

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
АО «ЗПП с ОКБ»



В.И. Исюк

_____ 2019г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Акционерного общества «Новосибирский завод полупроводниковых приборов с ОКБ» на диссертацию Федина Ивана Владимировича «Мощные быстродействующие диоды на основе гетероэпитаксиальных структур нитрида галлия», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

Диссертационная работа Федина И.В. посвящена разработке технологии создания и исследование характеристик диодов Шоттки на основе гетероструктуры $p\text{GaN}/\text{AlGaN}/\text{GaN}$, выращенной на кремниевой подложке.

Отличительной особенностью разработанной технологии является возможность объединения в монолитной интегральной схеме (МИС) диоды и НЗ транзисторы, что позволяет снизить массогабаритные показатели и улучшить характеристики высокоэффективных источников вторичного электропитания на основе GaN электронно-компонентной базы (ЭКБ).

Актуальность темы диссертационной работы

Решающая роль силовой электроники в мировой экономике следует из того, что более 80 % вырабатываемой электроэнергии потребляется в преобразованном виде. Первый конкурентоспособный мощный MOSFET транзистор был выпущен в 1978 г., что определило развитие рынка силовой электроники в сторону кремния на последующие десятилетия. Однако, кремниевая технология приближается к своему теоретическому пределу.

Ныне перспективным путем развития силовой электроники в мире является переход к элементной базе на основе широкозонных полупроводников, в том числе нитриду галлия (GaN). Последний обладает целым рядом преимуществ над кремнием: большая ширина запрещённой зоны, высокая электрическая прочность, высокая подвижность электронов, высокая рабочая температура, высокая дрейфовая скорость насыщения электронов.

Одними из наиболее перспективных приборов на основе GaN являются различные преобразователи мощности, так как его особенности позволяют значительно улучшить характеристики преобразователей:

1. Большая ширина запрещенной зоны (в 3 раза больше, чем у кремния) обуславливает возможность работы преобразователя при высоких уровнях температуры и радиации.

2. Максимальная критическая напряженность электрического поля (в 10 раз большая, чем у кремния) позволяет реализовать высокие пробивные напряжения.

3. Малый заряд затвора позволяет отказаться от дополнительных фильтров на высоких частотах и тем самым снизить массогабаритные показатели преобразователя.

4. Сочетание высокой концентрации электронов проводимости и высокой подвижности электронов существенно снижает сопротивление GaN транзисторов в открытом состоянии, и, как следствие, потери мощности в преобразователях.

Впервые возможность создания транзистора с высокой подвижностью электронов (HEMT) на базе гетероструктуры AlGaIn/GaN, выращенной на SiC подложке была продемонстрирована в 1993 г. А уже в 2004 г. компания Eudyna Corp (Япония) вывела на рынок радиочастотный нормально-открытый AlGaIn/GaN транзистор.

Следующим прорывом стала разработка компанией Efficient Power Conversion (EPC) нормально-закрытого (H3) 100 В транзистора в 2009 г., способного заменить устаревшие кремниевые MOSFET. В 2014 г. компания GaN Systems представила 650 В H3 GaN транзистор, что сильно укрепило положение GaN на рынке силовой электроники. В настоящее время серийное производство транзисторов на основе GaN освоено такими компаниями, как Panasonic (Япония), Transphorm, EPC (США), GaN Systems (Канада), Infineon (Германия).

Для создания GaN электронно-компонентной базы (ЭКБ) помимо транзисторов необходимы мощные диоды. Начиная с 2000 г. GaN диоды Шоттки стали объектом постоянных исследований и в настоящее время разделились на 2 направления: вертикальные диоды, выполненные на естественной подложке (GaN) и квазивертикальные и планарные диоды, выполненные на подложках SiC, Si, Al₂O₃ и др. Преимущества вертикальных диодов в большей плотности мощности, однако планарные значительно дешевле в производстве за счёт более дешёвых подложек. В настоящее время серийная технология планарных AlGaIn/GaN диодов Шоттки освоена компаниями Transphorm и Panasonic, однако в свободную продажу они не поступают по известным причинам.

Таким образом, создание GaN ЭКБ в России и мире является актуальной и перспективной задачей, которую в настоящий момент решают как производственные фирмы, так и научно-исследовательские компании, занимающиеся разработкой перспективных направлений микроэлектроники.

Содержание диссертации и автореферата.

В АО «НЗПП с ОКБ» были представлены автореферат и текст диссертации, которая состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (154 источника) и двух приложений. Основное содержание работы изложено на 147 страницах. Автореферат в полном объеме отражает содержание диссертации. В нем изложены основные идеи и выводы диссертации, отражен личный вклад автора в проведенное исследование, охарактеризованы степень новизны и практическая значимость полученных результатов.

Личный вклад соискателя.

Диссертация является итогом исследований, проводившихся автором совместно с сотрудниками АО НПФ «Микран» и НОЦ "Нанотехнологии" ТУСУР. Автором, совместно с научным руководителем, формулировались цели работы, обсуждались пути их достижения, а также анализировались результаты эксперимента. Автором совместно с соавторами был опубликован ряд работ, представленных в списке литературы. Вклад основных соавторов заключался в проведении сложных технологических операций (напыление металлов, осаждение диэлектриков, плазмохимическое травление), в подготовке и проведении экспериментов, в обсуждении результатов исследований. Непосредственно автором проводилось создание топологических слоёв пластин, ведение пластин по маршруту, выполнение операций химических обработок пластин, измерения на постоянном токе, оптическая микроскопия. Вклад диссертанта в диссертационную работу является определяющим.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы основывается на применении физически обоснованных экспериментальных методик и современного высокоточного оборудования, воспроизводимости полученных результатов и их качественным согласием с результатами авторов других работ, проводимых в данном направлении.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 17 международных и 1 всероссийской научных конференциях.

Результаты диссертации опубликованы в полном объеме:

- 5 работ в журналах из перечня ВАК РФ;
- 6 работ проиндексировано в базе данных Scopus;
- опубликовано 11 работ в других научных изданиях.

Публикации соискателя, содержащие основные результаты, соответствуют требованиям пунктов 11 и 13 Положения о присуждении ученых степеней. Диссертация отвечает требованиям пункта 14 Положения о присуждении ученых степеней и не содержит заимствованных материалов или отдельных результатов без ссылок на авторов и источники заимствования. В диссертации отмечен факт использования научных работ, выполненных Фединым И.В. совместно со следующими авторами: Ерофеев Е.В., Федина В.В., Фазлеев А.П., Юрьева А.В., Степаненко М.В., Юрьев Ю.Н., Кутков И.В.

Значимость и новизна полученных результатов определяются разработкой технологии создания и исследованием характеристик диодов Шоттки на основе гетероструктур pGaN/AlGaN/GaN , выращенных на кремниевых подложках, в том числе: разработкой технологии создания низкотемпературных омических контактов; разработкой и исследованием влияния конструктивно-технологических особенностей изготовления барьера Шоттки на электрические характеристики мощных AlGaN/GaN диодов; разработкой технологического маршрута создания мощных диодов Шоттки на базе указанных гетероструктур.

Наиболее значимые новые научные результаты работы.

1. Впервые получены низкотемпературные омические контакты на основе металлизации Ta/Al к гетероструктуре AlGaN/GaN , выращенной на кремниевой подложке.

2. Установлено, что для диодов Шоттки, изготовленных на основе pGaN/AlGaN/GaN гетероструктуры, применение анодного рецесса на глубину до 75% от толщины барьерного слоя AlGaN перед формированием барьера Шоттки увеличивает прямой и обратный ток диода.

3. Предложен технологический маршрут создания мощных AlGaN/GaN диодов совместимый с технологией создания pGaN/AlGaN/GaN НЗ транзисторов.

Практическая значимость работы заключается в том, что: разработанная технология создания AlGaN/GaN диодов Шоттки (ДШ) на базе гетероструктуры pGaN/AlGaN/GaN позволяет объединить в монолитной интегральной схеме (МИС) диоды и НЗ транзисторы, что позволяет снизить массогабаритные показатели и улучшить характеристики высокоэффективных источников вторичного электропитания на основе GaN электронно-компонентной базы (ЭКБ). Предложенная технология получения омических контактов к AlGaN/GaN защищена патентом, а разработанные в ходе выполнения диссертации технологические режимы и процессы используются на производстве в НПК "Микроэлектроника" АО "НПФ "Микран".

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Материалы диссертационной работы могут быть использованы предприятиями микроэлектронной промышленности для формирования GaN ЭКБ, находящей применение в создании перспективных энергоэффективных источниках вторичного электропитания, АС/DC преобразователях, инверторах.

Предложенная технология получения омических контактов к AlGaN/GaN защищена патентом РФ 2696825, а разработанные в ходе выполнения диссертации технологические режимы и процессы используются на производстве в НПК «Микроэлектроника» АО "НПФ «Микран», что подтверждается актом внедрения.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 01.04.04 «Физическая электроника» по следующим областям исследований:

2. Твердотельная электроника, в том числе СВЧ- электроника, полупроводниковая электроника, акустоэлектроника, сверхпроводниковая электроника, спиновая электроника, оптоэлектроника, криоэлектроника.

4. Физические явления в твердотельных микро- и наноструктурах, молекулярных структурах и кластерах; проводящих, полупроводниковых и тонких диэлектрических пленках и покрытиях.

Замечания по содержанию и изложению материала.

1. Не совсем понятны основания включения в 3 пункт научной новизны «технологического маршрута», так как, на наш взгляд, это часть практической значимости.

2. В преамбуле автореферата никак не показана теоретическая значимость диссертации – ни формально, ни в составе научной новизны. Может создаться впечатление, что у автора было озарение, как выбрать правильные конструкцию, технологические режимы и маршрут.

3. Также приходится констатировать, что положения, выносимые на защиту, выглядят скорее как выписки из протоколов измерения, а не научные утверждения.

Заключение

Не смотря на отмеченные замечания, представленная диссертация является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных исследований изложены новые, научно обоснованные технические и технологические решения в области создания силовых диодов Шоттки на широкозонных полупроводниках, имеющие существенное значение для развития страны. Диссертационная работа «Мощные быстродействующие диоды на основе гетероэпитаксиальных структур нитрида галлия» полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор Федин Иван Владимирович заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Заключение принято по результатам рассмотрения диссертации на заседании научно-технического совета «Новосибирского завода полупроводниковых приборов с ОКБ», протокол № 012/05-2019 от 26 ноября 2019 г.

Отзыв составили:

Заместитель генерального директора
по научной работе – начальник ОКБ
АО «НЗПП с ОКБ», к.т.н.
Тел.: (383) 225-56-41,
e-mail: gluhov@nzpp.ru

Александр Викторович Глухов

и.о. начальника НОЦ ОКБ –
заместителя начальника ОКБ по научной работе
АО «НЗПП с ОКБ», к.т.н.
Тел.: (913) 701-20-73,
e-mail: chesnokov@nzpp.ru

Дмитрий Владимирович Чесноков

Подписи А.В. Глухова и Д.В. Чеснокова заверяю



В.В. Бориленко

630082, г. Новосибирск, ул. Дачная, 60, Акционерное общество «Новосибирский завод полупроводниковых приборов с ОКБ»