

ОТЗЫВ

официального оппонента 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»

Одними из важнейших элементов современной силовой электроники являются высоковольтные и лавинные диоды, способные работать в режиме мощного импульсного пробоя. Основным материалом, используемым в силовой электронике, сегодня является кремний, однако карбид кремния (SiC) по некоторым важнейшим электрофизическим характеристикам существенно превосходит кремний. Использование карбида кремния дает возможность снизить массогабаритные показатели силовых приборов и устройств на их основе и существенно повысить их эффективность. Несмотря на все преимущества приборов на SiC, по-прежнему существуют физические и конструктивные проблемы, не позволяющие полностью реализовать потенциальные возможности таких приборов. Поиск решения таких проблем весьма актуален. Диссертация Н. М. Лебедевой посвящена как раз очерченной области физики и техники полупроводников.

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

В первой главе на примере идеализированного одномерного диода рассматриваются основные характеристики лавинного пробоя, основные свойства SiC, а также полупроводниковые технологии, используемые при создании высоковольтных лавинных приборов.

Во второй главе проведено моделирование высоковольтного диода с p-n-переходом и охранной системой в виде полуизолирующей области. Моделирование показало, что такая охранный система эффективна, если полуизолирующие слои на периферии диода будут сравнимы по толщине с толщиной блокирующей n-базы. Принцип действия такой охранной системы состоит в компенсации примесной проводимости в приповерхностной области полупроводниковых структур. Облучение проводилось высокоэнергетичными ионами Ar с энергией 53 МэВ, что позволило получить достаточно толстые полуизолирующие слои (толщиной около 10 мкм).

Третья глава содержит детальное представление технологии создания опытного диода с p-n-переходом с описанной выше охранной системой. Для защиты активной области диода от облучения использовались никелевые

маскирующие элементы толщиной 12 – 14 мкм, которые являлись частью контактной системы диода. На полученных приборах были измерены вольт-амперные характеристики, анализ которых показал, что эффективность работы такой охранной системы близка к 100%: напряжение пробоя практически совпадает с расчетным значением.

В четвертой главе полуизолирующая область толщиной около 9 мкм использовалась в охранной системе диода Шоттки в комбинации с полевой обкладкой, представляющей собой вынесенный на 100 мкм за пределы активной области контакт. Был создан опытный диод Шоттки с такой охранной системой. Из анализа измеренных вольт-амперных характеристик следует, что толстый полуизолирующий слой, полученный облучением, в 10 раз повышает пробивное напряжение диода.

Пятая глава посвящена описанию исследований 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 профиль структуры и качество травленной поверхности обеспечивают максимально возможную при данном уровне легирования величину напряжения пробоя и низкий уровень токов утечки.

В шестой главе предложен альтернативный вариант решения проблемы преждевременного краевого пробоя в высоковольтных лавинных диодах с р-п-переходом в виде прямой фаски с малым углом наклона. Было проведено моделирование такой структуры, которое показало, что при уменьшении угла наклона фаски от плоскости р-п-перехода положение максимума электрического поля смещается с поверхности фаски в объем диода. Весьма впечатляет результат, в соответствии с которым при угле наклона 3° величина поля на поверхности фаски в области р-п-перехода в 4 раза меньше поля в объеме. Однако для эффективного предотвращения поверхностного пробоя такой охранной системой столь малого угла наклона не требуется: достаточно угла наклона фаски менее 10° . Для изготовления диодов по групповой технологии были разработаны методы реактивного ионно-плазменного травления SiC, позволяющие получить угол наклона фаски 8° . Были изготовлены опытные диоды, на которых измерялись вольт-амперные характеристики. Анализ этих характеристик показал высокую эффективность (близкую к 100%) такой охранной системы.

В заключении указаны основные результаты диссертации. Показано, что охранные системы, разработанные на основе численного моделирования и многочисленных экспериментов, эффективно решают проблему краевого

пробоя в высоковольтных диодах на 4H-SiC, работающих в режиме мощного импульсного лавинного пробоя.

Научная новизна диссертации заключается в следующем: на основе моделирования и новых оригинальных 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 ($\sim 10^3 \text{ А/см}^2$). Впервые предложены и реализованы новые оригинальные способы защиты высоковольтных карбид-кремниевых приборов от поверхностного пробоя, позволившие реализовать режим объемного однородного лавинного пробоя при напряжениях, практически совпадающих с теоретически предельными значениями.

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

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

1. Чем обусловлены выбор энергии облучающих структуру ионов аргона и выбор толщины полуизолирующей области?

2. Проведенные исследования и полученные результаты представляются чрезвычайно важными с точки зрения их реализации в широком (промышленном) масштабе. Автору следовало бы указать на перспективу реализации полученных в работе результатов.

3. Считаю, что диссертация смотрелась бы ярче, если бы автор в той или иной форме представил сравнение с результатами работ других групп по эффективности защиты от краевого пробоя.

4. Менее существенное замечание касается терминологии. Диссертант в тексте диссертации и в своих статьях использует термин «прямая» фаска. Действительно, термины «прямая» и «обратная» фаска широко употребляются в отечественной литературе. Однако в англоязычных источниках общеупотребительными являются термины «отрицательная» и «положительная» фаска (negative and positive bevel). Представляется, что правильнее было бы использовать термины «отрицательная» и «положительная» фаска. Это необходимо для правильного перевода статей с русского на английский. Далее, в тексте диссертации для терминов «быстрый

термический отжиг» в некоторых разделах используется аббревиатура БТО, а в некоторых других – RTA (от английского Rapid Thermal Annealing).

5. С сожалением следует отметить, что количество пунктуационных недочетов и мелких опечаток весьма значительно.

Сделанные замечания 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.

Текст написан понятным языком, хорошо скомпонован, что облегчает восприятие содержания работы.

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

31.03.2025г.

Векслер Михаил Исаакович

доктор физико-математических наук, профессор Российской академии наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН», главный научный сотрудник, заведующий лабораторией.

Адрес: 194021, СПб, ул. Политехническая д. 26

Телефон: (812)292-71-23

E-mail: vexler@mail.ioffe.ru

Подпись Векслера М.И. заверяю: