

На правах рукописи

Моряшин Алексей Владимирович

**Шум $1/f$ и эффекты естественного старения
субмикронных планарных GaAs полевых
транзисторов с затвором Шотки**

01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2006

Работа выполнена в Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Якимов Аркадий Викторович.

Официальные оппоненты:

кандидат физико-математических наук, доцент Дубков Александр Александрович,

доктор физико-математических наук, профессор Жигальский Геннадий Павлович.

Ведущая организация: Институт физики микроструктур РАН.

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

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 “_____” _____ 2006 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат физико-математических наук, доцент

Черепенников 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.

Наиболее распространенным и, в то же время, менее изученным видом низкочастотных шумов является фликкерный шум или “ $1/f$ шум” со 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 о фундаментальности $1/f$ шума. Если бы это явление было фундаментальным, то шум во всех исследуемых объектах имел бы одинаковый механизм возникновения и обладал бы одинаковыми свойствами. В действительности, в некоторых приборах обнаружена зависимость 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 измерения $1/f$ шума проводятся около 80 лет, его природа, по-прежнему, остается до конца не описанной.

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; корреляционный тест (измерение коэффициента 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, ранее не применяемых к $1/f$ шуму.

Одним из известных методов исследования “нулевой” гипотезы является анализ биспектра случайного процесса. Биспектр отражает связь второго порядка, характеризующую несимметричность распределения шума. Он определяет статистическую связь между тремя отсчетами процесса и является Фурье-преобразованием кумулянтной функции третьего порядка. Известно, что для гауссова стационарного случайного процесса биспектр равен нулю. В настоящей работе, выполнено тестирование биспектрального анализа на примере $1/f$ шума детально изученных 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 – суперпозицией пуассоновских процессов.

На данный момент можно выделить две основные модели, нашедшие применение в полупроводниках. Это модель Мак Уортера, описывающая поверхностный механизм генерации шума за счет изменения концентрации электронов в результате их захвата и испускания поверхностными ловушками. 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, исследование шума приборов, в которых он ранее не измерялся. Так, о фликкерном шуме в полевых транзисторах с затвором Шотки, в отличие от МОП (металл–окисел–полупроводник) и МДП (металл–диэлектрик–полупроводник) структур, работ практически нет. Кроме того, обзор литературы показал, что для шумового анализа в полевых транзисторах, в основном, используют образцы с самой простой геометрией. Такие, 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 последние годы, 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,

измерение величины параметра формы спектра позволяет отбраковывать потенциально ненадежные образцы.

Цели диссертационной работы: На примере детально изученных 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. Определение интенсивности шума 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 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. Рассмотрены два альтернативных варианта дефектов: нейтральные атомы примеси и диполи. Введено понятие компоненты полной подвижности электронов, обусловленной рассеянием на одном дефекте. Флуктуации этого параметра, возникающие вследствие переключения состояний дефекта, позволяют описать вклад в $1/f$ шум от одного дефекта. Оценены флуктуации этого параметра для полевых транзисторов и GaAs эпитаксиальных пленок. Обнаружена их идентичность. Показано, что дефекты могут быть сформированы как нейтральными атомами примеси, так и диполями. Для исключения одного из вариантов необходимы дальнейшие исследования. Атомы ионизированной легирующей примеси не приводят к генерации наблюдаемого шума.

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

Впервые проведено моделирование измеренного семейства вольтамперных характеристик планарных GaAs субмикронных полевых транзисторов на основании модели Шокли, дополненной учетом эффекта стягивания линий тока в областях канала, прилегающих к затвору. 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 интенсивности шума от разных фрагментов проводящей области транзистора. Показано, что основной вклад дают дефекты, расположенные в области под затвором. В нескольких образцах выявлена повышенная концентрация бистабильных дефектов около буферного слоя.

Выявлены эффекты естественного старения полевых транзисторов в ВАХ и $1/f$ шуме. Анализ определенного из ВАХ значения полной подвижности электронов показал наличие третьего механизма рассеяния в дополнение к двум основным (на решетке и легирующей примеси). Сравнение электрофизических параметров до и после естественного трехлетнего старения показало, что в качестве дополнительных рессеивателей следует искать избыточные нейтральные дефекты. Компенсирующая ионизованная примесь исключается. В работе рассмотрены два альтернативных варианта: атомы нейтральной примеси и диполи. Оценены их концентрации. Данные, полученные из сравнительного анализа семейства ВАХ и спектров $1/f$ шума, позволяют предположить, что бистабильными дефектами является выявленная нейтральная примесь.

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 физическом эксперименте.

Получены новые данные о природе бистабильных дефектов, лежащих в основе модели объемного происхождения шума (флуктуаций удельного сопротивления). В качестве бистабильных дефектов рассмотрены два альтернативных варианта:

нейтральные атомы примеси и диполи; 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 переключение между метастабильными состояниями. Для каждого из типов дефектов (нейтральных атомов и диполей) выявлена идентичность изменения введенной компоненты подвижности в эпитаксиальных пленках и полевых транзисторах Шотки, изготовленных на основании 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.

Впервые 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 подконтактные области). 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 участков; 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. Уточнение электрофизических параметров, зависимости размеров канала (области, расположенной под затвором) от прикладываемых напряжений экспериментальных субмикронных планарных полевых транзисторов с плоским затвором Шотки (ПТШ) из анализа семейства измеренных вольтамперных характеристик на основании предложенной модели.
2. Определение вклада от разных фрагментов проводящей области в $1/f$ шум ПТШ в предположении о равномерном распределении бистабильных дефектов.

- Выявление в некоторых образцах повышенной концентрации дефектов в окрестности буферного слоя.
3. Выявление эффектов естественного старения транзистора в ВАХ и спектре $1/f$ шума, проявляющихся в изменении электрофизических параметров ПТШ и возрастании спектра относительных флуктуаций удельного сопротивления проводящих областей.
 4. Получение новой информации о природе и свойствах бистабильных дефектов на основе совместного анализа полной подвижности электронов и спектра $1/f$ шума. Обсуждение двух альтернативных вариантов: нейтральных атомов примеси и диполей.
 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 25 научных публикациях, в том числе в 3 статьях в рецензируемых изданиях [1 – 3]. 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 [4, 5]), “NATO Advanced Research Workshop” (14–16.08.2003, Чехия [6]);
- ежегодные международные научно-методические семинары “Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах” (2002–2005 гг., МНТОРЭС им. А.С.Попова, Москва [7-10]).

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, 2002г.); 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 страницу, включая 38 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. Во Введении также кратко изложено содержание работы по каждой главе.

Первая глава диссертации имеет базисный характер. Она содержит сравнительный анализ компонент подвижности, обусловленных рассеянием на нейтральных и 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 бистабильных дефектов.

Обработан 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 нейтральных атомах, 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 DE . В случае симметричной ДУС разница глубин DE_b равна 0.

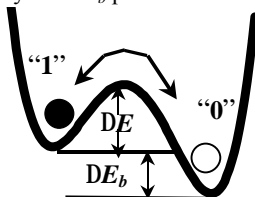


Рисунок 1 Энергетическая диаграмма (двухуровневая система) бистабильного дефекта.

Переключения дефекта приводят к изменениям электрофизических параметров прибора, имеющим характер случайного телеграфного процесса. Ансамбль дефектов в полупроводнике при определенных условиях образует НЧ 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 нейтральных и ионизованных доноров и акцепторов до облучения – $1,7 \cdot 10^{16}/10^{14} \text{ см}^{-3}$ и после облучения и отжига – $1,3 \cdot 10^{16}/5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Из анализа полной подвижности в дополнение к рассеянию на решетке и донорах/акцепторах выявлено наличие дополнительного механизма рассеяния. Выполнены оценки концентрации избыточных рассеивателей в предположении, что ими могут быть либо диполи, либо атомы нейтральной примеси.

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. Предполагается, что дефекты сформированы избыточной примесью, выявленной при исследовании температурной зависимости полной подвижности.

В разделе 1.6 исследуются биспектральные характеристики $1/f$ шума эпитаксиальных пленок. На примере нейтральной примеси, концентрация которой определена из исследования температурной зависимости полной подвижности, оценен доверительный интервал для экспериментальных данных оценки модуля биспектра гауссова процесса $1/f$ шума в модели бистабильных дефектов. В точке (1 Гц, 1 Гц) она оказалась примерно в 50 раз меньше измеренного биспектра.

В этом разделе также выполнена оценка статистической ошибки измерения биспектра НЧ шума в GaAs пленках. 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 $1/f$ шума планарных субмикронных GaAs полевых транзисторов с плоским затвором Шотки.

В разделе 2.1 содержится описание 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 шумовых записей проводился при помощи многофункционального анализатора, выполненного в программной среде LabVIEW.

В разделе 2.2 представлены результаты измерения и обработки семейства ВАХ. Измерение проводилось в омической области при малых напряжениях между стоком и истоком.

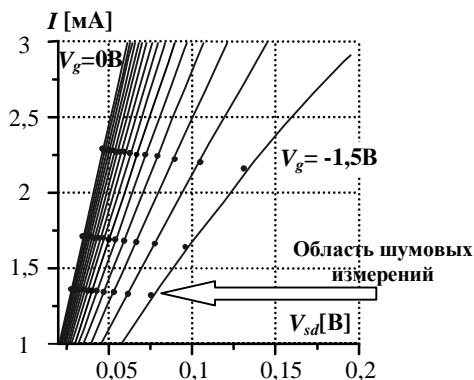


Рисунок 2 (●●●) ВАХ типичного свежеизготовленного ПТШ ($V_g=0\pm(-1,6)V$), (—) результаты моделирования.

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

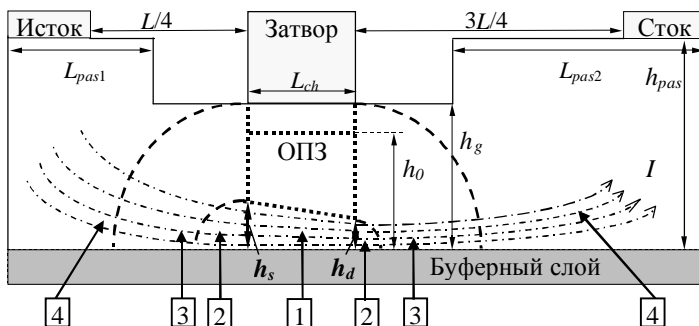


Рисунок 3 Схематическое представление транзистора.

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, 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 избыточной примеси. Выполнены оценки концентрации последней в предположении, что она образована либо нейтральными атомами, либо 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 избыточной примеси в 3,5 раза.

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

В качестве характеристики интенсивности $1/f$ шума использован параметр Хоухе a , имеющий смысл меры для спектра фликкерных флуктуаций удельного сопротивления проводящих объектов. Его значение для свежеизготовленных образцов ставило 10^{-4} , что свидетельствует о низкой интенсивности шума, поскольку типичным считается значение $a=10^{-3}$.

В модели бистабильных дефектов оценена интенсивность шума от дефектов, расположенных в области под затвором и пассивных областях между затвором и истоком и затвором – стоком, в предположении о равномерном распределении дефектов по объему проводящей области. Показано, что основной вклад в измеренный шум дают дефекты, сосредоточенные в области под затвором (вклад в спектр от них практически совпадает с измеренным спектром).

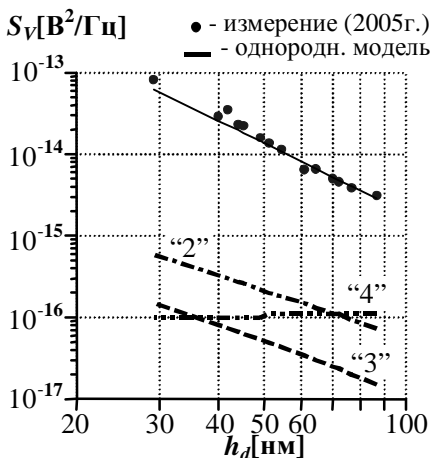


Рисунок 4 Зависимости от высоты канала со стороны стока h_d : ● спектра абсолютных флуктуаций напряжения на частоте 30 Гц типичного ПТШ; - - -, ----, -·-·-· вклады в спектр от бистабильных дефектов, расположенных в областях "2"–"4"; — спектр, полученный в рамках модели.

В нескольких образцах это предположение дало неудовлетворительное объяснение измеренных данных. Обнаружено расхождение теории и эксперимента при малых значениях высоты канала. Для объяснения полученного отклонения предположено, что в окрестности буферного слоя содержание дефектов повышено.

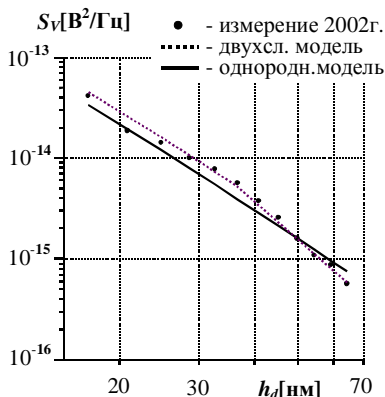


Рисунок 5 Зависимость спектра от высоты канала: ● измеренные значения, — данные однородной модели, - - - данные “двухслойной” модели.

Предложена упрощенная модель “двухслойного” 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. Обнаружено возрастание относительных флуктуаций удельного сопротивления спустя три года.

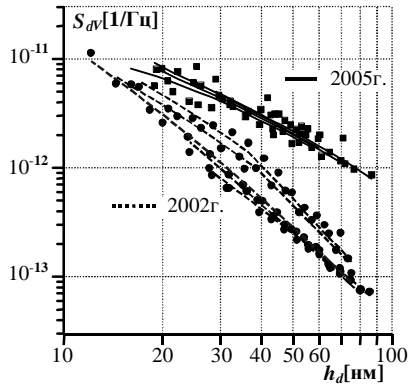


Рисунок 6 Зависимости величины спектра на частоте 30Гц от высоты канала у стока:

- данные измерений 2002 года, ■ данные измерений 2005 года, - - - результаты моделирования.

Чтобы объяснить такое возрастание, возникает необходимость допущения уменьшения концентрации бистабильных дефектов примерно в 3,2 раза, что находится в удовлетворительном согласии с выявленным уменьшением концентрации избыточной нейтральной примеси (3,5 раза). Это позволило предположить, что бистабильными дефектами, ответственными за появление $1/f$ шума, является избыточная нейтральная примесь, выявленная при обработке семейства ВАХ исследуемых прототипов ПТШ.

При рассмотрении в качестве бистабильных дефектов нейтральных атомов и диполей выполнена оценка изменения подвижности электронов, вызванного переключением состояния единичного дефекта. Полученные величины принимают физически допустимые значения. Сравнительный анализ с данными для GaAs пленок показал приближенное их совпадение для соответствующих типов дефектов.

Представлены результаты измерения токовых зависимостей 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 приведены данные для параметра формы спектра, позволяющие выявлять нестабильные образцы. Показано, что в результате тренировки параметр формы спектра уменьшается, что свидетельствует о стабилизации транзистора.

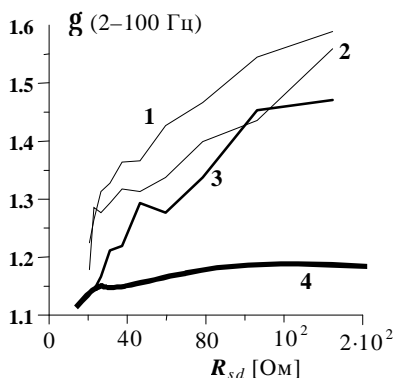


Рисунок 7 Зависимость параметра формы спектра от сопротивления R_{sd} для нестабильного образца: линия 1 – до тренировки, 2 и 3 – после тренировки (после 2 и 4 дней работы при предельных значениях прикладываемых напряжений), 4 – типичная для данных приборов.

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 концентрации электронов и подвижности. После тренировки канал стал более однородным с 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, а также 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.

Основные результаты и выводы:

1. На примере GaAs эпитаксиальных пленок уточнена модель объемного происхождения $1/f$ шума (флуктуации удельного сопротивления), основанная на представлении о бистабильных дефектах. При исследовании температурной

зависимости подвижности электронов выявлена избыточная примесь, которая, по видимому, и является источником $1/f$ шума. Рассмотрены два альтернативных варианта: нейтральные атомы и диполи. Показано, что в качестве дефектов могут выступать и те и другие. Атомы ионизованной легирующей примеси не приводят к генерации наблюдаемого 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 канала, прилегающих к затвору. Уточнены 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 является нейтральная примесь, выявленная при обработке семейства ВАХ ПТШ.

6. Выполнены оценки изменения подвижности электронов, обусловленного переключением состояния бистабильного дефекта в предположении, что дефект образован либо нейтральным атомом примеси, либо 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. 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.
2. 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.
3. 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. – 2006 (в печати).
4. $1/f$ 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.
5. Bispectrum of 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.
6. 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.
7. $1/f$ 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.
8. НЧ шум 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.
9. 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.

10. 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 нейтральных примесях 1.1.3. Рассеяние на диполях 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. Нейтральная избыточная примесь 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 11.10.2006. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 1452

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