

“УТВЕРЖДАЮ”

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Института
физики полупроводников
им. А. В. Ржанова Сибирского
отделения Российской академии
наук,
член-корреспондент РАН



А.В. Латышев

“ 02 ” июля 2015 г

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Шмаргунова Антона Владимировича «Нелинейная зависимость высоты барьера от смещения и природа аномалий характеристик контактов с барьером Шоттки», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников».

Диссертационная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию аномалий электрических характеристик выпрямляющего контакта металл-полупроводник с барьером Шоттки, направленному на построение модели, позволяющей анализировать и оптимизировать характеристики реальных контактов металл-полупроводник (КМП), имеющих большое научное и практическое значение для полупроводниковой электроники. Работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, пяти приложений, списка литературы из 138 наименования и изложена на 152 страницах машинописного текста, включая 68 рисунков и 5 таблиц.

Исследования контакта с барьером Шоттки (БШ) имеют уже более чем полувековую историю. И наиболее известные механизмы токопрохождения в целом ясны: это диффузионная, термоэлектронная, термополевая, а в ряде случаев и полевая эмиссия электронов (дырок) через барьер. Тем не менее, исследователи и разработчики электронных устройств с использованием контактов металл-полупроводник регулярно сталкиваются с отклонениями в поведении их вольтамперных характеристик (ВАХ), требующих объяснения. Помимо различных типов «утечек», избыточных токов в области малых смещений, которые могут не оказывать существенного влияния на выпрямительные свойства, но отражаться на шумах устройств на КМП, большое значение имеет плавный, обычно непрогнозируемый рост показателя идеальности на всей протяжённости ВАХ. Впоследствии было выявлено множество различных типов «аномалий», которые так или иначе связаны с характером зависимости высоты барьера и показателя идеальности от смещения. Совершенствование технологии и эффективное

подавление нежелательных эффектов возможны только в случае точного представления о физике процессов токопрохождения. На данный момент имеется некоторое количество моделей переноса заряда в КМП, в которых известные термоэмиссионно-диффузионные процессы рассматриваются с учётом влияния процессов генерации-рекомбинации, латеральной неоднородности высоты барьера различного происхождения, поверхностных (интерфейсных) состояний и некоторых других факторов. Наряду с определёнными успехами в описании некоторых особенностей ВАХ, эти модели имеют и существенные ограничения. **Актуальность** данной работы заключается в настоятельной необходимости сформулировать единый подход к анализу причин наблюдаемых аномалий характеристик контактов и выяснению этих причин, учитывая в особенности тот факт, что форма проявления аномалий практически одинакова для всех контактов металл-полупроводник, независимо от типа полупроводника и металла. В результате был сформулирован не только общий подход к анализу ВАХ контактов М-П на основе учёта нелинейной зависимости высоты барьера от смещения, но и предложена наиболее вероятная его физическая причина – неоднородное (по энергии) распределение интерфейсных состояний.

Во **введении** автор обосновывает актуальность выбранной темы, формулирует цель и задачи исследования, излагает научную новизну и практическую значимость работы, приводит основные положения, выносимые на защиту.

В **первом разделе** диссертации изложены современные представления о свойствах идеальных и реальных контактов, дан анализ основных факторов влияния на ВАХ. Определены основные понятия и соотношения, характеризующие ВАХ. Разделены понятия реальной, эффективной и измеряемой по току насыщения высоты барьера (последняя зависит от показателя идеальности). Изложены принципы исследований с использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ) с методом зонда Кельвина (МЗК).

Во **втором разделе** представлено явление нелинейной зависимости высоты барьера от смещения и его проявления при измерении ВАХ. В данном случае явление рассматривалось на примере идеального контакта с учётом термополевой эмиссии (в приближении ВКБ) и эффекта сил изображения. На основе проведённого анализа предложено выражение, описывающее ВАХ такого контакта в широком диапазоне температур, диаметров контактов и концентраций легирующей примеси и содержащее реальную, а не измеряемую высоту барьера (в данном контексте – максимум потенциала в барьере). Проведена проверка на экспериментальных данных по высоколегированным контактам Pt-Ti-GaAs, известным из литературы. Полученное выражение отличается не только простотой, но и высокой точностью, несопоставимой с точностью известного аналитического приближения для ВАХ, основанного на аппроксимации подынтегрального выражения ВАХ распределением Гаусса.

В **третьем разделе** на примере контактов Au-GaAs, Ni-GaAs и Ir-GaAs приведены результаты детальной проверки предложенных моделей для объяснения их характеристик. контактах с промежуточным слоем и без него (для тесных контактов). В качестве причины нелинейной зависимости высоты барьера от

смещения, объясняющей все наблюдаемые особенности ВАХ указанных контактов (зависимость показателя идеальности, эффективной и измеряемой высоты барьера от смещения и диаметра контакта, а также обратная связь показателя идеальности и измеряемой высоты барьера) предложено неоднородное распределение локальных состояний в запрещённой зоне. Рассматривалось два типа распределения: ИС для контактов с промежуточным слоем и ППС для тесных контактов, распространяющиеся вглубь полупроводника на расстояние ~ 1 нм. Анализ показал близкое совпадение экспериментальных и расчётных ВАХ для всех исследованных ситуаций. В рамках модели с промежуточным слоем плотность состояний вблизи границ запрещённой зоны, объясняющая наблюдаемые экспериментальные зависимости, составила $1.9 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ (для модели с промежуточным слоем) с экспоненциальным спадом к середине зоны. Предложенное для идеального контакта выражение для ВАХ и для достаточно совершенных реальных контактов хорошо согласуется с экспериментом и точным численным расчётом. Различные особенности характеристик реальных контактов, такие как повышенная дисперсия высоты барьера в никелевых контактах малого диаметра или аномальное понижение высоты барьера в иридиевых контактах с уменьшением диаметра контакта, автор связывает с механическими напряжениями возникающими в металлической плёнке или окружающем защитном диэлектрике, которые изменяют плотность интерфейсных состояний и, соответственно, высоту барьера и показатель идеальности.

Четвёртый раздел посвящен анализу наиболее популярной модели переноса заряда в КМП – модели Танга неоднородности высоты барьера в виде «седловых точек», в рамках которой аномалии ВАХ объясняются наличием на поверхности полупроводника в КМП участков с пониженной высотой барьера, потенциал которых, а значит и высота барьера в данной области, зависит от поданного смещения. Были получены точные выражения для показателя идеальности изолированной «седловой» точки и для всего контакта с гауссовским распределением седловых точек по характеристическому параметру γ , а также для однородной и неоднородной частей контакта. Показано, что приближение Танга для показателя идеальности, активно используемое в литературе, даёт значения и качественно и количественно отличные от прогнозируемых точными выражениями. Зависимость показателя идеальности от напряжения при комнатной температуре в рамках модели Танга даже при учёте последовательного сопротивления противоречит экспериментальным зависимостям. Представлен результат моделирования дисперсии высоты барьера (при наборе до 50 шт контактов) в зависимости от диаметра контакта. Как оказалось, для достаточно идеальных контактов ($n < 1,1$) типичные используемые значения параметров модели дают значения среднеквадратичного отклонения на один два порядка меньше, чем наблюдается экспериментально.

В пятом разделе представлена методика исследования контакта металл-полупроводник на основе АСМ с МЗК. Суть так называемой «АСМ-зарядки» состоит в пропускании тока в локальной области металлической плёнки контакта с БШ с последующим измерением контактной разности потенциалов. Оригинальность состоит в том, что такая методика не использовалась применительно к КМП. Показано, что область контакта, через которую пропускался обратный электрический

ток, существенно изменяет свой потенциал, фиксируемый через плёнку Au толщиной 50-200 нм. Приведены аргументы в пользу того, что заряд скапливается именно в интерфейсных состояниях КМП. К ним можно отнести слабое влияние последующей обработки на индуцированный потенциал, рост величины индуцированного потенциала с уменьшением толщины металлической плёнки, близкое совпадение результатов АСМ-зарядки и изменения эффективной высоты барьера, рассчитанной из экспериментальных ВАХ, измеренных на данных контактах. Была проведена оценка плотности перезаряжающихся состояний и показано достаточно хорошее их совпадение с расчётом согласно моделям интерфейсных состояний для прямых экспериментальных ВАХ $\sim 1,9 \times 10^{12} \text{см}^{-2}$ (с учётом экспоненциального уменьшения плотности состояний к середине запрещённой зоны).

Из наиболее значимых научных результатов работы можно отметить следующие:

1. Демонстрацию того, что наиболее общий подход в описании ВАХ барьеров Шоттки может быть реализован при учёте нелинейной зависимости высоты барьера от смещения.
2. Установление того, что наиболее вероятной причиной нелинейности высоты барьера в реальных контактах является неоднородное по энергии распределение интерфейсных состояний.
3. Разработку оригинальной методики оценки плотности интерфейсных состояний,

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов работы достигается глубокой теоретической проработкой темы, использованием собственного тщательно проверенного программного аппарата, скрупулезностью подготовки и проведения экспериментов по получению и исследованию контактов различных контактов Au-GaAs, Ni-GaAs, Pt-Rh-GaAs, Ir-GaAs, в том числе и с использованием АСМ с МЗК, а также высоким уровнем научной подготовки автора. Все научные положения, вынесенные на защиту, имеют строгое теоретическое доказательство или экспериментальное подтверждение. Достоверность большинства выводов диссертанта подтверждается внутренней непротиворечивостью результатов, а также хорошим согласованием их с данными других авторов. Материалы диссертации прошли апробацию на международной конференции и опубликованы в семи печатных изданиях.

Научная ценность работы состоит в том, что проведённое исследование позволяет лучше понять процессы токопрохождения в КМП с БШ и проводить анализ экспериментальных ВАХ в рамках единого подхода, учитывающего нелинейную зависимость высоты барьера от смещения. Продемонстрирована роль интерфейсных состояний в изменении высоты барьера в неравновесных условиях и, таким образом, в различных аномалиях ВАХ.

Практическая ценность работы заключается в создании методик и выявлении закономерностей, позволяющих проще и с большей степенью уверенности определять какие факторы ухудшают ВАХ контакта с БШ в каждой конкретной ситуации. В результате совершенствование технологии может производиться более целенаправленно. Приведённая методика АСМ-зарядки может быть использована для

новой оригинальной техники литографии. **Результаты работы можно рекомендовать** для использования при разработке электронных приборов с барьером Шоттки. Они представляют интерес для таких организаций как Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (г. Новосибирск), Физико-техническом институте им. Иоффе РАН (г. Санкт Петербург), Институте микроструктур РАН (г. Нижний Новгород), Томский государственном университете управления и радиоэлектроники (г. Томск), Воронежском государственном университете инженерных технологий (г. Воронеж), а также других организаций, специализирующихся на создании и применении приборов полупроводниковой электроники.

По диссертации имеются следующие замечания.

1. Экспериментальная проверка выработанного подхода в описании ВАХ барьеров Шоттки выполнена исключительно на GaAs, это вызывает вопросы по поводу применимости этого подхода к описанию электрических характеристик барьеров Шоттки на других полупроводниках с большей или меньшей концентрацией поверхностных состояний.
2. В работе отсутствуют экспериментальные исследования низкотемпературных ВАХ барьеров Шоттки, не продемонстрировано описание низкотемпературной аномалии в модели интерфейсных состояний.
3. В работе не обсуждаются механизмы влияния упругих механических напряжений в контакте металл-полупроводник на плотность интерфейсных (донорных и акцепторных) состояний, оказывающих существенный эффект на характеристики барьеров Шоттки.
4. Утверждение о том, что состояния, заряжающиеся при сканировании атомно-силовым микроскопом, расположены на интерфейсе контакта металл-полупроводник не достаточно подтверждено экспериментальными или литературными данными. Не сопоставлены изменения концентрации комплексов мышьяка на поверхности GaAs и плотности интерфейсных состояний при химических обработках поверхности GaAs, не обсуждаются состояния в GaAs, индуцированные комплексами мышьяка на его поверхности.

Указанные замечания не снижают научной значимости и общей положительной оценки диссертационной работы, выполненной на высоком теоретическом и экспериментальном уровне.

Диссертационная работа Шмаргунова А.В. является и законченным научным исследованием, содержит новые результаты, имеющие большую научную значимость и практическую ценность. Основные результаты работы Шмаргунова А.В. опубликованы в семи работах, в том числе в пяти международных журналах, входящих в перечень ВАК, поэтому они хорошо известны специалистам. Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации.

Доклад по материалам диссертации был заслушан и обсужден на институтском семинаре ИФП СО РАН на базе лаборатории физических основ интегральной микроэлектроники, лаборатории неравновесных процессов в полупроводниках и лаборатории молекулярно-лучевой эпитаксии полупроводниковых соединений A_3B_5

10 июня 2015 года. Работа Шмаргунова А.В. на тему «Нелинейная зависимость высоты барьера от смещения и природа аномалий характеристик контактов с барьером Шоттки» является логически завершенным самостоятельным исследованием и удовлетворяет требованиям и критериям ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников».

Отзыв на диссертационную работу Шмаргунова А.В. одобрен Ученым советом ИФП СО РАН (протокол № 5 от «22» июня 2015 года).

Отзыв составил:

Ведущий научный сотрудник лаборатории молекулярно-лучевой эпитаксии полупроводниковых соединений A_3B_5 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук
доктор физико-математических наук

Константин Сергеевич
Журавлев



Заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор

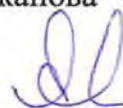
Анатолий Васильевич
Двуреченский



Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук член-корреспондент РАН, кандидат физико-математических наук

А.В. Каламейцев

(Александр Владимирович
Каламейцев)



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова
Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090 г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13.
<http://www.isp.nsc.ru/>
e-mail: ifp@isp.nsc.ru
тел.: +7(383)333-24-88