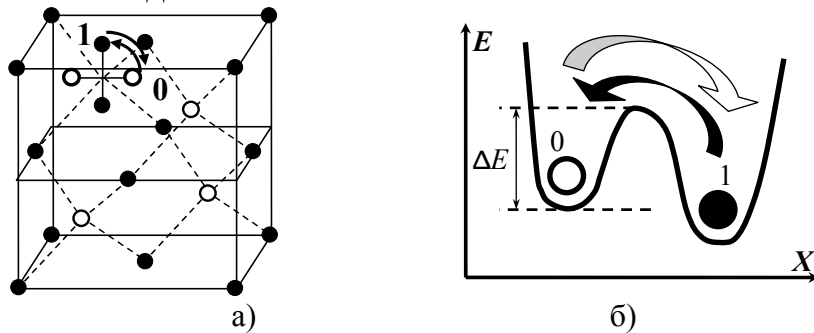


Рис. 1. (а) Вращающийся диполь как пример бистабильного дефекта в GaAs решетке; (б) энергетическая диаграмма бистабильного дефекта

Согласно модели бистабильных дефектов спектр относительного шумового напряжения  $\delta V$  в диапазоне  $f_{low} < f < f_{high}$  определяется выражением

$$S_{\delta V}(f) = \frac{S_V}{V^2} = \frac{N_d}{4f \ln(f_{high}/f_{low})} \left( \frac{\mu}{\mu_d n_d \cdot V_{eff}} \right)^2 (\delta\mu_{di})_1^2, \quad (1)$$

где  $N_d = n_d \cdot V_{eff}$  – полное число бистабильных дефектов в объеме  $V_{eff}$ ;  $\mu_d$  – компонента полной подвижности  $\mu$ , связанная с рассеянием на ансамбле бистабильных дефектов;  $f_{low}$ ,  $f_{high}$  – нижняя и верхняя границы моделируемого спектра. Параметр  $(\delta\mu_{di})_1$  отражает относительное изменение сечения рассеяния на одном дефекте  $\mu_{di}^1$  когда дефект перемещается между локальными состояниями “1” с  $\mu_{di}^{“1”}$  и “0” с  $\mu_{di}^{“0”}$ .

В Разделе 1.3 приводятся результаты совместного анализа электрофизических и шумовых характеристик двух типов GaAs структур: прототипов планарных субмикронных полевых транзисторов с затвором Шоттки, а также эпитаксиальных пленок. Анализ проводился с целью выявления источников  $1/f$  шума и показал, что согласно модели бистабильных дефектов  $1/f$  шум в рассматриваемых структурах может быть вызван некими нейтральными комплексами дефектов парного типа (рис. 1а). Данные комплексы определены как нейтральные, так как выявленное изменение количества дефектов в результате естественного старения полевых транзисторов не привело к изменению концентрации свободных электронов в зоне проводимости. На основе экспериментальных данных оцениваются флуктуации подвижности  $(\delta\mu_{di})_1$ , обусловленные “вращением” диполей, и минимальная длина плеча диполя.

В данном разделе также исследуются комплексы в  $n$ -GaAs, легированном Si, которые имеет дипольную структуру. В качестве простейшего примера комплексов дефектов рассматриваются структуры таких донорно-акцепторных пар, как  $\text{Si}_{\text{As}}\text{Si}_{\text{Ga}}$ ,  $\text{V}_{\text{Ga}}\text{Si}_{\text{Ga}}$ ,  $\text{V}_{\text{As}}\text{Si}_{\text{As}}$ . Например,  $\text{V}_{\text{Ga}}\text{Si}_{\text{Ga}}$  комплекс содержит вакансию галлия ( $\text{V}_{\text{Ga}}$ ) и атом кремния ( $\text{Si}_{\text{Ga}}$ ), замещающего ближайший атом галлия в кристаллической решетке. Также в кристаллической решетке могут существовать комплексы, содержащие две вакансии  $\text{V}_{\text{Ga}}\text{V}_{\text{As}}$  (дивакансия) и комплексы, включающие в себя атомы, располагающиеся в междоузлии, например, междоузельный атом кремния ( $\text{I}_{\text{Si}}$ ), формирующий пару  $\text{Si}_{\text{As}}\text{I}_{\text{Si}}$ .

В Разделе 1.4 рассматривается эффект Яна-Теллера в качестве механизма формирования стохастической мультистабильности дефектов, способных привести к появлению фликкерного шума. Согласно данному подходу исследуется возможность сложного дефекта, содержащего вакансию галлия и мелкоуровневый донор кремния ( $\text{V}_{\text{Ga}}\text{Si}_{\text{Ga}}$ ), выступать в роли пространственного мультистабильного дефекта и DX-центра – в качестве дефекта с зарядовой мультистабильностью.

В частности, вакансия  $\text{V}_{\text{Ga}}$ , входящая в состав комплекса  $\text{V}_{\text{Ga}}\text{Si}_{\text{Ga}}$ , смещена из узла идеальной кристаллической решетки благодаря влиянию эффекта Яна-Теллера. У вакансии  $\text{V}_{\text{Ga}}^{-2}$  должно существовать до четырех направлений смещения (изображены стрелками на рис. 2а). Каждое смещение соответствует своему метастабильному состоянию в пространстве. Изменение позиции вакансии влечет за собой изменение в пространственной ориентации  $\text{V}_{\text{Ga}}\text{Si}_{\text{Ga}}$  комплекса, и, как следствие, изменяется сечение рассеивания данного комплекса. Схематичная модель двух ориентаций  $\text{V}_{\text{Ga}}\text{Si}_{\text{Ga}}$  комплекса представлена на рис. 2б, где  $\text{V}_{\text{Ga}}$  вакансия располагается в локальных состояниях, соответствующих смещениям “1” и “3”. В конфигурациях “1” и “3” дырка локализуется на “оборванных” связях 1 и 3 атомов As.

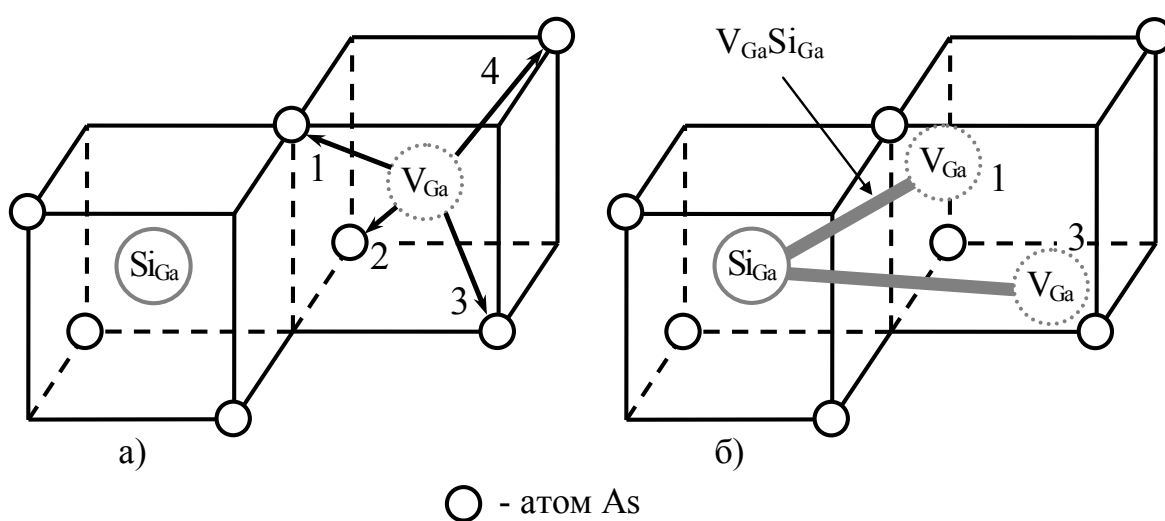


Рис. 2. (а) Четыре направления смещения вакансии  $\text{V}_{\text{Ga}}^{-2}$ ; (б) схематичная модель двух пространственных ориентаций  $\text{V}_{\text{Ga}}\text{Si}_{\text{Ga}}$  комплекса с  $\text{V}_{\text{Ga}}$  вакансией в локальных состояниях “1” и “3”. На рисунке не показано перемещение соседних атомов, которые должны сместиться вместе с дефектом к новому равновесному состоянию

Анализ известных теоретических и экспериментальных данных показал, что для  $V_{Ga}Si_{Ga}$  (содержащего вакансию  $V_{Ga}^{-2}$ ) энергетический барьер  $\Delta E$ , необходимый для переориентации комплекса как целого, превышает 0.2 эВ.

В разделе исследуется потенциальная возможность дефектов, подверженных влиянию эффекта Яна-Теллера, участвовать в формировании наблюдаемого спектра фликкерного шума в GaAs образцах.

В Разделе 1.5 анализируется способность бистабильных точечных и сложных дефектов в GaAs, легированном Si, генерировать фликкерные флуктуации подвижности и концентрации свободных электронов.

В качестве источника фликкерного шума рассматривается ансамбль бистабильных точечных дефектов, способных изменять свой заряд. В данном случае флуктуации концентрации свободных носителей  $\delta n$ , вызванные изменением заряда ансамбля дефектов, сопровождаются коррелированными флуктуациями подвижности  $\delta \mu$ . Компонента фликкерного шума, вызванная флуктуациями подвижности  $S_{\delta \nu}^n(f)$ , определяется согласно (1); для учета флуктуаций концентрации используется следующее выражение:

$$S_{\delta \nu}^n(f) = \frac{\langle \Delta N \rangle^2}{4N^2} \frac{N_d}{\ln(f_{high} / f_{low})} \frac{1}{f}, \quad (2)$$

где  $\Delta N$  – изменение числа свободных носителей вследствие изменения заряда одного нестабильного дефекта.

Показывается, что в GaAs составляющая спектра  $1/f$  шума, связанная с флуктуациями подвижности  $S_{\delta \nu}^n(f)$ , превышает составляющую  $S_{\delta \nu}^n(f)$ , вызванную флуктуациями концентрации свободных носителей.

Сравниваются (на основе численных оценок) спектральные составляющие фликкерного шума, создаваемые бистабильными точечными дефектами с флуктуирующим зарядом и сложными дефектами (комплексами), бистабильность которых проявляется через переориентацию в пространстве.

В Разделе 1.6 содержатся выводы по первой главе.

Во **Второй** главе представлены результаты исследования вольтамперных характеристик низкобарьерных диодов Шоттки с  $\delta$ -легированием (НБДШ), выполнены предварительные оценки шумов в области малых токов и в режиме работы без постоянного смещения; предложены теоретические модели и физическая трактовка полученных результатов для данных диодов.

В Разделе 2.1 описывается структура НБДШ.

На основе анализа ВАХ предлагается модель низкобарьерного диода Шоттки с  $\delta$ -легированием, в которой учтено сопротивление омических контактов и базы диода (моделируются с помощью  $R_b$ ), а также возможность существования утечки. Эквивалентная схема диода приводится на рис. 3. Здесь ток утечки – ток, который может быть обусловлен утечкой по периметру перехода, либо через дефекты структуры.

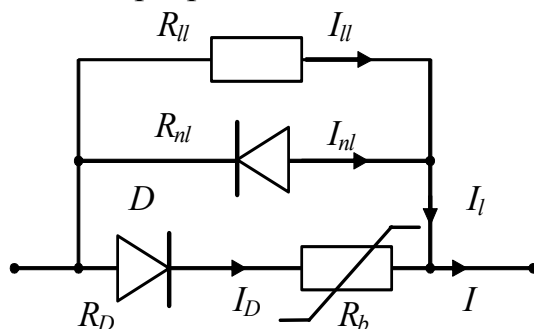


Рис. 3. Эквивалентная схема диода

Ток  $I_D$  через барьер Шоттки с приповерхностным  $\delta$ -легированием описывается соотношением:

$$I_D = I_s \cdot \exp\left(-\frac{\alpha V_D}{V_T}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{V_D}{\eta_D V_T}\right) - 1\right]. \quad (3)$$

Здесь  $V_D$  – напряжение, приложенное к барьеру Шоттки,  $\eta_D$  – коэффициент неидеальности,  $I_s$  – характерный ток;  $\alpha = d/D \ll 1$ ,  $d$  – ширина туннельного барьера на границе с металлом  $\sim$  единиц нанометра,  $D$  – ширина барьера Мотта  $\sim 100$  нм.

Характерный ток  $I_s$  равен:

$$I_s = A^{**} T^2 S \cdot \exp(-\Delta_0/kT), \quad (4)$$

где  $A^{**}$  – модифицированная постоянная Ричардсона,  $S$  – площадь контакта,  $\Delta_0$  – эффективная высота барьера при нулевом смещении, зависящая от параметров  $\delta$ -легирования:

$$\Delta_0 = \left[ \Phi - \frac{q^2 N_s d}{\epsilon \epsilon_0} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{d}{D} \right]. \quad (5)$$

Здесь  $\Phi$  – высота барьера на границе металл-полупроводник,  $N_s$  – поверхностная концентрация атомов донорной примеси,  $\epsilon \epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость полупроводника.

В общем случае ток утечки состоит из линейной  $I_{ll}$  и нелинейной  $I_{nl}$  компонент. В эквивалентной схеме диода  $R_{ll}$  моделирует ток линейной утечки; ток нелинейной утечки  $I_{nl}$  моделируется ВАХ обратного включенного диода с сопротивлением  $R_{nl}$ . Учет тока утечки позволил достичь удовлетворительного описания экспериментальных данных при положительных и отрицательных токах (рис. 4).

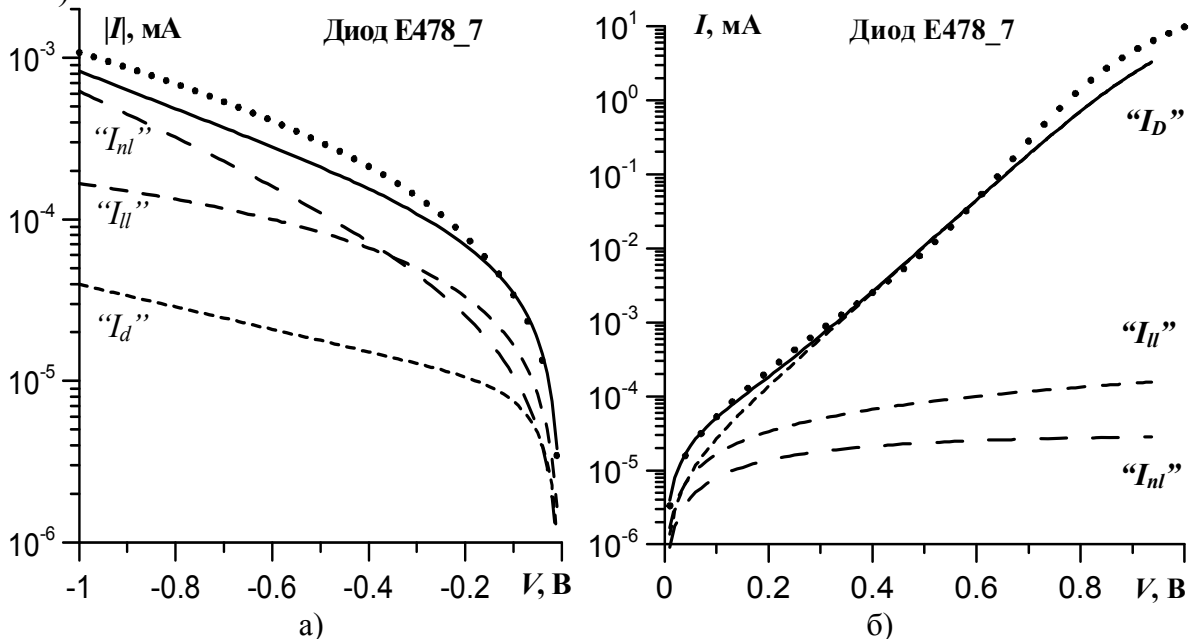


Рис. 4 ВАХ диода E478\_7 в области отрицательных (а) и положительных (б) токов, полулогарифмический масштаб. Точки – экспериментальные данные. Сплошная линия – результат полной аппроксимации, штриховые линии – вклад тока  $I_D$  через барьер Шоттки, а также токов утечки  $I_{ll}$  и  $I_{nl}$

На основе предложенной модели разрабатывается процедура выделения (декомпозиция ВАХ) токовых компонент диодов:  $I_D$ ,  $I_{II}$  и  $I_{nl}$ .

В Разделе 2.2 приводятся результаты измерений спектров низкочастотных электрических шумов НБДШ в области малых токов ( $I_D < I_s$  и  $I_D \approx I_s$ ) при прямом и обратном напряжении смещения и в режиме без постоянного смещения (рис. 5).

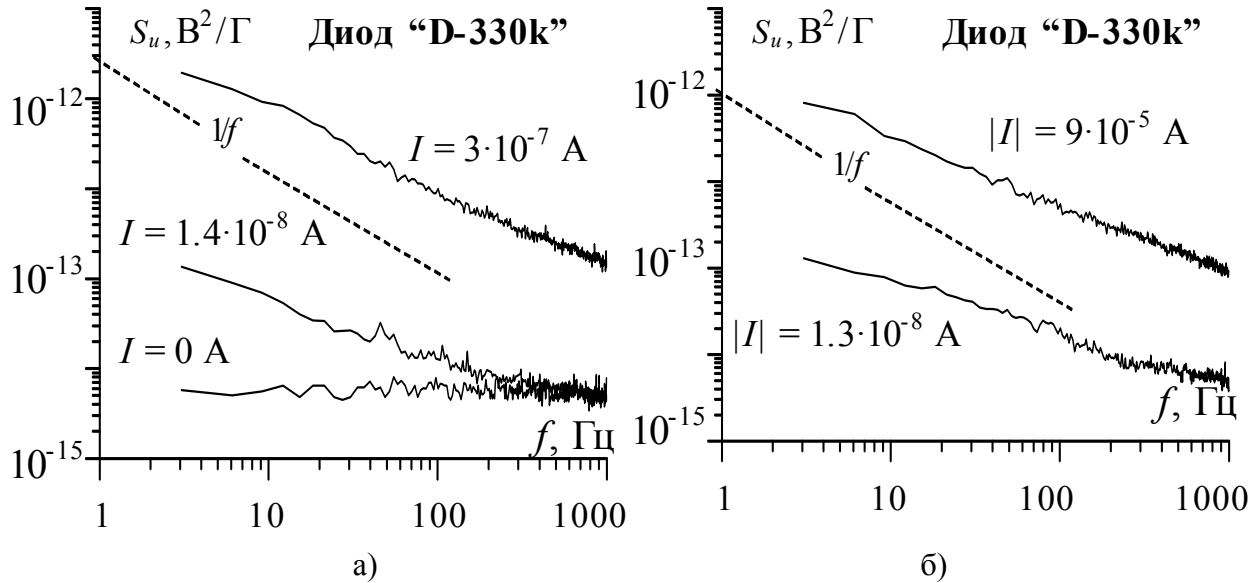


Рис. 5. Спектры шумового напряжения диода “D-330k” при нулевом и при прямом напряжениях смещения (а), а также при обратном напряжении (б) смещения

Разрабатывается модель образования  $1/f$  шума в низкобарьерных диодах Шоттки с  $\delta$ -легированием. Для выявления специфики и локализации источников шумообразования здесь предлагается использовать измерения НЧ шума диода как при прямом, так и при обратном напряжениях смещения.

В Разделе 2.3 для объяснения измеренного  $1/f$  шума в НБДШ применяются модели тока утечки и флуктуаций эффективного числа атомов донорной примеси в  $\delta$ -слое перехода Шоттки ( $\Delta N_s$ -модель).

Модель тока утечки заключается в том что причиной  $1/f$  шума напряжения могут быть как относительные флуктуации линейной составляющей сопротивления утечки  $\delta R_{II}(t)$ , так и нелинейной  $\delta R_{nl}(t)$ .

В рамках  $\Delta N_s$ -модели считается, что к  $1/f$  шуму напряжения приводят относительные флуктуации дифференциального сопротивления  $\delta R_D(t)$ , проявляющиеся, согласно (4) и (5), через флуктуации  $N_s$ . Атомы Si практически полностью ионизованы. Однако в  $\delta$ -слое и его окрестностях могут присутствовать атомы неконтролируемой примеси (водород, кислород), а также собственные дефекты. Предполагается, что каждый такой атом формирует ДУС. В частности, отмечается существование DX-центров, в состав которых входят атомы кремния из  $\delta$ -слоя.

Стохастические переключения между состояниями ДУС проявляются через стохастические (типа СТП) изменения энергии ионизации подобных

(бистабильных) атомов примеси. Эти изменения приводят к флуктуациям эффективного числа атомов донорной примеси  $\delta N_s(t)$ .

Спектр суммарного напряжения шумов в случае некоррелированных флуктуаций определяется как суперпозиция:

$$S_u = \sum_{\lambda} V_{n\lambda}^2 \cdot S_{R\lambda}, \lambda = D, ll, nl. \quad (6)$$

где  $V_{n\lambda}$  – коэффициент преобразования относительных флуктуаций сопротивления  $\delta R_{\lambda}(t)$  в шумовое напряжение, выделяющееся на диоде;  $S_{R\lambda}$  – спектр относительных флуктуаций сопротивления  $\delta R_{\lambda}(t)$ .

Результат моделирования токовых зависимостей спектра фликкерного шума для прямого и обратного смещений диода приведен на рис. 6.

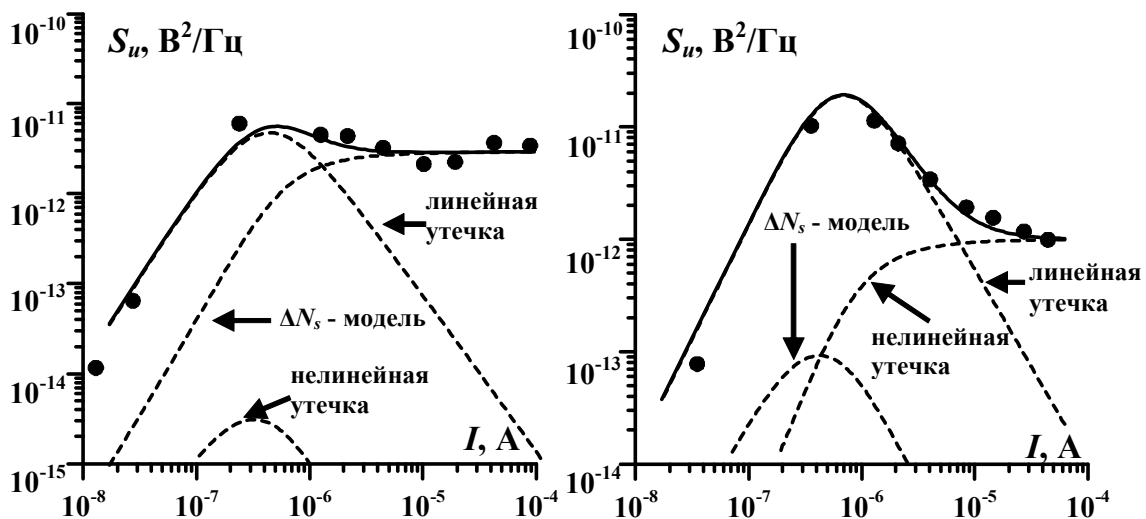


Рис. 6. Токовая зависимость спектра  $1/f$  шумового напряжения  $S_u$  диода “D-330k” на частоте анализа  $f=10$  Гц при прямом (а) и обратном (б) смещениях

На основе анализа ВАХ и спектра НЧ шума диодов определяются параметры для соответствующих моделей.

Оценки, сделанные на основе  $\Delta N_s$ -модели, показывают, что эффективно один из 1 млн. (для некоторых диодов – один из 100 тыс.) атомов может изменять степень ионизации.

В Разделе 2.4 содержатся выводы по второй главе.

В Третьей главе исследуется спектр естественных шумов НБДШ и детекторов, использующих данные диоды.

В Разделе 3.1 в соответствии с доказанной ранее неприменимостью подхода Ван дер Зила для определения спектра естественных шумов  $p-n$  перехода, а также барьера Шоттки, обладающего коэффициентом неидеальности ВАХ  $\eta_D$ , превышающим единицу, приводится модификация соотношения Ван дер Зила. В случае  $\eta_D > 1$  соотношение Ван дер Зила противоречит теореме Найквиста при  $I_D = 0$ . Модифицированное соотношение определяет спектр естественного шума следующим образом:

$$S_{iD} = (2q/\eta_D) \cdot (I_D + 2I_s). \quad (7)$$

Осуществляется экспериментальная проверка предлагаемого подхода на основе измерений НЧ шума НБДШ при малых токах и при нулевом смещении.

Зависимости спектра естественного шума от тока  $I$  через диод с  $R_0 = 330$  кОм в рамках модели Ван дер Зила и согласно предложенной ее модификации представлены на рис. 7. Коэффициент неидеальности для данного диода  $\eta_D = 2.2$ . Сопротивление  $R_0$  определяет полное сопротивление диода при нулевом смещении.

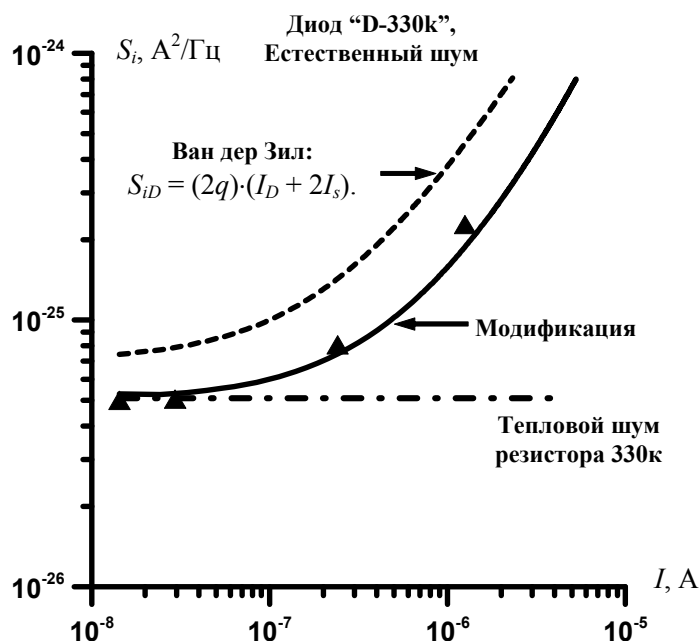


Рис. 7. Зависимость спектра естественного шума (выделенного из полного спектра токового шума) от тока  $I$  через диод с  $R_0 = 330$  кОм,  $\eta_D = 2.2$ ,  $I_s = 4 \cdot 10^{-8}$  А (треугольники). Сплошная линия – спектр, вычисленный согласно (7). Линия - • - отражает спектр теплового шума эквивалентного сопротивления 330 кОм

В Разделе 3.2 исследуется НЧ шум полупроводниковых детекторов на базе НБДШ, работающих без постоянного смещения. Уточняются, в соответствии с модифицированным соотношением Ван дер Зила, шумовые параметры полупроводниковых детекторов (отношение «сигнал/шум», эквивалентная шумовая мощность). Показано, что максимум отношения «сигнал/шум» и минимальная эквивалентная шумовая мощность детекторов достигается при коэффициенте неидеальности диодов  $\eta_D$ , равном единице.

В Разделе 3.3 содержатся выводы по третьей главе.

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

В **Приложении 1** представлена структура и принцип работы мобильной экспериментальной установки для измерения НЧ шумов полупроводниковых приборов.

В **Приложении 2** приведен список сокращений и обозначений.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Для двух типов структур, выполненных на основе GaAs, эпитаксиальных пленок и планарных субмикронных полевых транзисторов с плоским затвором Шоттки, подтверждено, что диполи, спонтанно изменяющие свою ориентацию в кристаллической решетке, могут являться источником наблюдаемого  $1/f$  шума. В рамках  $\delta\mu$ -модели фликкерного шума выполнен поиск до-

норно-акцепторных пар, имеющих дипольный тип рассеяния для электронов в *n*-GaAs, легированном кремнием. Предложено рассматривать такие донорно-акцепторные пары, как  $V_{Ga}Si_{Ga}$ ,  $V_{As}Si_{As}$ ,  $V_{Ga}V_{As}$ .

2. В качестве механизма, приводящего к появлению мультистабильности дефектов, предложено учесть эффект Яна-Теллера, которому подвергаются собственные дефекты и атомы легирующей примеси в полупроводниках. Выявлена способность сложного дефекта, содержащего вакансию галлия и мелкоуровневый донор кремния ( $V_{Ga}Si_{Ga}$ ), выступать в роли пространственного мультистабильного дефекта и DX-центра в качестве дефекта с зарядовой мультистабильностью. Показано, что данные дефекты способны формировать наблюдаемый спектр фликкерного шума в GaAs образцах. Сформулировано предположение, что механизм образования  $1/f$  шума связан с дефектами, подверженными влиянию эффекта Яна-Теллера.

3. Для наиболее типичных параметров легирования GaAs кремнием (в рамках модифицированной модели бистабильных дефектов) показан доминирующий вклад фликкерных флуктуаций подвижности. Подобный результат свидетельствует в пользу  $\delta\mu$ -модели  $1/f$  шума. Показано, что удельный вклад спектральной составляющей шума, определяемой бистабильными точечными дефектами с флуктуирующим зарядом, существенно превышает вклад сложных дефектов (комплексов), бистабильность которых проявляется через переориентацию в пространстве.

4. Предложена модель низкобарьерного диода Шоттки с  $\delta$ -легированием, что позволило описать полученные экспериментальные токовые зависимости спектра фликкерного шума при прямом и обратном напряжениях смещения. Показано, что фликкерные шумы в исследуемых образцах могут быть обусловлены не только флуктуациями эффективного числа атомов донорной примеси в  $\delta$ -слое перехода Шоттки, но и флуктуациями тока утечки.

5. Модифицировано соотношение Ван дер Зила для определения спектра естественных шумов *p-n* перехода, а также барьера Шоттки, обладающих коэффициентом неидеальности ВАХ, превышающим единицу. Модифицированное соотношение подтверждено экспериментально. Уточнены значения шумовых параметров (отношение «сигнал/шум», эквивалентная шумовая мощность) полупроводниковых детекторов, работающих без постоянного смещения.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых журналах:

1. Моряшин, А.В. Донорно-акцепторные пары как причина  $1/f$  шума в приборах на основе GaAs // А.В. Моряшин, Е.И. Шмелев, А.В. Якимов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиоп физика. – 2007. – Вып.1. – С.78-82.

2. Шмелев, Е.И. Мобильная установка для исследования низкочастотных шумов // Е.И. Шмелев, А.В. Клюев, А.В. Якимов // Вестник Нижегородского



университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика. – 2009. – Вып.5. – С. 81-85.

3. Ключев, А.В. Модификация соотношения А. Ван дер Зила для естественных шумов диодов с коэффициентом неидеальности ВАХ, превышающим единицу / А.В. Ключев, Е.И. Шмелев, А.В. Якимов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика. – 2009. – Вып. 4. – С.53-56.

4. Klyuev, A.V. Modification of Van der Ziel Relation for Spectrum of Noise in  $p-n$  Junction / A.V. Kluev, E.I. Shmelev, A.V. Yakimov // Fluctuation and Noise Letters Vol. 0, No. 0 (принято к печати).

5. Ключев, А.В. Источники фликкерного шума в дельта-легированных кремнием диодах Шоттки / А.В. Ключев, Е.И. Шмелев, А.В. Якимов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика. – 2010. – Вып. 5 (принято к печати).

### **Прочие публикации:**

6. Yakimov, A.V. Effects of natural ageing in  $1/f$  noise and current-voltage characteristics of submicron planar MESFETs // A.V. Yakimov, A.V. Moryashin, S.V. Obolensky, E.I. Shmelev // Proc. 19th International Conference "Noise and Fluctuations, ICNF 2007". Tokyo, Japan, 9-14 September 2007. Ed. by M. Takano, Y. Yamamoto, M. Nakao. AIP Conference Proceedings. – 2007. – Vol. 922. – P. 381-386.

7. Shmelev, E.I. Complexes of defects as the source of  $1/f$  noise in GaAs based devices / E.I. Shmelev, A.V. Klyuev, A.V. Yakimov // Proc. 20th International Conference "Noise and Fluctuations, ICNF 2009". Piza, Italy, 14-19 June 2009. AIP Conference Proceedings. – 2009. – Vol.1129. – P.65-68.

8. Klyuev, A.V. Modification of A. Van der Ziel relation for natural noise in diodes with non-ideality factor of I-V characteristic  $\eta > 1$  / A.V. Klyuev, E.I. Shmelev, A.V. Yakimov // Proc. 20th International Conference "Noise and Fluctuations, ICNF 2009". Piza, Italy, 14-19 June 2009. AIP Conference Proceedings. – 2009. – Vol.1129. – P. 361-364.

9. Yakimov, A.V.  $1/f$  noise in Si delta-doped Schottky diodes / A.V. Yakimov, A.V. Klyuev, E.I. Shmelev, A.V. Murel, V.I. Shashkin // Proc. 20th International Conference "Noise and Fluctuations, ICNF 2009". Piza, Italy, 14-19 June 2009. AIP Conference Proceedings. – 2009. – Vol.1129. – P. 225-228.

10. Шмелев, Е.И. Дефектные комплексы как причина  $1/f$  шума в приборах на основе GaAs // Шмелев Е.И., Якимов А.В. // XII Международный Симпозиум, Нанопизика и наноэлектроника, Н. Новгород. – 2008. – Т.2. – С. 368-369.

11. Шмелев, Е.И. Анизотропно рассеивающие метастабильные дефектные комплексы как причина  $1/f$  шума в приборах на основе GaAs // Шмелев Е.И., Моряшин А. В., Якимов А.В.// Материалы международного научно-методического семинара "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах", МНТОРЭС им. А.С. Попова. – 2007. – С.81-87.

12. Шмелев, Е.И. Разработка мобильной установки для измерения низкочастотных шумов полупроводниковых диодов // Е.И. Шмелев, А.В. Ключев, А.В.

Якимов // Материалы докладов международного научно-методического семинара “Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах”, МНТОРЭС им. А.С.Попова. – 2009. – С.101-107.

13. Ключев, А.В. Спектр естественных шумов диодов с коэффициентом неидеальности ВАХ, превышающим единицу // А.В. Ключев, Е.И. Шмелев, А.В. Якимов // Материалы международного научно-методического семинара "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах", МНТОРЭС им. А.С. Попова. – 2009. – С.140-145.

14. Моряшин, А.В. Фликкерные флуктуации подвижности электронов в GaAs, обусловленные “вращающимися” донорно-акцепторными парами // А.В. Моряшин, Е.И. Шмелев // XII нижегородская сессия молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины: Тезисы докладов.- Изд. Гладкова О.В. – 2007. – С.79-80.

15. Ключев, А.В. Исследование токовой зависимости спектра  $1/f$  шумового напряжения низкобарьерных диодов Шоттки с  $\delta$ -легированием. / А.В. Ключев, Е.И. Шмелев // XIII нижегородская сессия молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины: Тезисы докладов.- Изд. Гладкова О.В. – 2008. – С. 76-77.

16. Шмелев, Е.И. Измерение НЧ шума низкобарьерных диодов Шоттки с дельта-легированием // Е.И. Шмелев, А.В. Ключев, Н.С. Скородумова // XIV нижегородская сессия молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины: Тезисы докладов.- Изд. Гладкова О.В. – 2009. – С. 23-24.

# ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

## Введение

### **1 Мультистабильные дефекты как источник фликкерного шума в структурах на основе GaAs**

- 1.1 Дефекты в кристаллах
- 1.2 Модель бистабильных дефектов
- 1.3 Донорно-акцепторные пары как причина  $1/f$  шума
- 1.4 Механизм мультистабильности дефектов
- 1.5 Бистабильные точечные и сложные дефекты как источник фликкерных флуктуаций подвижности и концентрации свободных электронов
- 1.6 Выводы по первой главе

### **2 Источники $1/f$ шума в наноразмерных полупроводниковых диодах с барьером Шоттки**

- 2.1 Декомпозиция ВАХ диодов с барьером Шоттки
- 2.2 Модели формирования  $1/f$  шума в диодах Шоттки с  $\delta$ -легированием
- 2.3 Источники  $1/f$  шума в диодах Шоттки с  $\delta$ -легированием при малых токах
- 2.4 Выводы по второй главе

### **3 Спектр естественного шума диодов и детекторов на базе диодов Шоттки с $\delta$ -легированием**

- 3.1 Спектр естественного шума диода при малом токе
- 3.2 Спектр естественного шума детектора на базе диода Шоттки с  $\delta$ -легированием
- 3.3 Выводы по третьей главе

## Заключение

**Приложения.** 1. Описание мобильной установки. 2. Обозначения и сокращения.

## Список литературы

---

Подписано в печать 15.11.2010. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 702.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета в Центре цифровой печати  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского  
603000, Н. Новгород, ул. Б. Покровская, 37