

На правах рукописи

Моряшин Алексей Владимирович

**Уточнение природы $1/f$ шума на основании
исследования естественного старения
субмикронных планарных GaAs полевых
транзисторов с затвором Шоттки**

01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2007

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 Жигальский Геннадий Павлович
кандидат физико-математических наук, доцент Дубков Александр Александрович

Ведущая организация: Институт физики микроструктур РАН

Защита состоится “ 23 ” мая в 16.00 на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 в Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского (603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1 , ауд. 420).

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

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

Автореферат разослан “ 12 ” апреля _____ 2007 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат физико-математических наук, доцент

Черепеников В.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы работы: Одним из направлений современной радиопизики является исследование статистических характеристик шумов с целью получения дополнительной информации о природе и свойствах источников шумов.

Распространенным, но недостаточно изученным, является фликкерный шум ($1/f$ шум), характеризующийся спектральной плотностью мощности примерно обратно пропорциональной частоте. Данный шум обусловлен флуктуациями параметров радиоэлементов (например, сопротивления, емкости и др.) и наблюдается при наложении на элемент напряжения или при пропускании через него тока.

Разнообразие свойств фликкерного шума, которое наблюдается в идентичных образцах и в различных системах, не согласуется с положением об его фундаментальности. Если бы это явление было фундаментальным, то шум во всех исследуемых объектах имел бы одинаковый механизм возникновения и обладал одинаковыми свойствами. В действительности, в некоторых приборах обнаружена зависимость $1/f$ шума от условий на поверхности образца, в то время как в основном он обусловлен объемным эффектом (флуктуациями параметров, например, удельного сопротивления).

На данный момент имеется значительный теоретический и экспериментальный материал по $1/f$ шуму в проводящих материалах, который был получен Ван дер Зилом (A. Van der Zil), Дю Пре (F.K. Du Pre), А.Н. Малаховым, Хоухе (F.N. Hooge), Клайнпенningом (T.G.M. Kleinpenning), Фандамме (L.K.J. Vandamme), Ш.М. Коганом, Даттой (P. Dutta), Хорном (P.M. Horn), Воссом (R.F. Voss) и др. Многие из известных экспериментальных данных основаны на обработке результатов измерений спектра шума. Несмотря на то, что исследования $1/f$ шума проводятся около 80 лет, его природа, по-прежнему, до конца не определена.

Развитие вычислительной техники и цифровой обработки сигналов позволяет применять другие, более сложные, методы исследования случайных процессов к $1/f$ шуму. Большинство новых, разработанных на базе цифровой техники, статистических методов касается проверки гауссовости и стационарности $1/f$ шума – “нулевой” гипотезы. К ним можно отнести: измерение гистограммы, моментов и кумулянтов; анализ погрешности измерения интенсивности фильтрованного шума; измерение корреляции между интенсивностями шума на выходах двух неперекрывающихся полосовых фильтров. В связи с тем, что возможности этих методов в применении к шумовому анализу уже достаточно хорошо изучены, а природа шума, тем не менее, не выявлена, особый интерес представляет определение возможностей других методов, не применявшихся ранее к $1/f$ шуму.

Одним из методов проверки “нулевой” гипотезы является измерение биспектра случайного процесса. Биспектр отражает статистическую связь второго порядка, характеризующую несимметричность распределения шума. Говоря точнее, он определяет статистическую связь между тремя отсчетами процесса и является Фурье-преобразованием кумулянтной функции третьего порядка. Для гауссова случайного процесса биспектр равен нулю. В настоящей работе выполнено тестирование биспектрального анализа на примере $1/f$ шума детально изученных ранее GaAs эпитаксиальных пленок.

Для объяснения возникновения $1/f$ шума создано большое количество моделей. Во многих из них шум трактуется либо как суперпозиция случайных релаксационных процессов (например, генерационно–рекомбинационных), имеющих лоренцев спектр, либо как случайная последовательность импульсов, то есть сумма большого числа единичных процессов. В первом случае шум может быть представлен суперпозицией случайных телеграфных процессов, во втором – пуассоновской суперпозицией элементарных импульсов.

На данный момент можно выделить две основные модели, нашедшие применение в полупроводниках. Одна из них – модель Мак Уортера, описывающая генерацию шума за счет изменения концентрации электронов в результате их захвата и испускания ловушками, сосредоточенными в слое (поверхностного) окисла. Другая модель применяется для описания объемного механизма происхождения $1/f$ шума. Это – модель бистабильных дефектов, формируемых, предположительно, дефектами в кристаллической решетке образца, природа и свойства которых требуют дополнительного исследования.

Помимо изучения фундаментальных аспектов, касающихся природы $1/f$ шума, отдельный интерес представляет практическое приложение шумового анализа. В частности, представляет интерес исследование шума $1/f$ приборов, в которых он ранее не измерялся. Так, данных о фликкерном шуме в полевых транзисторах с затвором Шотки, в отличие от МОП (металл–окисел–полупроводник) и МДП (металл–диэлектрик–полупроводник) структур, на сегодняшний день практически нет. Кроме того, обзор литературы показал, что для анализа шумов в полевых транзисторах, в основном, используются образцы с самой простой геометрией, в которых контакты стока и истока примыкают вплотную к области под затвором. В более сложных структурах шумы до сих пор не исследовались.

Одним из направлений, активно развиваемых в течение многих лет, является использование $1/f$ шумового анализа в качестве неразрушающего инструмента диагностики качества структуры прибора. Во 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 структуры. В частности,

результаты измерения параметра формы спектра позволяют отбраковывать потенциально ненадежные образцы.

Цели диссертационной работы: На примере детально изученных ранее GaAs эпитаксиальных пленок развитие модели (бистабильных дефектов) объемного происхождения $1/f$ шума (флуктуаций удельного сопротивления образца). Получение дополнительной информации о природе и свойствах бистабильных дефектов.

Определение возможностей биспектрального анализа в качестве нового метода исследования природы $1/f$ шума.

Исследование $1/f$ шума прототипов планарных субмикронных GaAs полевых транзисторов с затвором Шотки (ПТШ). Определение удельного вклада в шум от бистабильных дефектов, расположенных в разных участках проводящей области (между истоком и затвором, стоком и затвором и под затвором).

Разработка модели для описания семейства измеренных вольтамперных характеристик ПТШ, которая позволила бы уточнить электрофизические параметры образцов и размеры активной области канала (расположенной под затвором) в зависимости от прикладываемых напряжений, необходимые для шумового анализа.

Совместный анализ изменения электрофизических параметров и $1/f$ шума в результате естественного старения транзисторов.

Исследование параметра формы спектра $1/f$ шума для выявления потенциально ненадежных образцов.

Научная новизна:

На примере тестовых объектов (GaAs эпитаксиальных пленок) уточнена модель объемного происхождения $1/f$ шума, основанная на представлении о бистабильных дефектах. В качестве дефектов рассмотрены диполи, образованные донорно-акцепторными парами. Введено понятие компоненты полной подвижности электронов, обусловленной рассеянием на одном дефекте. Флуктуации этой компоненты, возникающие вследствие стохастического переключения состояний дефекта (ориентации диполя в кристаллической решетке), позволяют описать вклад в $1/f$ шум от одного дефекта. Оценены флуктуации для полевых транзисторов и GaAs эпитаксиальных пленок. Обнаружена их идентичность. Атомы ионизированной легирующей примеси не приводят к генерации наблюдаемого шума.

Впервые для исследования $1/f$ шума применен биспектральный анализ. Выявлена низкая точность измерений, недостаточная для получения достоверной информации. Показано, что достижение необходимой точности в проводимых экспериментах является физически невозможным.

Предложено описание измеренного семейства вольтамперных характеристик планарных GaAs субмикронных полевых транзисторов с затвором Шотки,

основанное на модели Шокли, дополненной учетом эффекта стягивания линий тока в проводящей области ПТШ. Измерение семейства ВАХ проводилось в омической области при малых значениях напряжения, прикладываемого к контактам стока и истока. В результате обработки экспериментальных данных уточнены следующие электрофизические параметры образцов: концентрация и подвижность носителей тока, величина встроенного потенциала, расстояние от затвора до буферного слоя (технологическая высота канала), сопротивление пассивных участков и омических контактов. Оценена точность их определения согласно данной методике. Определено изменение геометрии активной области канала (под затвором) в зависимости от прикладываемых напряжений.

Впервые исследован $1/f$ шум в субмикронных планарных GaAs полевых транзисторах с затвором Шотки. Выполнены оценки относительного вклада в шум от разных фрагментов проводящей области транзистора. Показано, что основной вклад дают бистабильные дефекты, расположенные в области под затвором. В некоторых образцах выявлена повышенная концентрация бистабильных дефектов около буферного слоя.

Выявлены эффекты естественного старения полевых транзисторов в ВАХ и $1/f$ шуме. Анализ величины полной подвижности электронов, определенной из ВАХ, показал наличие дополнительного механизма рассеяния (в дополнение к двум основным – на решетке и легирующей примеси). Сравнение значений подвижности и концентрации свободных электронов до и после естественного трехлетнего старения показало, что в качестве дополнительных рассеивателей следует искать избыточные дефекты, не приводящие к изменению концентрации свободных электронов. Были рассмотрены диполи, образованные донорно-акцепторными парами. Оценена их концентрация. Данные, полученные из сравнительного анализа семейств ВАХ и спектров $1/f$ шума, позволяют предположить, что бистабильными дефектами являются выявленные избыточные дефекты.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Определены возможности биспектрального анализа в применении к $1/f$ шуму. На примере GaAs эпитаксиальных пленок выявлена низкая точность измерения биспектра в проводимых экспериментах, явно недостаточная для получения дополнительной информации с использованием данного вида анализа. Показано, что для повышения точности необходимо существенное (на несколько порядков величины) увеличение объема массивов данных, недоступное в реальном эксперименте.

Получены новые данные о природе бистабильных дефектов, лежащих в основе модели объемного происхождения шума (флуктуаций удельного сопротивления). В качестве бистабильных дефектов рассмотрены диполи (донорно-акцепторные пары); ионизованные атомы основной и компенсирующей примесей исключены. Для

определения вклада в измеренный шум от одного бистабильного дефекта введено понятие компоненты подвижности, обусловленной рассеянием на одном дефекте, флуктуации которой отражают стохастическое переключение между метастабильными состояниями (смену ориентации диполя в кристаллической решетке). Выявлена идентичность изменения введенной компоненты подвижности в эпитаксиальных пленках и полевых транзисторах Шотки, изготовленных на основе GaAs.

Предложена модель для описания семейства измеренных вольтамперных характеристик планарных полевых транзисторов. В основу положена модель Шокли, дополненная учетом эффекта стягивания линий тока в приканальных областях.

Исследован $1/f$ шум планарных GaAs субмикронных полевых транзисторов с затвором Шотки. В предположении о равномерном распределении бистабильных дефектов в проводящей области оценены спектры флуктуаций сопротивления различных областей ПТШ – канала (под затвором) и пассивных областей (расположенных между контактами затвора и стока, затвора и истока, включая области под контактами). Показано, что основной вклад в измеренный шум вносят бистабильные дефекты, сосредоточенные в области под затвором, а вклад от пассивных областей и омических контактов пренебрежимо мал. В некоторых образцах выявлено повышенное содержание бистабильных дефектов в окрестности буферного слоя.

В результате обработки семейства вольтамперных характеристик ПТШ с применением разработанной модели были уточнены электрофизические параметры образцов: концентрация и подвижность носителей; сопротивление пассивных областей затвора-истока, затвора-стока и омических контактов; высота канала; величина встроенного потенциала. Оценена точность их определения согласно данной методике. Определено изменение геометрии активной области канала (под затвором) в зависимости от прикладываемых напряжений.

Выявлено изменение электрофизических параметров и $1/f$ шума транзисторов в результате естественного старения.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Метод определения электрофизических параметров и зависимости размеров канала (области, расположенной под затвором) от прикладываемых напряжений в субмикронных планарных полевых транзисторах с плоским затвором Шотки (ПТШ) из анализа семейства измеренных вольтамперных характеристик на основании модели Шокли, дополненной учетом стягивания линий тока.
2. Методика определения вклада от разных фрагментов проводящей области ПТШ в $1/f$ шум на основании предположения о равномерном распределении бистабильных дефектов. Модель с повышенной концентрацией дефектов в окрестности буферного слоя.

3. Эффекты естественного старения транзисторов в ВАХ и спектре $1/f$ шума. Изменение электрофизических параметров ПТШ и возрастание спектра относительных флуктуаций удельного сопротивления проводящих областей.
4. Модель бистабильных дефектов. Определение параметров модели при рассмотрении в качестве бистабильных дефектов диполей, образованных донорно-акцепторными парами, спонтанно изменяющими свою ориентацию в кристаллической решетке. Получение новой информации о природе и свойствах дефектов из совместного анализа полной подвижности электронов и спектра $1/f$ шума.
5. Выявление потенциально ненадежных образцов по результатам измерения параметра формы спектра.
6. Определение возможностей биспектрального анализа при исследовании $1/f$ шума.

Апробация результатов работы и публикации:

Основные результаты диссертационной работы отражены в 26 научных публикациях, в том числе в 4 статьях в рецензируемых изданиях [1 – 4]. Сделаны и опубликованы доклады на международных и российских научных конференциях, совещаниях и семинарах:

- международные конференции “Noise and Fluctuations” (“ICNF-2003”, 18–22.08.2003, Чехия [5, 6]), “NATO Advanced Research Workshop” (14–16.08.2003, Чехия [7]);
- ежегодные международные научно-методические семинары “Шумовые и деградиационные процессы в полупроводниковых приборах” (2002–2005, МНТОРЭС им. А.С.Попова, Москва [8–11]).

Часть результатов опубликована в трудах ежегодных рабочих совещаний по проекту НАТО SfP-973799 Semiconductors, “Разработка радиационно стойких полупроводниковых приборов для систем связи и прецизионных измерений с использованием шумового анализа” (2002–2003 гг.).

Результаты работы докладывались на семинарах кафедры бионики и статистической радиофизики ННГУ, а также Научных конференциях по радиофизике (2001–2005 гг.); VII Нижегородской сессии молодых ученых (Н.Новгород, 2002 г.); XIV “Отраслевом координационном научно-техническом семинаре по СВЧ технике” (ФГУП «НПП “Салют”» 5-8 сентября 2005 г.); на семинаре ИФМ РАН, секция: Физика полупроводников (2006 г.).

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения, двух приложений, списка цитируемой литературы, а также списка условных обозначений. Общий объем диссертации составляет 91 страниц, включая 39 рисунков и 5 таблиц.

Краткое содержание диссертации:

Во **Введении** показана актуальность рассматриваемой темы исследования, изложено современное состояние подобных исследований в мире, приведены

результаты, выносимые на защиту. Кратко изложено содержание работы по каждой главе.

Первая глава диссертации имеет базисный характер. Она содержит сравнительный анализ компонент подвижности, обусловленных рассеянием на решетке, ионизованных атомах, а также на диполях. Представлены результаты исследования, направленного на выявление природы $1/f$ шума GaAs эпитаксиальных пленок. В основу положена модель бистабильных дефектов, в рамках которой выполнялся поиск возможных источников шума.

Измерен биспектр $1/f$ шума, обнаружена низкая точность измерений, недостаточная для получения достоверной информации из биспектрального анализа.

В разделе 1.1 рассмотрены компоненты полной подвижности электронов, обусловленные рассеянием на решетке, ионизованных атомах и диполях. Проведен сравнительный анализ интенсивностей рассеяния трех представленных механизмов.

В разделе 1.2 рассмотрена модель $1/f$ шума, в которой предполагается, что шум генерируется бистабильными дефектами в кристаллической структуре полупроводника.

Переключения состояний дефекта описываются энергетической диаграммой, которая в упрощенном виде может быть представлена двухуровневой системой (ДУС), разделенной относительно низким потенциальным барьером ΔE (см. рис. 1). В случае симметричной ДУС разница глубин ΔE_b равна нулю.

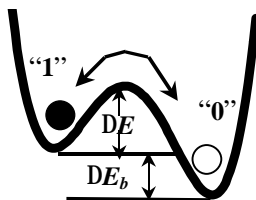


Рисунок 1 Энергетическая диаграмма (двухуровневая система) бистабильного дефекта.

Стохастические переключения состояний дефекта приводят к изменениям электрофизических параметров прибора, имеющим характер случайного телеграфного процесса. Ансамбль дефектов в полупроводнике при определенных условиях образует шум со спектром вида $1/f$.

В разделе 1.3 приведено описание геометрических и электрических параметров исследуемых GaAs эпитаксиальных пленок, а также метода их изготовления и дальнейшей обработки (облучения и отжига).

В разделе 1.4 представлены результаты исследования температурных зависимостей концентрации и полной подвижности электронов в рассматриваемых пленках. Из первой зависимости определены концентрации доноров и акцепторов, составившие до облучения – $1,7 \cdot 10^{16} / 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и после облучения и отжига –

$1,46 \cdot 10^{16} / 2,6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Из анализа полной подвижности выявлено наличие дополнительного (к рассеянию на решетке и донорах/акцепторах) механизма рассеяния. Выполнены оценки концентрации избыточных рассеивателей в предположении, что ими могут быть диполи, образованные донорно-акцепторными парами.

В разделе 1.5 представлены результаты обработки спектра $1/f$ шума пленок. Для него в рамках модели бистабильных дефектов выполнены оценки компоненты полной подвижности электронов, обусловленной рассеянием на одном дефекте. Выдвинуто предположение, что бистабильными дефектами, ответственными за генерацию $1/f$ шума, являются избыточные дефекты, выявленные при исследовании температурной зависимости полной подвижности.

В разделе 1.6 исследуются биспектральные характеристики $1/f$ шума эпитаксиальных пленок. На примере избыточных дефектов, концентрация которых определена из исследования температурной зависимости полной подвижности, выполнена оценка модуля биспектра в модели пуассоновского $1/f$ шума. В точке (1 Гц, 1 Гц) она оказалась примерно в 100 раз меньше измеренного биспектра. Это может быть следствием либо негауссовости шума, либо неприменимости пуассоновской модели к исследуемому $1/f$ шуму.

В этом разделе также выполнена оценка статистической ошибки измерения биспектра НЧ шума в GaAs пленках. Обнаружено, что экспериментальные результаты не выходят за границы статистической погрешности. Иначе говоря, выявлена неудовлетворительно низкая точность биспектрального анализа в данных измерениях.

Раздел 1.7 содержит заключение к первой главе.

Во второй главе представлены результаты исследования вольтамперных характеристик (ВАХ) и спектра $1/f$ шума планарных субмикронных GaAs полевых транзисторов с плоским затвором Шотки.

В разделе 2.1 содержится описание экспериментальных установок, используемых для измерения ВАХ и шума ПТШ. Измерение семейства вольтамперных характеристик осуществлялось с помощью модуля SC-2075 фирмы National Instruments. Сбор данных производился автоматически с помощью специально разработанного автором приложения, выполненного в программной среде LabVIEW. Анализ оцифрованных записей шума проводился при помощи многофункционального анализатора, выполненного в программной среде LabVIEW.

В разделе 2.2 представлены результаты измерения и обработки семейства ВАХ. Измерения проводились в омической области при малых напряжениях между стоком и истоком. Пример семейства ВАХ типичного свежеизготовленного ПТШ приведен на рис. 2.

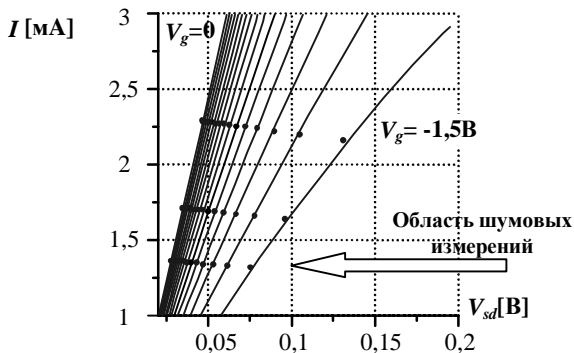


Рисунок 2 ВАХ (●●●) типичного свежеизготовленного ПТШ при $V_g=0\pm(-1,5)V$,
(—) результаты моделирования.

При моделировании проводящая область транзистора разбивалась на четыре области (см. рис. 3): канал – “1”, приканальные участки – “2”, области стягивания линий тока – “3”, приконтактные области (включающие омические контакты) – “4”; здесь “2”, “3” и “4” образуют пассивные области.

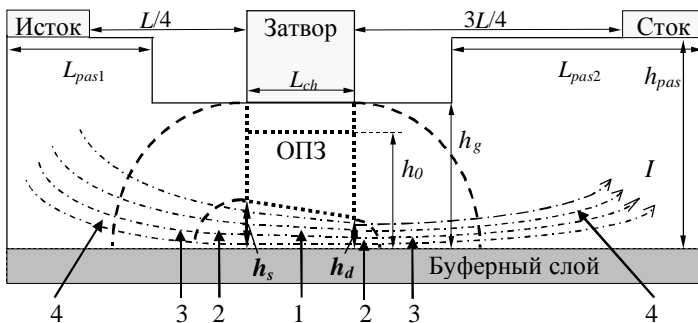


Рисунок 3 Схематическое представление транзистора.

Анализ ВАХ выполнен при помощи модели Шокли, дополненной учетом стягивания линий тока в пассивных областях прибора. Погрешность аппроксимации ВАХ в обследованном диапазоне напряжений не превышала 5%.

В результате обработки семейства ВАХ были уточнены электрофизические параметры транзисторов (подвижность и концентрация электронов, высота канала под затвором и величина встроенного потенциала). Погрешность определения параметров составила 2–6%. Оценены последовательные сопротивления пассивных участков и омических контактов. Уточнены размеры канала и их зависимость от прикладываемых напряжений.

Исследование подвижности выявило наличие дополнительного механизма рассеяния на избыточных дефектах. Выполнены оценки концентрации последних в предположении, что они образованы диполями.

Определены изменения параметров ПТШ в результате естественного трехлетнего старения. Обнаружено увеличение в 2,2 раза полной подвижности электронов и уменьшение сопротивления омических контактов примерно в 50 раз. Возрастание подвижности свидетельствует об уменьшении концентрации избыточных дефектов в 3,5 раза.

В разделе 2.3 представлены результаты исследования спектра $1/f$ шума.

В качестве меры интенсивности измеренного $1/f$ шума использован параметр Хоухе a , имеющий смысл спектра относительных флуктуаций удельного сопротивления проводящего объекта на частоте 1 Гц, в пересчете на один носитель тока. Его значение для свежизготовленных образцов составило 10^{-4} , что свидетельствует о низкой интенсивности шума, поскольку типичным считается значение $a = 10^{-3}$.

Оценен вклад в $1/f$ шум ПТШ от бистабильных дефектов, расположенных в области под затвором и в пассивных областях (между затвором и истоком, затвором и стоком), в предположении о равномерном распределении дефектов по объему проводящей области (см. рис. 4). Показано, что основной вклад в измеренный шум дают дефекты, сосредоточенные в области под затвором.

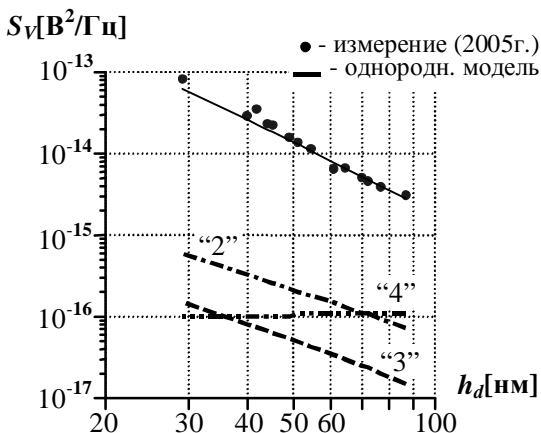


Рисунок 4 Зависимости от высоты канала со стороны стока h_d :

(●) спектра шумов напряжения сток-исток на частоте 30 Гц для типичного ПТШ; (- - -), (---), (-·-·-) вкладов в спектр от бистабильных дефектов, расположенных в областях "2"-"4"; (—) спектра, полученного в рамках модели.

В некоторых образцах эта модель дала неудовлетворительное описание измеренных данных в окрестности малых значений высоты канала. Для объяснения полученного расхождения выдвинуто предположение о повышенном содержании дефектов в окрестности буферного слоя, см. рис. 5.

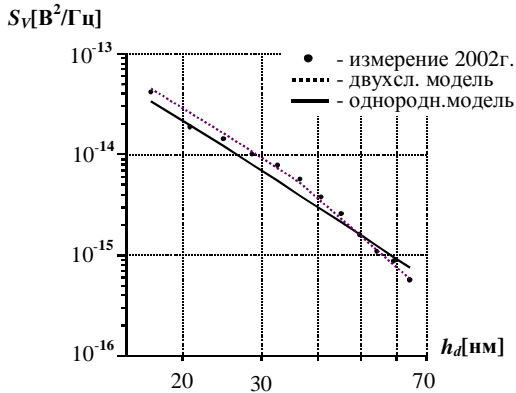


Рисунок 5 Зависимость спектра от высоты канала: (●) измеренные значения, (—) данные однородной модели, (- - -) данные “двухслойной” модели.

Предложена упрощенная модель “двухслойной” распределения дефектов (с повышенной концентрацией вблизи буферного слоя). Видно, что эта модель удовлетворительно описала измеренную зависимость, подтвердив наше предположение.

Исследовано проявление естественного старения в спектре шума (см. рис. 6). Обнаружено возрастание относительных флуктуаций удельного сопротивления спустя три года.

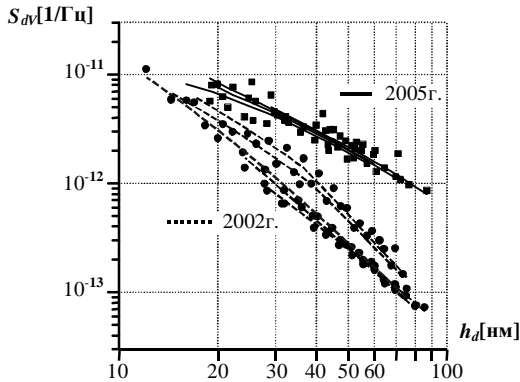


Рисунок 6 Зависимость спектра относительных флуктуаций напряжения на частоте 30Гц от высоты канала у стока: (●) измерения 2002 года, (■) измерения 2005 года, (- - -), (—) результаты моделирования.

Для объяснения такого возрастания необходимо допустить уменьшение концентрации бистабильных дефектов примерно в 3,2 раза, что находится в удовлетворительном согласии с выявленным уменьшением концентрации избыточных дефектов (3,5 раза). Это позволило предположить, что бистабильными дефектами, ответственными за появление $1/f$ шума, являются избыточные дефекты, выявленные при обработке семейства ВАХ исследуемых прототипов ПТШ.

При рассмотрении в качестве бистабильных дефектов диполей, образованных донорно-акцепторными парами, выполнена оценка изменения подвижности электронов, вызванного стохастическим изменением ориентации единичного диполя в кристаллической решетке. Полученная величина принимает физически допустимое значение, приближенно совпадающее с аналогичным результатом, полученным для GaAs пленок.

Представлены результаты измерения токовой зависимости спектра флуктуаций напряжения при открытом и сильно запертом канале. При больших напряжениях на затворе обнаружен нетипично быстрый степенной рост. Предполагается, что полученная особенность связана с токами утечки через буферный слой. Анализ ВАХ с использованием разработанной модели при больших запирающих напряжениях не дает достоверной информации из-за неприменимости модели. Результат имеет предварительный характер и требует дополнительного исследования.

В разделе 2.4 приведен анализ параметра g формы спектра $1/f$ шума, позволяющий выявлять нестабильные образцы (см., напр., рис. 7). Показано, что в результате тренировки ПТШ величина g уменьшается, что свидетельствует о стабилизации структуры транзистора.

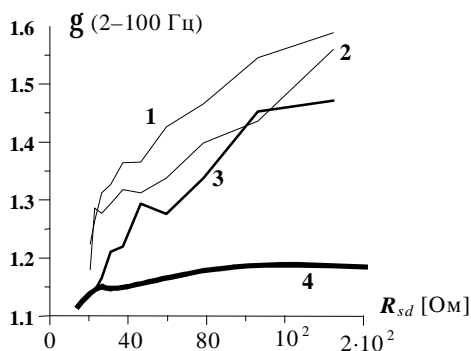


Рисунок 7 Зависимость параметра формы спектра от сопротивления истоков–сток для нестабильного образца: 1 – до тренировки, 2 и 3 – после 2 и 4 дней работы при предельных значениях прикладываемых напряжений, 4 – типичная для данных приборов.

Для нестабильного образца выполнена обработка семейства ВАХ и определены электрофизические параметры до и после тренировки. Обнаружено, что канал до тренировки имел двухслойную структуру, характеризующуюся различными значениями подвижности и концентрации электронов. После тренировки канал стал однороднее, с более низким значением подвижности. Полученные данные имеют предварительный характер и нуждаются в дальнейшем исследовании.

В разделе 2.5 содержатся выводы по второй главе.

В **Заключении** подведены итоги проведенной работы. Изложены основные результаты и выводы.

В **Приложении 1** приведены основные характеристики приборов, входящих в состав установки, используемой для измерения шума.

В **Приложении 2** описан программный комплекс ADSViewer, специально созданный для обработки экспериментальных шумовых данных.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 01–02–16666, 04–02–16708–а; грантов Министерства образования и науки РФ № 00–15–96620 и НШ–1729.2003.2 – “Ведущие научные школы”; гранта Отделения Науки НАТО (Программа “Наука ради Мира”) SfP-973799 Полупроводники; гранта Министерства образования и науки РФ № 4616. Представленные исследования связаны с работами, выполняемыми в ННГУ в рамках приоритетного национального проекта “Образование”, образовательно-научный центр “Информационно-телекоммуникационные системы: физические основы и математическое обеспечение”, лаборатория 2032 “Современные системы обработки сигналов”.

Основные результаты и выводы:

1. На примере GaAs эпитаксиальных пленок уточнена модель объемного происхождения $1/f$ шума (флуктуаций удельного сопротивления), основанная на представлении о бистабильных дефектах. При исследовании температурной зависимости подвижности электронов выявлены избыточные дефекты, в качестве которых рассмотрены диполи, образованные донорно-акцепторными парами. Показано, что они могут образовывать бистабильные дефекты, приводящие к генерации $1/f$ шума. Атомы ионизированной легирующей примеси не могут быть причиной $1/f$ шума.

2. Исследованы возможности биспектрального анализа в качестве нового метода исследования природы $1/f$ шума. Выявлена его неприменимость из-за низкой точности измерения биспектра шума, обусловленной невозможностью получения требуемых больших массивов данных в реальном физическом эксперименте.

3. Предложен метод обработки измеренного семейства вольтамперных характеристик субмикронных планарных GaAs полевых транзисторов с затвором Шотки (ПТШ) при помощи модели Шокли, дополненной учетом эффекта стягивания линий тока в областях, прилегающих к каналу. Методика позволила уточнить электрофизические параметры образцов, такие как концентрация и подвижность носителей тока, сопротивление пассивных областей, высота канала, величина встроенного потенциала. Показана удовлетворительная точность предложенного метода. Определено изменение геометрии активной области канала (под затвором) в зависимости от прикладываемых напряжений.

4. С учетом уточненных электрофизических параметров исследован $1/f$ шум ПТШ. Показано, что обследованные приборы характеризуются относительно низкой интенсивностью шума. В предположении об однородном распределении бистабильных дефектов в проводящей области транзистора показано, что основной вклад в измеренный шум дают дефекты, расположенные в канале, шум от других областей и омических контактов пренебрежимо мал. В некоторых образцах выявлено повышенное содержание бистабильных дефектов в окрестности буферного слоя.

5. Совместное исследование изменения электрофизических параметров и спектра $1/f$ шума, произошедшего после естественного трехлетнего старения, позволило предположить, что бистабильными дефектами являются избыточные дефекты, выявленные при обработке семейства ВАХ ПТШ.

6. Выполнены оценки изменения подвижности электронов, обусловленного спонтанным переключением состояния бистабильного дефекта в предположении, что дефект образован диполем. Оценки, полученные для GaAs пленок, приближенно совпали с аналогичными оценками для ПТШ. Этот результат свидетельствует об общности механизма возникновения $1/f$ шума в рассмотренных приборах, выполненных на основе GaAs.

Список основных работ по теме диссертации:

1. Исследование $1/f$ шума в наноразмерных полупроводниковых структурах / А.В. Беляков, А.В. Моряшин, М.Ю. Перов, А.В. Якимов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика, 2004. – Выпуск 2. – С. 143 – 154.
2. Тестирование квазибаллистических ПТШ по $1/f$ шуму / А. В. Беляков, М. А. Китаев, А. В. Моряшин, С. В. Оболенский, М. Ю. Перов, Л. К. Дж. Фандамме, А. В. Якимов // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2005. – Т. 48, № 3. – С. 269 – 274.
3. 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. 2007. – Вып. 1. – С. 78 – 83.
4. Проявление естественного старения субмикронных GaAs ПТШ в ВАХ и спектре $1/f$ шума / А. В. Моряшин, С. В. Оболенский, М. Ю. Перов, А. В. Якимов // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2007 (в печати).
5. $1/f$ noise in *InAs/GaAs* quantum dots and *InGaAs/GaAs/InGaP* quantum well LEDs and in quantum well laser diodes / M. Yu. Perov, N. V. Baidus, A. V. Belyakov, A. V. Moryashin, S. M. Nekorkin, L. K. J. Vandamme, A. V. Yakimov // Proceedings of the 17th International Conference “Noise and Fluctuations”, August 18 – 22, 2003, Prague, Czech Republic. – 2003. – P. 393 – 396.
6. Bispectrum of the $1/f$ noise in semiconductor devices / A. V. Yakimov, A. V. Belyakov, A. V. Moryashin, M. Yu. Perov, L. K. J. Vandamme // Proceedings of the 17th International Conference “Noise and Fluctuations”, August 18 – 22, 2003, Prague, Czech Republic. – 2003. – P. 71 – 74.
7. Measurement technique for investigation of non-Gaussian and non-stationary properties of LF noise in nanoscale semiconductor devices / A. V. Belyakov, S. Yu. Medvedev, A. V. Moryashin, M. Yu. Perov, A. V. Yakimov // “Advanced experimental methods for noise research in nanoscale electronic devices. NATO Advanced Research Workshop”, August 14 – 16, 2003. – Brno University of Technology, Czech Republic. – 2003. – P. 37.
8. $1/f$ шум GaAs эпитаксиальных пленок в модели двухуровневых систем / А. В. Моряшин, А. В. Якимов // Материалы XXXII международного научно-методического семинара “Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах”. – МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2002. – С. 80 – 84.
9. НЧ шумы в наноразмерных светоизлучающих структурах / А. В. Беляков, А. В. Моряшин, М. Ю. Перов, А. В. Якимов, Л. К. Дж. Фандамме // Материалы XXXIII международного научно-методического семинара “Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах”. – МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2003. – С. 5 – 13.

10. Исследование зависимости НЧ шума от ширины канала в GaAs квазибаллистических полевых транзисторах / А.В. Беляков, М.А. Китаев, А.В. Моряшин, С.В. Оболенский, М.Ю. Перов, А. В. Якимов, Л. К. Дж. Фандамме // Материалы XXXIV международного научно-методического семинара "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах". – МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2004. – С. 208 – 209.
11. Проявление естественной деградации ПТШ в ВАХ и $1/f$ шуме / М.А. Китаев, А.В. Моряшин, С.В. Оболенский, М.Ю. Перов, А. В. Якимов // Материалы XXXV международного научно-методического семинара "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах". – МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2006. – С. 39 – 44.

Оглавление диссертации

Введение

1. Шум $1/f$ GaAs эпитаксиальных пленок в модели бистабильных дефектов

1.1. Подвижность носителей тока

1.1.1. Рассеяние электронов на ионизованных примесях 1.1.2. Рассеяние на диполях

1.1.3. Рассеяние на нейтральных мелких донорах 1.1.4. Сравнительный анализ компонент подвижности носителей тока

1.2. Модель $1/f$ шума на основе ансамбля ДУС

1.2.1. Спектр СТП, образованного бистабильным дефектом 1.2.2. Синтез спектра $1/f$ шума в модели ансамбля СТП 1.2.3. Оценивание высот потенциальных барьеров ДУС

1.3. Исследуемые образцы и экспериментальная установка

1.4. Анализ температурных зависимостей

1.4.1. Концентрация электронов 1.4.2. Полная подвижность электронов

1.5. Оценка флуктуаций подвижности, обусловленных переключением бистабильных дефектов

1.6. Исследование биспектра $1/f$ шума

1.6.1. Введение 1.6.2. Измерение биспектра НЧ шума 1.6.3. Оценка биспектра $1/f$ шума 1.6.4. Оценка статистической ошибки измерения биспектра

1.7. Заключение к первой главе

2. Фликкерный шум субмикронных полевых транзисторов с затвором Шотки

2.1. Измерительная аппаратура

2.1.1. Установка для измерения вольтамперной характеристики 2.1.2. Установка для шумовых измерений

2.2. Вольтамперные характеристики

2.2.1. Моделирование ВАХ 2.2.2. Экспериментальные данные 2.2.3. Обсуждение параметров модели

2.3. Исследование спектра $1/f$ шума

2.3.1. Интенсивность $1/f$ шума разных областей канала транзистора 2.3.2. Диполи в качестве бистабильных дефектов 2.3.3. Проявление естественного старения ПТШ в $1/f$ шуме 2.3.4. Исследование параметра формы спектра шума 2.3.5. Токовые зависимости

2.4. Выявление и тренировка нестабильных образцов

2.5. Заключение ко второй главе

Заключение

Приложение 1. Основные характеристики приборов установки для измерения $1/f$ шума

Приложение 2. Программный комплекс для исследования НЧ шума ПТШ

Список литературы

Список условных обозначений

Подписано в печать 5.04.2007. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 394

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