

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.07, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 24 сентября 2015 года публичной защиты диссертации Шмаргунова Антона Владимировича «Нелинейная зависимость высоты барьера от смещения и природа аномалий характеристик контактов с барьером Шоттки» по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Время начала заседания: 14.30

Время окончания заседания: 16.30

На заседании диссертационного совета присутствовали 19 из 24 утверждённых членов диссертационного совета, из них 7 докторов наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников:

1. Ивонин И.В., заместитель председателя диссертационного совета	д-р физ.-мат. наук	01.04.10
2. Киреева И.В. ученый секретарь	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
3. Бордовицын В.А.	д-р физ.-мат. наук	01.04.02
4. Брудный В.Н.	д-р физ.-мат. наук	01.04.10
5. Бухбиндер И.Л.	д-р физ.-мат. наук	01.04.02
6. Войцеховский А.В.	д-р физ.-мат. наук	01.04.10
7. Гермогенов В.П.	д-р физ.-мат. наук	01.04.10
8. I Давыдов В.Н.	д-р физ.-мат. наук	01.04.10
9. Дударев Е.Ф.	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
10. Караваев Г.Ф.	д-р физ.-мат. наук	01.04.10
11. Коротаев А.Д.,	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
12. Мельникова Н.В.	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
13. Старенченко В.А.	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
14. Трифонов А.Ю.	д-р физ.-мат. наук	01.04.02
15. Тюменцев А.Н.	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
16. Тютерев В.Г.	д-р физ.-мат. наук	01.04.10
17. Чумляков Ю.И.	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
18. Шаповалов А.В.	д-р физ.-мат. наук	01.04.02
19. Шарапов А.А.	д-р физ.-мат. наук	01.04.02

Заседание провёл заместитель председателя диссертационного совета, доктор физико-математических наук Ивонин Иван Варфоломеевич.

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить А.В. Шмаргунову ученую степень кандидата физико-математических наук.

Заключение диссертационного совета Д 212.267.07
на базе федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Министерства образования и науки Российской Федерации
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук
аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 24.09.2015 г., № 35

О присуждении **Шмаргунову Антону Владимировичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Нелинейная зависимость высоты барьера от смещения и природа аномалий характеристик контактов с барьером Шоттки»** по специальности **01.04.10** – Физика полупроводников, принята к защите 28.04.2015 г., протокол № 23, диссертационным советом Д 212.267.07 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 798-745/68 от 13.04.2007 г.).

Соискатель **Шмаргунов Антон Владимирович**, 1983 года рождения.

В 2006 году соискатель окончил государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет».

Для подготовки диссертации был прикреплен соискателем к кафедре физики полупроводников федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Работает в должности научного сотрудника отдела полупроводниковой СВЧ электроники Акционерного общества «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов».

Диссертация выполнена на кафедре физики полупроводников федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук, **Божков Владимир Григорьевич**, Акционерное общество (на момент назначения научным руководителем – открытое акционерное общество) «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов», начальник лаборатории 43 (на момент назначения научным руководителем – начальник отдела полупроводниковой СВЧ электроники).

Официальные оппоненты:

Шашкин Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики микроструктур Российской академии наук, отдел технологии наноструктур и приборов, заведующий отделом

Троян Павел Ефимович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра физической электроники, заведующий кафедрой

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук**, г. Новосибирск, в своем положительном заключении, подписанном **Журавлёвым Константином Сергеевичем** (доктор физико-математических наук, лаборатория молекулярно-лучевой эпитаксии полупроводниковых соединений A^3B^5 , ведущий научный сотрудник), **Двуреченским Анатолием Васильевичем** (доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора института), **Каламейцевым Александром Владимировичем** (кандидат физико-математических наук, ученый секретарь института), указала, что актуальность

данной работы заключается в настоятельной необходимости сформулировать единый подход к анализу причин наблюдаемых аномалий характеристик контактов с барьером Шоттки и выяснению этих причин, учитывая, что форма проявления аномалий практически одинакова для всех контактов металл-полупроводник, независимо от типа полупроводника и металла. К наиболее значимым результатам относятся: демонстрация того, что наиболее общий подход в описании вольт-амперных характеристик барьеров Шоттки может быть реализован при учёте нелинейной зависимости высоты барьера от смещения; разработка оригинальной методики оценки плотности интерфейсных состояний, благодаря которой совершенствование технологии контактов может производиться более целенаправленно.

Соискатель имеет 7 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 7 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 5 (все в зарубежных журналах, включенных в Web of Science и Scopus), патент Российской Федерации – 1, публикация в сборнике материалов международной конференции – 1. Общий объём публикаций – 3.3 п.л., авторский вклад – 1.16 п.л.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Bozhkov, V. G. About the determination of the Schottky barrier height with the C-V method / V. G. Bozhkov, N. A. Torkhov, A. V. Shmargunov // J. Appl. Phys. – 2011. – V. 109, Is. 7. – 073714. – 10 pp. – 0,6 / 0,1 p.p. – DOI: 10.1063/1.3561372
2. Bozhkov, V. G. Influence of the nonlinear bias dependence of the barrier height on measured Schottky-barrier contact parameters / V. G. Bozhkov, A. V. Shmargunov // J. Appl. Phys. – 2011. – V. 109, Is. 11. – 113718. – 10 pp. – 0,6 / 0,3 p.p. – DOI: 10.1063/1.3587233
3. Bozhkov, V. G. Investigation of special features of parameters of Schottky barrier contacts caused by a nonlinear bias dependence of the barrier height / V. G. Bozhkov, A. V. Shmargunov // J. Appl. Phys. – 2012. – V. 111, Is. 5. – 053707. – 10 pp. – 0,6 / 0,3 p.p. – DOI: 10.1063/1.3691959
4. Bozhkov, V. G. The Ir-n-GaAs Schottky barrier contacts made by electrochemical deposition / V. G. Bozhkov, A. V. Shmargunov, T. P. Bekezina, N. A. Torkhov, V. A. Novikov // J. Appl. Phys. – 2014. – V. 115, Is. 22. – 224505. – 8 pp. – 0,5 / 0,15 p.p. – DOI: 10.1063/1.4867778

5. **Shmargunov A.V.** AFM study of charging of the Au–n-GaAs contact / **A. V. Shmargunov**, V. G. Bozhkov, V. A. Novikov // *Microelectronic Engineering*. – 2015. – V. 133. – P. 73–77. – 0,3 / 0,2 p.p. – DOI: 10.1016/j.mee.2014.12.006

На автореферат поступили 5 положительных отзывов. Отзывы представили:

1. **Р.В. Конакова**, д-р техн. наук, проф., заведующая лабораторией физико-технологических проблем твердотельной СВЧ электроники Института физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины, г. Киев, *без замечаний*.
2. **Л.И. Федосеев**, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник отдела физики атмосферы и микроволновой диагностики Института прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, и **Л.В. Лубяко**, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник отдела физики атмосферы и микроволновой диагностики Института прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, *без замечаний*.
3. **В.В. Вейц**, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ОАО «Научно-производственное предприятие «Пульсар»», г. Москва, *с замечанием*: в автореферате отсутствуют предложения по технологическим методам уменьшения влияния интерфейсных состояний.
4. **Ж.Й. Хорват**, доктор Венгерской академии наук (технические науки), профессор факультета электротехники им. Кандо Кальмана Омбудайского университета, г. Будапешт, Венгрия, *с замечаниями*: в работе показатель идеальности определяется при постоянном смещении, в то время как многие авторы пользуются методом Чеунга и Чеунга; автор однозначно связывает аномалии вольт-амперных характеристик с нелинейностью высоты барьера, несмотря на продемонстрированную роль туннелирования; в интерпретации данных слишком высокая плотность состояний $-10^{12}-10^{13}$ см⁻².
5. **Д.Г. Павельев**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории НИЧ кафедры электроники Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, *с замечаниями*: экспериментальная проверка предложенных моделей контакта металл-полупроводник выполнена исключительно на контактах с GaAs; в качестве одной из популярных альтернативных моделей контакта металл-полупроводник указана модель Вернера-Гютлера, но далее анализ этой модели не представлен.

В отзывах отмечается, что актуальность работы обусловлена важностью понимания конкретных физических причин особенностей электрических характеристик, основные результаты являются фундаментальными и могут привести к новому взгляду и подходу к электрическим характеристикам контактов Шоттки; могут быть использованы как в научных исследованиях, так и в условиях нанопроизводства; учитывая большое научное и практическое значение, предлагается оформить результаты в форме монографии.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что В.И. Шашкин широко известен своими работами в области исследования контакта металл-полупроводник и управляемого изменения его высоты барьера; П.Е. Троян является известным специалистом в области исследования тонких плёнок и гетероструктур; в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова работают квалифицированные специалисты по направлению 01.04.10 – Физика полупроводников, известные своими исследованиями поверхности полупроводника и различных границ раздела.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан обобщённый подход для анализа вольт-амперных характеристик на основе учёта нелинейной зависимости высоты барьера от смещения;

предложены простое аналитическое выражение для вольтамперной характеристики контакта с барьером Шоттки, учитывающее эффект туннелирования и влияние сил изображения и содержащее только показатель идеальности и реальную высоту барьера; оригинальный способ исследования контактов металл-полупроводник с использованием методов атомно-силовой микроскопии;

доказано наличие существенных ограничений наиболее популярной альтернативной модели контакта – модели неоднородности в виде «седловых точек» для объяснения аномалий вольт-амперных характеристик при комнатной температуре и показателе идеальности $< 1,1$.

Теоретическая значимость исследований обоснована тем, что:

доказано, что нелинейная зависимость высоты барьера от смещения является универсальной причиной низкотемпературной аномалии, размерных эффектов и связи высоты барьера и показателя идеальности; эффекты туннелирования, сил изображения, наличие неоднородного по энергии распределения спектра интерфейсных состояний, находящихся в равновесии с полупроводником, наличие неоднородного распределения высоты барьера в контакте и их комбинации вызывают указанную нелинейность высоты барьера;

изучены зависимости параметров вольт-амперной характеристики от напряжения, температуры, диаметра контакта, концентрации легирующей примеси;

проведены модернизация, дальнейшее развитие и уточнение модели поверхностных состояний с промежуточным слоем, модели тесного контакта с приповерхностными состояниями, модели неоднородности в виде «седловых точек».

Значения полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны экспрессные методики анализа вольт-амперных характеристик, позволившие ускорить отработку эффективного метода осаждения иридия на GaAs для получения совершенных выпрямляющих контактов;

определены характерные особенности каждой из моделей, что позволяет эффективно определять причины, ухудшающие качество электрических характеристик контактов с барьером Шоттки, и, в перспективе, бороться с этими ухудшениями;

представлены результаты, которые могут быть использованы для локальной оценки плотности состояний методами атомно-силовой микроскопии; для разработки новой техники литографии с использованием атомно-силовой зарядки.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

результаты получены на современном сертифицированном оборудовании: измеритель полупроводниковых приборов Agilent B1500, зондовая станция Cascade M150, атомно-силовой микроскоп «Solver HV» фирмы NT-MDT;

идея базируется на классических представлениях физики полупроводников и современных взглядах на аномалии вольт-амперных характеристик;

использовано сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных, полученных в рамках данной работы на контактах Au-GaAs, Ni-GaAs, Pt-Rh-GaAs, Ir-GaAs, и подтверждающихся оценкой плотности состояний с использованием оригинальной методики атомно-силовой зарядки;

установлено качественное и количественное согласие с результатами, известными из литературы.

Научная новизна работы заключается в том, что наиболее общий подход в описании вольтамперных характеристик реальных контактов может быть реализован на основе учёта нелинейной зависимости высоты барьера от смещения, наиболее вероятной причиной которого при комнатной температуре и показателя идеальности $n < 1,1$ является неоднородное по энергии распределение интерфейсных состояний. Получено выражение, содержащее реальную высоту барьера и описывающее экспериментальные вольт-амперные характеристики. Впервые показано, что сканирование поверхности контакта металл-полупроводник кантилевером атомно-силового микроскопа при наличии смещения на барьере Шоттки приводит к зарядению сканированной области и изменению её контактного потенциала. Описан механизм данного явления, заключающийся в накоплении заряда в интерфейсных состояниях контакта металл-полупроводник, при протекании через него электрического тока, что позволяет производить оценку плотности этих состояний.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования. Результаты работы могут быть полезны при разработке электронных приборов с барьером Шоттки. Они представляют интерес для таких организаций, как Национальный исследовательский Томский государственный университет, Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН (г. Новосибирск), Физико-технический институт им. Иоффе РАН (г. Санкт Петербург), Институт микроструктур РАН (г. Нижний Новгород), Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Воронежский государственный университет инженерных технологий.

Личный вклад соискателя состоит в: разработке алгоритмов и соответствующего программного обеспечения для численной проверки известных моделей; проведении всех численных расчётов и основных экспериментов; разработке и использовании метода атомно-силовой зарядки для исследования интерфейса контакта металл-полупроводник; совместном с научным руководителем общем планировании работы и развитии моделей.

Диссертация соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи по определению особенностей электрических характеристик контактов с барьером Шоттки на основе учёта нелинейной зависимости высоты барьера от смещения, имеющей значение для физики полупроводников.

На заседании 24.09.2015 г. диссертационный совет принял решение присудить **Шмаргунову А. В.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 7 докторов наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя

диссертационного совета



Ивонин Иван Варфоломеевич

Учёный секретарь

диссертационного совета

Киреева Ирина Васильевна

24.09.2015 г.