

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Афанасьева Алексея Валентиновича

на диссертацию Лебедевой Натальи Михайловны «Физические и конструктивно-технологические решения по созданию высоковольтных и лавинных 4H-SiC диодов» представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 — физика полупроводников

Индустрия традиционной кремниевой электронной компонентной базы для ряда областей применений подходит к физическим пределам своего эффективного использования и уже не может обеспечить перспективные рынки электродвижения, электропривода, энергообеспечения, где ключевыми факторами являются функциональная эффективность, надежность, энергетический и временной ресурсы. В области мощной и быстродействующей силовой электроники происходит безальтернативная смена материаловедческой базы на широкозонные полупроводники, среди которых ранее указанным характеристикам предпочтение на мировом уровне отдается карбиду кремния. В настоящее время на основе SiC изготавливаются такие важнейшие компоненты силовой электроники как высоковольтные МОП-транзисторы и высоковольтные диоды.

Использование 4H-SiC в лавинных приборах существенно повышает эффективность и снижает массогабаритные показатели силовых приборов и устройств на их основе. Для всех силовых приборов существуют физические и конструктивные проблемы, и карбид кремния не является исключением. Диссертационная работа Лебедевой Н.М. посвящена поиску решения проблемы преждевременного краевого пробоя, не позволяющей полностью реализовать потенциальные возможности карбидокремниевых приборов. **Актуальность** этой задачи не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из Введения, 6-и глав, Заключения и списка цитируемой литературы, включающего 141 наименование. Общий объем диссертации составляет 131 страницу, включая 70 рисунков и 3 таблицы.

В первой главе описаны основные свойства материала, физические процессы, происходящие при работе лавинных диодов, а также технологические методы, наиболее широко используемые для создания высоковольтных лавинных приборов на основе SiC.

Вторая глава посвящена моделированию высоковольтного диода с p - n -переходом и охранной системой в виде полуизолирующей i -области на периферии диода. Принцип формирования такой полуизолирующей области состоит в создании дефектов с глубокими энергетическими уровнями в запрещенной зоне, способных захватывать свободные носители заряда. При облучении SiC высокоэнергетичными ионами Ar с энергией 53 МэВ можно создать приповерхностный полуизолирующий слой толщиной ~ 10 мкм. Показано, что при использовании i -области такой толщины на периферии диода возможно достижение предельного для такого рода структуры напряжения.

Третья глава содержит детальное описание технологии создания опытного диода с p - n -переходом и охранной системой в виде полуизолирующей области, процесса разработки никелевых маскирующих элементов, защищающих активную область диода от облучения и являющихся частью контактной системы диода. Были измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) изготовленных диодов и сделаны выводы об эффективности такой охранной системы. Показано, что она близка к 100%.

В четвертой главе полуизолирующая область толщиной 9 мкм, полученная облучением высокоэнергетичными (53 МэВ) ионами Ar, использовалась в качестве диэлектрика в полевой обкладке, защищающей диоды Шоттки от преждевременного краевого пробоя. Был создан такой диод и детально описана технология его изготовления. Измеренные ВАХ диода показали, что обратные напряжения возрастают в 10 раз, а прямые не изменяются.

Пятая глава посвящена исследованию методов сухого травления SiC: ионно-лучевого и реактивного ионно-плазменного на примере полевого транзистора с затвором Шоттки. Исследование характеристик полученного прибора показало, что при использовании разработанной технологии сухого

травления профиль структуры и качество травленной поверхности обеспечивают максимально возможную при данном уровне легирования величину напряжения пробоя и низкий уровень токов утечки.

Шестая глава содержит моделирование высоковольтного лавинного диода с охранной системой в виде прямой фаски с малым (менее 10°) углом наклона. Оно показало, что уменьшение угла наклона позволяет значительно снизить величину электрического поля на поверхности фаски в области выхода p - n -перехода по сравнению с полем в объеме диода. Прямая фаска может быть эффективным конструктивным решением проблемы преждевременного краевого пробоя. По результатам моделирования впервые на SiC был создан диод с охранной системой в виде прямой фаски с углом наклона 8° , подробно описана разработанная технология его создания и проведены измерения его ВАХ. Показано, что эффективность такого способа защиты прибора от краевого пробоя близка к 100%.

В заключении указаны основные результаты диссертационного исследования. В рамках данного исследования было показано, что новые охранные системы как в виде полуизолирующей области, так и в виде прямой фаски эффективно решают проблему краевого пробоя в высоковольтных диодах на SiC, работающих в режиме мощного импульсного лавинного пробоя.

Научная новизна диссертации заключается в следующем: впервые предложены и реализованы новые способы защиты высоковольтных карбид-кремниевых приборов от поверхностного пробоя, позволившие реализовать режим объемного однородного лавинного пробоя при напряжениях, практически совпадающих с теоретически предельными значениями. В частности, на основе новых конструктивно-технологических решений разработаны высоковольтные (~ 1500 В) диоды с p - n -переходом и высоковольтные (~ 2000 В) диоды Шоттки, способные функционировать в режиме мощного импульсного лавинного пробоя при высоких плотностях тока ($\sim 10^3$ А/см²). Считаю, что **достоверность** полученных результатов бесспорна.

Практическая значимость работы заключается в разработке новых универсальных методов защиты высоковольтных 4H-SiC приборов от поверхностного пробоя. Эти методы могут быть использованы в технологии изготовления как уже существующих, так и при разработке новых перспективных приборов. По сравнению с существующими, разработанные в диссертации методы относительно просты в реализации, поскольку не требуют проведения высокотемпературных процессов, применения прецизионной литографии и применения узкоспециализированного технологического оборудования.

По диссертации имеются следующие **вопросы и замечания**:

1. В разделе 2.2 диссертации, посвященному моделированию охранной полуизолирующей области, показано, что эффективность охраны должна, в принципе, постепенно деградировать при повышении температуры из-за теплового выброса захваченных электронов в зону проводимости. Было бы важно экспериментально исследовать облученные диоды на предмет эффективности охраны при повышенных температурах, чего в диссертации, к сожалению, нет.

2. В работе продемонстрированы два типа $p^+-p-n_0-n^+$ диодов, выполненных с различной охранной системой (полуизолирующая i -периферийная область и структура с прямой фаской), имеющие идентичные ВАХ и величины напряжений лавинного пробоя. Поскольку диоды классифицированы в работе как ДДРВ (рис.56), то представляет несомненный интерес оценка влияния используемых охранных систем на скорость переключения диодов при работе в режиме «ключа размыкающего типа».

3. В главе 6 отмечается, что прямая фаска эффективна для защиты от поверхностного пробоя именно для приборов, выполненных на основе SiC-эпиструктур типа $p^+-p-n_0-n^+$. Хотелось бы услышать рассуждения автора о возможности использования таких приборов в качестве эффективных лавинных обострителей в структуре генераторов сверхкоротких импульсов.

Я хочу подчеркнуть, что сформулированные замечания и вопросы не снижают актуальности, научной и практической ценности полученных

результатов, не ставят под сомнение положения, выносимые на защиту, и выводы, сформулированные в диссертации.

Результаты диссертации были опубликованы в 8 статьях и представлены на 3 конференциях.

Автореферат и публикации в полной мере отражают содержание диссертационной работы, оформление автореферата соответствует требованиям ВАК РФ.

Таким образом, диссертационная работа Н.М. Лебедевой «Физические и конструктивно-технологические решения по созданию высоковольтных и лавинных 4H-SiC диодов» является законченным исследованием и соответствует требованиям положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 - физика полупроводников.

7.04.2025г.

Афанасьев Алексей Валентинович

кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Адрес: Россия, Санкт-Петербург, 197022, ул. Профессора Попова, дом 5
литера Ф

Телефон: (812)234-27-57

E-mail: avafanasev@etu.ru

Подпись Афанасьева А.В. заверяю: