

## ОТЗЫВ

официального оппонента 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

### **Актуальность темы диссертации**

В настоящее время контакты с барьером Шоттки (БШ) весьма широко представлены в полупроводниковой электронике. Они активно применяются в детекторных, смесительных диодах и варикапах, полевых транзисторах различного типа и в пассивных радиотехнических цепях. Область их использования охватывают частоты вплоть до терагерцового диапазона благодаря отличным параметрам в области высоких частот.

Эффективность работы устройств на основе БШ в значительной степени определяется качеством контакта. Одним из его основных критериев является близость вольт-амперной характеристики (ВАХ) контакта к идеальному виду, которая обычно характеризуется крутизной ВАХ, или величиной так называемого показателя идеальности ( $n$ ). Рост показателя идеальности ( $n > 1$ ) означает, что помимо основного механизма прохождения тока (обычно термоэлектронной эмиссии) в контакте действуют дополнительные факторы, изменяющие величину тока. Эти факторы напрямую влияют на эффективность преобразовательных свойств контакта, ухудшают их шумовые и частотные характеристики.

Несмотря на длительную историю исследований и использования, создание качественных выпрямляющих контактов металл-полупроводник (КМП) для многих приложений остаётся достаточно сложной технологической проблемой. Это связано с трудностью определения истинных причин, влияющих на качество контакта. Существует большое количество причин, вызывающих аномальное поведение (так называемые «аномалии») электрических характеристик контакта. Такие «аномалии» как рост показателя идеальности с понижением температуры при одновременном понижении высоты барьера, обратная связь между показателем идеальности и высотой барьера, размерные эффекты (рост показателя идеальности и понижение высоты барьера с уменьшением диаметра) известны на протяжении многих десятилетий, но природа их по-прежнему остаётся дискуссионной. Они характерны для контактов с самыми разными

полупроводниками. Для объяснения «аномалий» используются различные модели неоднородности высоты барьера, локальная термополевая эмиссия и влияние интерфейсных состояний.

Актуальность представленной работы связана с тем, что решается задача повышения качества КМП и устройств с его использованием на основе детального исследования «аномалий» характеристик контактов и разработкой методов улучшения параметров КМП.

### **Научная новизна**

В процессе диссертационного исследования соискателем получен ряд новых научных данных. Наиболее важные из них следующие.

1. Пока, что учет нелинейной зависимости высоты барьера от напряжения позволяет достаточно достоверно описывать наблюдаемые в контактах металл-полупроводник явления и изменение параметров контакта. Высказано предположение о наиболее вероятной причине возникновения нелинейной зависимости высоты барьера от напряжения – неоднородное распределение интерфейсных состояний по энергии.

2. Получено точное выражение для показателя идеальности ВАХ КМП и показано наличие существенных ограничений возможности моделей неоднородности высоты барьера в виде седловых точек (модели Танга) в описании экспериментальных ВАХ при комнатной температуре и показателе идеальности  $n < 1,1$ .

3. Дано объяснение зависимости высоты барьера от показателя идеальности флуктуациями механических напряжений, которые, вероятно, вызывают флуктуацию плотности донорных состояний.

4. Впервые показано, что сканирование поверхности металл-полупроводник кантилевром при наличии смещения на барьере Шоттки приводит к зарядению сканированной области и изменению ее контактного потенциала. Экспериментально показано, что атомно-силовую микроскопию с методом зонда Кельвина можно использовать для исследования интерфейсных состояний контактов металл-полупроводник.

Автор убедительно показал, что именно нелинейность высоты барьера является причиной единообразия наблюдаемых аномалий ВАХ для контактов с различными полупроводниками, полученными различными технологическими приемами. Одной из наиболее вероятных причин нелинейности высоты барьера в реальных контактах может быть неоднородное распределение по энергиям интерфейсных и приповерхностных (в контакте) состояний в запрещенной зоне полупроводника.

## **Научное и практическое значение полученных результатов**

Полученные соискателем Шмаргуновым А.В. результаты имеют научное и практическое значение.

С научной точки зрения существенным следует признать заключение о том, что наиболее популярная в настоящее время модель токопереноса в контакте металл-полупроводник-модель «седловых точек» (модель Танга) имеют существенные ограничения при комнатной температуре и показателе идеальности  $n < 1,1$ .

Трактовка результатов экспериментальных данных с позиций нелинейной зависимости высоты барьера Шоттки в реальных контактах металл-полупроводник от величины смещения является новым существенным шагом в понимании физики процессов в таких контактах и может служить инструментом в улучшении их параметров.

Предложенное автором диссертации простое выражение ВАХ контакта металл-полупроводник, позволяет адекватно описывать зависимость параметров контактов в широком диапазоне температур, концентрации легирующей примеси, геометрических размеров контакта.

Практическая ценность исследования заключается в разработке методики исследования интерфейсных состояний на контакте металл-полупроводник с использованием зонда Кельвина и сканирующей атомно-силовой микроскопии.

Предложение об использовании JCM-зарядки поверхности полупроводника для разработки технологии литографии является важным практическим результатом диссертационного исследования.

Методика нанесения иридия путем электролитического осаждения позволяет получить качественные контакты с хорошими параметрами, в том числе в СВЧ.

Разработанные методики экспресс анализа большого массива экспериментальных ВАХ дает возможность оперативного исследования структур и получения рекомендаций по совершенствованию технологии.

## **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается проведением комплексных теоретических и экспериментальных исследований. Показано хорошее совпадение совмещение теоретических проработок и экспериментальных исследований. Полученные результаты имеют численные значения, совпадающие с результатами других исследователей.



Достоверность экспериментальных данных обусловлена использованием достаточно современного измерительного и аналитического оборудования (Ajilent B1500, АСМ и т.д.).

Выдвинутые модели нашли подтверждение в экспериментальных исследованиях. Корректность разработанных моделей подтверждается, в частности, оценкой плотности интерфейсных состояний с использованием оригинальной методики на основе АСМ.

### **Обоснованность выводов и заключений**

По большей части исследований сделаны обоснованные выводы и заключения. В тоже время некоторые выводы звучат неоднозначно и неопределенно. Так в заключении по диссертации в п. 1 говорится, что «наиболее общий подход к описанию ВАХ реальных контактов может быть реализован на основе учета нелинейной зависимости высоты барьера от смещения. При этом механизмы, лежащие в основе нелинейной зависимости, могут быть достаточно разнообразными». Было бы логично перечислить какие это механизмы, но этого не сделано. Более того, п. 4 заключения указывает на то, что «наиболее вероятная причина нелинейности высоты барьера в реальных контактах – неоднородное по энергии распределение интерфейсных или приповерхностных состояний, находящихся в равновесии с полупроводником». Если соискатель считает п. 4 заключения обоснованным и доказанным, то зачем в п. 1 говорить о разнообразных механизмах нелинейной зависимости высоты барьера. Если же предложение, изложенное в п. 4 не доказано, то зачем его приводить в виде вывода. В этом случае оно необоснованно.

Неоднозначным является и п. 5 заключения, где сказано, что «разброс параметров ВАХ и связь измеряемой высоты барьера с показателем идеальности для набора однотипных контактов обусловлены флуктуациями ИС, связанными, в отдельных случаях, с механическими напряжениями в КМП. Изначально пункт заключения утвердительно гласит о природе разброса параметров и связи измеряемой высоты барьера с показателем идеальности, обусловленной флуктуациями ИС. Однако слова «... в отдельных случаях, с механическими напряжениями в КМП» делают этот пункт заключения неопределенным. О каких отдельных случаях идет речь? А в других случаях чем обусловлена флуктуация ИС, и она ли определяет те заключения, которые сделаны в п. 5.

Необходимо отметить необоснованное формулирование п. 2 раздела «Научная новизна работы». Слова «получено выражение» не имеют подтверждения в тексте автореферата и диссертации. Выражение 6 автореферата, записано без вывода путем подстановки в выражение 5 вместо  $\varphi_{bn}$  значение  $\varphi_{bi}$ . При этом соискатель считает, что «известное чисто эмпирическое выражение 5 не лишено оснований «заменить  $\varphi_{bn}$  на  $\varphi_{bi}$ ,

автор диссертации полагает, что полученное выражение 6 (видимо уже не чисто эмпирическое) обладает научной новизной.

### **Замечания**

По содержанию диссертации Шмаргунова А. В. Необходимо сделать следующие замечания.

1. Диссертация написана очень трудным для восприятия научным языком. Многие моменты, требующие ясного простого и логичного объяснения, изложены витиевато и не совсем понятно. Например, из реферата стр. 11. «Нелинейность высоты барьер, обусловлены неоднородным по энергии распределением ИС (для МБ) и ППС (для МТК), полностью объясняют размерные эффекты в контактах...» Логично бы ожидать, что дальше должно идти изложение физической природы появления размерных эффектов, но этого не следует.

2. Размерный эффект – очень важный и интересный результат, полученный автором. К сожалению не даны обоснования природы размерных эффектов в КМП.

3. Не дано приемлемого объяснения, почему при напылении металла в окно диаметром 5 мкм его толщина значительно меньше чем в окнах диаметрами 50 и 500 мкм.

4. В содержании автореферата и тексте диссертации раздел «Актуальность научного исследования» изложены так, что трудно понять в чем актуальность проведенного исследования. В отзыве на диссертацию я изложил свое видение актуальности, не вытекающее из текста диссертации.

5. В диссертации достаточно много текстовых ошибок.

Указанные замечания не снижают общей ценности работы.

### **Заключение**

По уровню постановки задач исследований, научной новизны, научной и практической значимости, достоверности результатов и обоснованности выводов диссертационное исследование Шмаргунова А. В. Является завершенным научно-квалификационным исследованием, вносящим вклад в развитие физики контактов металл-полупроводник. Текст автореферата дает полное представление о содержании диссертации. Полученные результаты полно отражены в опубликованных работах.

Диссертационная работа «Нелинейная зависимость высоты барьера от смещения и природа аномалий характеристик контактов с барьером Шоттки» является хорошим научно-квалификационным исследованием и соответствует требованиям предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям. Автор диссертации А. В. Шмаргунов заслуживает

присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

Официальный оппонент

Заведующий кафедрой физической электроники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», доктор технических наук (01.04.04 – физическая электроника), профессор

Троян Павел Ефимович

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина 40

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

e-mail: [p.e.troyan@mail.ru](mailto:p.e.troyan@mail.ru)

тел.: +73822413936

Подпись П.Е. Трояна заверяю

Ученый секретарь ТУСУР



Е.В. Прокопчук

Дата: 08.09.2015