

О Т З Ы В

официального оппонента

на диссертацию Шмаргунова Антона Владимировича «Нелинейная зависимость высоты барьера от смещения и природа аномалий характеристик контактов с барьером Шоттки», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников

Актуальность темы диссертации

Контакт металл-полупроводник (КМП), образующий барьер Шоттки (БШ), играет исключительно важную роль в микроэлектронике. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) контакта с БШ является сильно нелинейной, что необходимо для решения задач детектирования, смещения, преобразования частот сигналов и др. Малая инерционность транспортных механизмов в БШ обеспечивает малое время установления величины тока при изменении напряжения. Это свойство позволяет успешно использовать диоды с БШ при обработке сигналов вплоть до частот терагерцового диапазона. Изучение транспортных эффектов в КМП привлекало внимание исследователей с середины прошлого века. Совершенствование технологий формирования КМП заметно понизило уровень загрязнений и дефектов в структурах. На первый план вышли фундаментальные эффекты, сопутствующие явлениям термоэлектронной эмиссии в КМП и приводящие к искажениям идеальной ВАХ. Эффект туннелирования электронов создаёт дополнительный канал токопереноса и может быть существенным в сильнолегированных структурах или при низких температурах. Возможные флуктуации высоты барьера Шоттки приводят к сложной картине неоднородного протекания тока. Интерфейсные состояния в контакте являются ответственными за перераспределение потенциала при изменении напряжения смещения и существенное искажение ВАХ. Эти и другие эффекты по-разному проявляются при изменении уровня легирования полупроводника и температуры. Следует констатировать, что предпринятое в диссертации А.В. Шмаргунова комплексное теоретическое и экспериментальное изучение указанных явлений в БШ на основе арсенида галлия является важным и актуальным.

Степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации

Экспериментальный материал, представленный в диссертации, получен с использованием современного оборудования и технологий. Для диагностики ВАХ структур с БШ на основе контактов Au, Ni, Pt-Rh и Ir с GaAs предложены оригинальные методики, которые

согласуются с современными представлениями о транспортных явлениях в КМП. Теоретические модели обоснованы. Основные результаты диссертации не противоречат экспериментальным данным, известным из литературы. Достоверность результатов не вызывает сомнений. Материалы диссертационной работы докладывались на международной конференции и опубликованы в 5 статьях в журналах из перечня ВАК. В процессе научного исследования оформлен патент, защищающий способ электрохимического осаждения иридия на арсенид галлия.

Научная новизна и теоретическая значимость диссертационной работы

В диссертации получены новые научные результаты. Наиболее значимыми из них являются следующие:

1. Теоретическая модель описания ВАХ КМП на основе нелинейной зависимости высоты барьера от напряжения смещения, обусловленной неоднородным распределением интерфейсных состояний по энергии.
2. Детальное исследование экспериментальных ВАХ на основе моделей с поверхностными электронными состояниями в промежуточном слое и «тесного контакта», когда спектр приповерхностных состояний является распределённым по энергии и по координате вглубь полупроводника.
3. Анализ обширного экспериментального материала по ВАХ КМП в рамках модели Танга с неоднородной высотой барьера, свидетельствующий о существенных ограничениях данной модели в описании реальных ВАХ.

Практическая значимость диссертационной работы

Проведённый анализ ВАХ КМП имеет определённую методическую ценность и позволяет более чётко систематизировать факторы, приводящие к отклонению переноса носителей тока через барьер Шоттки от идеальной картины термоэлектронной эмиссии. Степень отклонения оценивается в диссертации с помощью показателя идеальности n (>1) для ВАХ контактов с БШ. Это практически важный параметр определяет уменьшение скорости нарастания тока в прямой ветви ВАХ, величины квадратичной нелинейности и, в конечном итоге, ампер-ваттной чувствительности детектора по сравнению с идеальным случаем.

Развитые методики диагностики КМП позволили усовершенствовать технологии электролитического осаждения различных металлических контактов Au, Ni, Pt-Rh и Ir на GaAs. Новым и практически важным результатом является разработанная и запатентованная технология изготовления контактов Ir-GaAs. Особые свойства таких контактов с БШ

на GaAs могут быть востребованы при разработке новых приборов сверхвысокочастотной микроэлектроники.

Предложенный в работе способ модификации поверхности золота с использованием атомно-силового микроскопа может быть использован для задач литографии.

Критические замечания по диссертационной работе

1. В диссертационной работе заметное место отводится аппроксимациям ВАХ КМП и обсуждается влияние температуры (пример – рис. 2.4). При этом в диссертации отсутствуют экспериментальные данные по температурным зависимостям тока. Экспериментальная проверка предлагаемых аппроксимаций реальных ВАХ КМП в широком диапазоне температур была бы, на мой взгляд, уместной.

2. В четвёртом разделе диссертации проводится анализ модели Танга с неоднородным барьером Шоттки. Предполагается, что барьер имеет пятна («патчи») с пониженной высотой барьера. Расчёты проводятся, в том числе, для структур с очень большой плотностью таких пятен $\sim 10^{10} \div 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Характерные пространственные масштабы расположения пятен сопоставимы с расстояниями между атомами примеси при используемом уровне легирования $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$. В этих условиях следует обсудить возможность взаимного влияния соседних пятен на транспорт электронов: могут быть существенными зависимости электростатического потенциала БШ от продольных координат (вдоль интерфейса КМП), а расчет последовательного сопротивления согласно приложению Д будет не верным.

3. В пятом разделе обсуждаются эксперименты по модификации структур Au-GaAs с помощью атомно-силового микроскопа. При подаче определённого напряжения смещения на проводящий зонд происходит модификация свойств пленки золота в зоне сканирования, что подтверждается измерениями контактной разности потенциалов и изменением химических свойств поверхности золота. Так же делается утверждение, что происходит зарядка интерфейсных состояний КМП, которое регистрируется (с.128): «впервые нам удалось заглянуть под металлическую плёнку и исследовать непосредственно интерфейс контакта МП и отдельные его части». Возможность подобной локальной зарядки интерфейсных состояний и регистрации эффекта через эквипотенциальную металлическую плёнку требует разъяснения.

4. В тексте диссертации и подписях к рисункам есть досадные ошибки и опiski. Смысловые небрежности затрудняют восприятие информации. Вне контекста некоторые предложения даже трудно расшифровать. Примеры: с.39 «Таким образом, с точки зрения влияния на параметры ВАХ, снятых в условиях постоянства тока, понижение температуры подобно уменьшению диаметра для таких контактов.»; с.40 «Отметим также, что зависи-

мости на рисунке 2.5 представлены для диаметра контакта 50 мкм, поскольку увеличение диаметра ограничивает сверху диапазон возможных концентраций примеси при комнатной температуре.» и др.

Заключение

В целом, указанные недостатки и замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертация А.В. Шмаргунова является завершённой научно-квалификационной работой, в которой получены новые значимые и практически важные результаты.

Диссертация обладает внутренним единством. Содержание диссертационной работы, состоящей из введения, пяти глав, заключения и приложений отвечает цели и задачам научного исследования. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Основные результаты работы достаточно полно отражены в 7 публикациях. Пять статей опубликованы в международных журналах, входящих в перечень ВАК. Практические решения защищены патентом РФ.

Считаю, что диссертация Шмаргунова Антона Владимировича «Нелинейная зависимость высоты барьера от смещения и природа аномалий характеристик контактов с барьером Шоттки» полностью соответствует требованиям, предъявляемым Высшей Аттестационной Комиссией к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников.

Дата: 13 августа 2015 г.

Официальный оппонент:

заведующий отделом технологии наноструктур и приборов

ФГБУН «Институт физики микроструктур Российской академии наук»,

д.ф.-м.н., профессор

Шашкин Владимир Иванович

sha@ipm.sci-nnov.ru

(831) 417-94-55

Адрес: 603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7 ИФМ РАН

Подпись В.И. Шашкина удостоверяю

Ученый секретарь ИФМ РАН,

к.ф.-м.н.



Д.А. Рыжов