

На правах рукописи

Лебедева Наталья Михайловна

**Физические и конструктивно-технологические решения по созданию высоковольтных
и лавинных 4H-SiC диодов**

1.3.11 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-
Петербург

Научный руководитель:

Иванов Павел Анатольевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории мощных полупроводниковых приборов

Консультант:

Левинштейн Михаил Ефимович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, главный научный сотрудник лаборатории физики полупроводниковых приборов

Официальные оппоненты:

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 мощных полупроводниковых приборов

Афанасьев Алексей Валентинович, кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ведущий научный сотрудник Инжинирингового центра микротехнологии и диагностики (ИЦ ЦМИД).

Ведущая организация:

АО «Группа «КРЕМНИЙ-ЭЛ», 241037, г. Брянск, ул. Красноармейская, 103

Защита состоится “_____” _____ 2024 г. в _____ на заседании диссертационного совета 34.01.02 при ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук» по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук», www.ioffe.ru.

Автореферат разослан “_____” _____ 202_г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Сорокин Л. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Высоковольтные и лавинные диоды в настоящее время являются важнейшими элементами силовой полупроводниковой электроники. Сейчас области применения силовой электроники охватили практически все сферы жизнедеятельности человека. Существующая силовая преобразовательная техника, основанная на кремниевых приборах, постепенно перестает удовлетворять нарастающим требованиям по функциональным возможностям, массе, объему, ресурсу работы и надежности. Для того чтобы достичь максимальной эффективности преобразования энергии, необходимы силовые приборы, работающие при высокой плотности мощности и с минимальными энергетическими потерями. В настоящее время таким требованиям в максимальной степени удовлетворяют силовые приборы на основе 4H-политипа карбида кремния (4H-SiC).

4H-SiC по основным электрофизическим характеристикам намного превосходит кремний. Использование твердотельных ключей на основе 4H-SiC взамен используемых сегодня кремниевых приборов позволяет кардинально повысить быстродействие силовых приборов при заданной мощности. Возможность работы 4H-SiC приборов при более высоких температурах позволяет резко уменьшить габариты систем охлаждения и упростить их конструкцию. Это дает возможность снизить массогабаритные показатели силовых приборов и устройств на их основе и существенно повысить их эффективность. Таким образом, дальнейшие разработки физических принципов и конструктивных решений, направленных на принципиальное улучшение свойств и параметров приборов на основе 4H-SiC представляет собой важную и актуальную задачу.

Важнейшими элементами силовой полупроводниковой электроники являются приборы, работающие в режиме мощного импульсного лавинного пробоя. Несмотря на большое разнообразие приборов с характеристиками, выгодно отличающимися приборы на основе 4H-SiC от аналогичных кремниевых приборов, по-прежнему существуют физические и конструктивные проблемы, не позволяющие полностью реализовать потенциальные возможности карбид-кремниевых приборов. Поиск решения таких проблем в настоящее время остается в высшей степени актуальным.

Основной целью работы была разработка на основе всестороннего физического анализа подходов, позволяющих реализовать потенциальные возможности высоковольтных SiC структур, устранив преждевременный краевой пробой и повысив напряжение пробоя приборов до теоретически предельной величины. Сделанные на

основе такого анализа выводы позволили разработать новые конструктивно-технологические решения, предложить и реализовать высокоэффективные охранные системы, синтезирующие физическое моделирование, выбор конструкции структур, разработку технологии, создание лабораторных образцов диодов и их экспериментальные исследования.

Научная новизна: 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).

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.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В 4H SiC p^+ - p - n - n^+ -диодах с защитой от краевого пробоя как в виде прямой фаски, так и в виде краевой полуизолирующей i -области реализуется режим однородного по площади лавинного пробоя при напряжении, близком к теоретически предельному значению. При этом достигнута максимальная величина рассеиваемой энергии лавинного импульса, определяемая допустимым перегревом структуры.
2. Защита от краевого пробоя в виде комбинации краевого полуизолирующего контура, созданного облучением высокоэнергетичными (53 МэВ) ионами аргона, и полевой обкладки позволяют создать высоковольтные (блокирующее напряжение ~ 2 кВ) 4H-SiC диоды Шоттки с однородным по площади лавинным пробоем и близким к теоретическому пределу коэффициентом идеальности $n \approx 1.02$.
3. Сохранение высокого качества материала в структуре 4H-SiC при создании охранных контуров в виде полуизолирующей i -области обеспечивается созданием

маски определенной конфигурации, которая надежно защищает активную область от облучения, а в транзисторе с затвором Шоттки микропрофилированием, что подтверждается превалирующей диффузионной составляющей тока и коэффициентом идеальности перехода, близким к единице при прямом смещении.

Личный вклад автора. Все результаты, приведенные в диссертации, получены самим автором или при его непосредственном участии. Личный вклад автора состоит в разработке технологий постростовой обработки важнейших приборных 4H-SiC-структур, включающих создание охрannого контура в виде полуизолирующей i -области для высоковольтных диодов с p - n -переходом и диодов Шоттки, а также охрannого контура в виде прямой фаски для высоковольтных диодов с p - n -переходом. Диссертантом были проведены экспериментальные исследования различных этапов постростовой технологии, разработан оптимальные технологические маршруты изготовления приборов, по результатам которых были созданы опытные партии приборов. Автор принимала активное участие в моделировании и исследовании параметров изготовленных приборов.

Апробация работы. Результаты, вошедшие в диссертационную работу, опубликованы в авторитетных реферируемых российских и международных журналах и докладывались на различных конференциях: 63-й Всероссийская научная конференция МФТИ (Московского Физико-технического Института) – 23-29 ноября 2020 года; X Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, СПбГЭТУ «ЛЭТИ») – 31 мая - 4 июня 2021 года; 24-я Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники» (Ульяновск) – 26-28 октября 2021 г.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 8 работ, список которых приведен в Заключение.

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

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована цель, научная новизна и практическая значимость работы, описаны объекты исследования, сформулированы основные задачи, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава “Лавинный пробой идеализированного одномерного диода и краткий обзор основных постростовых технологий” представляет собой обзор основных физических принципов работы приборов на основе 4H-SiC, а также обзор основных этапов постростовой обработки 4H-SiC, лежащих в основе создания высоковольтных приборов. Глава состоит из трех параграфов.

В параграфе 1.1 рассматриваются особенности лавинного пробоя на примере идеализированного одномерного диода в предположении, однородного по площади пробоя. Такой анализ диода позволяет определить предельно достижимые параметры структур.

В параграфе 1.2 проведен обзор различных постростовых технологий, использующихся при создании приборов на основе 4H-SiC: способов реактивного ионного травления (РИТ), особенности создания омических контактов и контактов с барьером Шоттки; создание окислов на поверхности SiC и основные используемые радиационные технологии.

В параграфе 1.3 рассматриваются и анализируются особенности существующих охранных систем высоковольтных SiC приборов, позволяющие предотвратить краевые эффекты и поверхностный пробой и реализовать SiC приборы с близкими к предельным теоретически возможным характеристикам.

Во второй главе “Моделирование охранной системы в виде краевой полуизолирующей области для высоковольтных лавинных диодов с p-n-переходом” описываются принципы формирования охранной системы в виде периферийных полуизолирующих слоев. Излагается процесс моделирования и разработки технологии создания такой охранной системы для высоковольтных диодов.

В §2.1 описана технология создания приповерхностных полуизолирующих слоев [1] с помощью облучения структур высокоэнергетичными атомами аргона [2]. Проведен детальный анализ основных параметров полученных слоев.

В §2.2 проведено двумерное численное моделирование, позволившее проанализировать эффективность такого подхода с точки зрения предотвращения краевого (поверхностного) пробоя. Для моделирования использовался программный пакет SILVACO TCAD [3]. Показано, что краевой полуизолирующий контур, созданный методом, описанным в §2.1, может служить эффективной охранной системой в высоковольтных диодах на основе 4H-SiC, в том числе при повышенных температурах (приблизительно до 600 K). Результаты, описанные в данном параграфе опубликованы в работе [A5].

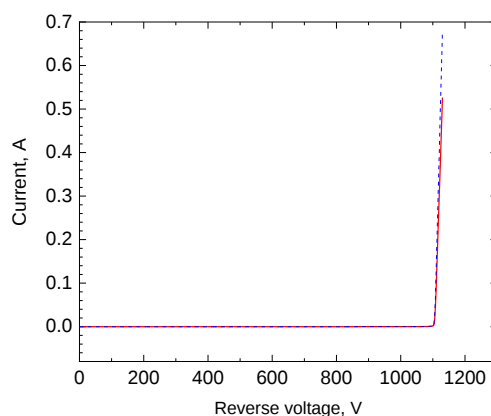


Рис. 1. Расчетные обратные ВАХ идеализированного одномерного диода без i -области (пунктирная линия) и модельного диода с i -областью (сплошная линия) при изменении напряжения от нуля до 1130 В ($T = 300$ К).

В третьей главе “Создание высоковольтных лавинных диодов с p - n -переходом и охранной системой в виде краевой полуизолирующей области” описана разработка технологии маскирования активной области прибора от излучения при создании такой охранной системы. Описана технология изготовления опытного образца с такой охранной системой и проведены измерения основных параметров диода.

В рамках этой работы, разработана технология создания специальных маскирующих элементов на основе локального гальванического осаждения металлических столбиков с вертикальными стенками (§3.1).

Маскирующие элементы должны иметь вертикальные стенки и быть достаточно толстыми для полного поглощения высокоэнергетичных частиц (например, глубина проникновения ионов аргона с энергией 53 МэВ для металлов составляет 5 - 7 мкм). Кроме того, маскирующие элементы должны иметь хорошие адгезионные характеристики и высокую электропроводность, т.к. они являются частью контактной системы диода. Наконец, они должны допускать проведение постимплантационного отжига при температурах до 600 °С. Показано, что наиболее технологичным вариантом формирования маскирующих элементов является локальное гальваническое осаждение металлических столбиков с вертикальными стенками (высотой ~ 10 мкм) поверх анодного контакта, расположенного над активной областью (рис. 2).

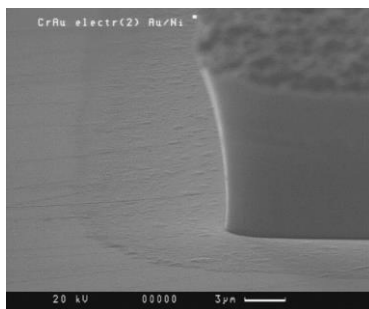


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение металлического столбика из никеля, выращенного локальным гальваническим осаждением после удаления коммутационного слоя.

В §3.2 подробно описана разработанная технология изготовления диодов, включающая химическую очистку пластины на разных стадиях технологического процесса, формирование рисунка методом контактной литографии, нанесение и термический отжиг металлов, реактивно-ионное травление, резку пластины на чипы и их корпусирование.

Для изготовления диодов использовалась коммерческая 4H-SiC пластина n -типа с выращенной методом CVD-эпитаксии $p^+p\text{-}n_o\text{-}n^+$ -структурой со следующими параметрами:

Табл. 1 Основные параметры эпитаксиальных слоев.

	Концентрация легирующей примеси (см ⁻³)	Толщина (мкм)
p^+	10^{19}	1
p	$8 \cdot 10^{16}$	2
n_o	$8 \cdot 10^{15}$	7
n^+	$1 \cdot 10^{18}$	1

Последовательность основных технологических операций включала:

1. Формирование сплошного катодного омического контакта. Контактным металлом служил никель (толщина слоя около 0.3 мкм).
2. Формирование на поверхности p^+ -слоя анодных омических контактов. Контактным слоем служила комбинация из титана и хрома (толщины обоих слоев составляли 50 нм), нанесенная электронно-лучевым испарением в вакууме и отожженная при температуре 950 °С в течение 5 минут. Далее ионным распылением поверх вожженного контактного слоя наносился слой никеля толщиной 0.3 мкм.

3. Формирование охранного контура, предотвращающего поверхностный пробой. При облучении для маскирования объема диодов от потока ионов на анодные контакты осаждались никелевые столбики высотой 10 - 12 мкм (технология локального гальванического осаждения металлических столбиков с вертикальными стенками подробно описана в §2.2). Облучение проводилось ионами Ag^{+8} , ускоренными на Уникальной Научной Установке (УНУ) "Циклотрон ФТИ" до энергии 53 МэВ.

4. Резка пластин на чипы. Пластина с дискретными диодными структурами разрезалась алмазным диском на отдельные чипы размером $2 \times 2 \text{ мм}^2$.

5. Корпусирование чипов. Изготовленные чипы напаивались в металlostеклянные корпуса с последующим присоединением анодных выводов.

В §3.3 приводятся и анализируются параметры изготовленных приборов. Для оценки эффективности работы охранного контура проводился расчет обратной вольтамперной характеристики (ВАХ) идеализированного одномерного диода с теми же параметрами структуры, что и у реальных диодов.

Обратные ВАХ измерялись с помощью схемы бескоммутационного индуктивного переключателя (Unclamped inductive switching test, (UIS)). Через изготовленные диоды пропусклась серия одиночных импульсов лавинного тока; амплитуда тока поднималась ступенями приблизительно по 0.5 А. Длительность импульсов могла изменяться в интервале от нескольких сотен наносекунд до 4 мкс.

На рис. 3 точками показана импульсная обратная вольтамперная характеристика исследуемого лавинного диода. Сплошная линия соответствует рассчитанной в Mathcad расчетной характеристике.

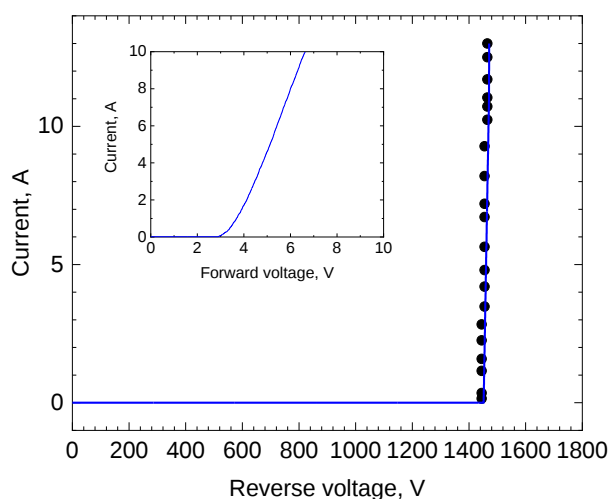


Рис. 3. Измеренная импульсная обратная ВАХ импульсного $p^+-p-n_0-n^+$ -диода (точки) и рассчитанная обратная ВАХ идеализированного одномерного диода (сплошная линия). На вставке показана прямая ВАХ.

Как видно из рис. 3, наблюдается очень хорошее совпадение между расчетной и экспериментальной характеристиками. Резкий деструктивный пробой наблюдается при обратном напряжении 1460 В. При длительности обратного тока 4 мкс диоды без деградации выдерживали импульсы амплитудой более 10 А, что при размере анодного контакта 960×960 мкм соответствовало плотности тока $\sim 1100 \text{ А/см}^2$ и пиковой мощности $\sim 15 \text{ кВт}$. Дифференциальное сопротивление диода в режиме развитого лавинного пробоя составляет $\approx 3 \text{ Ом}$, что соответствует удельному сопротивлению $\sim 0.03 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$. Столь малая величина удельного сопротивления свидетельствует о том, что лавинный пробой в высокой степени однороден по площади.

При дальнейшем увеличении амплитуды импульса происходит резкая необратимая деградация прибора вследствие теплового пробоя. В исследуемых структурах наступлению такого пробоя при длительности импульса 4 мкс соответствовала амплитуда тока 13.5 А.

Лавинная энергия (E_{max}), которая рассеивается диодом до того, как происходит необратимый тепловой пробой, может быть рассчитана как $E_{\text{max}} = \int_0^{t^*} I(t)U(t)dt$, где t^* – момент времени, при котором происходит отказ. Оцененная из представленных в работе экспериментальных зависимостей величина $E_{\text{max}} \approx 50 \text{ мДж}$ (5 Дж/см^2). Эта величина сравнима с лучшими опубликованными ранее результатами [4].

Расчет критической температуры, при которой происходит необратимый отказ прибора вследствие теплового пробоя, оценен в работе двумя способами. Первый способ основан на учете энергии, выделяющейся в приборе за время импульса и оценке характерной длины, на которую распространяется тепло за время импульса. Перегрев прибора, сопровождающийся отказом, при расчете этим методом дает значение $\Delta T = 870 \text{ К}$ при длительности импульса $\Delta t = 4 \text{ мкс}$. Второй способ основан на учете температурной зависимости напряжения пробоя. Расчетное значение ΔT , в этом случае составляет 850 К. Как видно, обе оценки хорошо согласуются. Дополнительные оценки показывают, что оцененная температура при отказе (1150 К) сравнима с температурой, при которой наступает фундаментальное ограничение на работоспособность диода. При этой температуре концентрация собственных носителей становится сравнимой с концентрацией легирующей примеси в базовой области диода.

Прямые ВАХ изготовленных диодов измерялись с помощью цифрового характериографа Л2-100. На вставке рис. 3 показана типовая прямая ВАХ, измеренная при токах до 10 А (плотность тока 10^3 А/см^2). Измерения проводились в режиме

однократного запуска развертки по напряжению. Таким образом, полученную зависимость с хорошей точностью можно считать изотермической. Как видно из рисунка, напряжение открывания диодов (cut-off voltage) составляет около 3 В, а дифференциальное сопротивление в открытом состоянии - около 0.3 Ом. Результаты этой главы опубликованы в статье [A7].

В четвертой главе “Высоковольтные 4H-SiC диоды Шоттки с полевой обкладкой” для повышения рабочего напряжения высоковольтных 4H-SiC диодов Шоттки до значения 2000 В разработана технология, сочетающая комбинацию краевой полуизолирующей *i*-области с эффективной полевой обкладкой. Детальный анализ и методика численного расчета полевой обкладки содержатся в работе [5]. Полевая обкладка позволяет «вынести» точку максимальной напряженности электрического поля за пределы рабочей области прибора, в область краевой полуизолирующей *i*-области. Описана технология изготовления опытного образца и проведены измерения основных параметров диода.

В §4.1 описана технология изготовления опытного диода с барьером Шоттки. Для изготовления диодов была использована коммерческая эпитаксиальная n - n^+ (подложка)-структура (уровень легирования и толщина n -слоя $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и 20 мкм, соответственно). Для подавления краевого пробоя на периферии активной области диодов формировалась полуизолирующая *i*-область толщиной $\sim 9 \text{ мкм}$, а контакт Шоттки был вынесен за пределы активной области структуры на 100 мкм (полевая обкладка) (рис. 4).

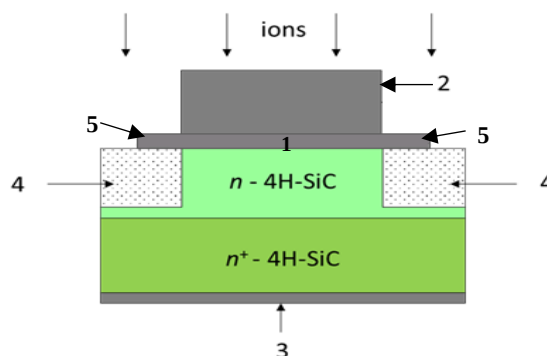


Рис. 4. Конструкция 4H-SiC ДШ с полевой обкладкой и полуизолирующим слоем, созданным с помощью облучения ионами аргона: 1 – контакт Шоттки, 2 – Ni маска для защиты активных областей структур, 3 – омический контакт, 4 – *i*-4H-SiC, 5 – полевая обкладка.

Диэлектрический слой создавался с помощью локальной ионной имплантации ионов аргона с энергией 53 МэВ. Для маскирования активных областей диодных структур от

облучения на Шоттки-контактах локальным гальваническим осаждением выращивались никелевые столбики с вертикальными стенками высотой 10 - 12 мкм (подробная технология описана в §3.1).

В §4.2 представлены экспериментальные результаты. Для качественных измерений ВАХ использовался лабораторный высоковольтный (до 4000 В) характериограф. На время измерений пластина погружалась во фтор-углеродную жидкость во избежание искрения по поверхности при напряжениях свыше 1000 В. Для точных измерений ВАХ на постоянном токе (в том числе при повышенных температурах) использовался специальный столик, снабженный прижимной иглой и системой подогрева кварцевой лампой до температуры 500 К (точность поддержания температуры ± 2 К). Измерения проводились в вакууме. Прямые ВАХ измерялись при токах в диапазоне 10^{-11} - 10^{-3} А, а обратные – в диапазоне 10^{-11} - 10^{-4} А.

На рис. 5 показаны типичные прямые ВАХ необлученных и облученных аргоном диодов, измеренные при малых токах.

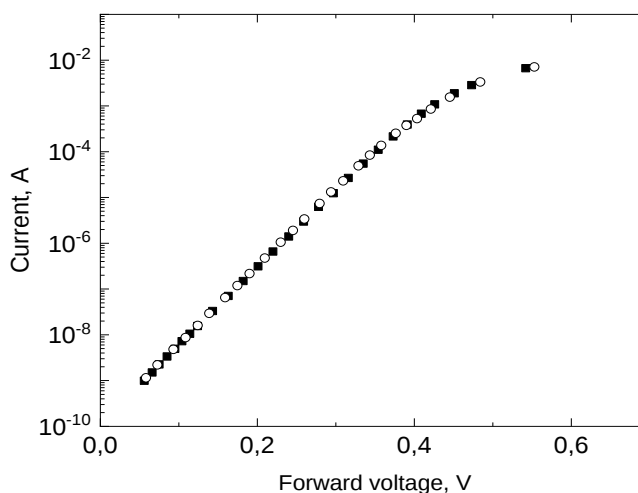


Рис. 5. Типичные прямые ВАХ не облученных (кружки) и облученных (квадраты) аргоном диодов.

Как видно, прямые ВАХ после облучения практически не изменяются, что свидетельствует о том, что активная область диодов была надежно защищена от облучения. На рис. 6 показаны обратные ВАХ необлученных и облученных диодов, непосредственно сфотографированные с экрана высоковольтного характериографа.

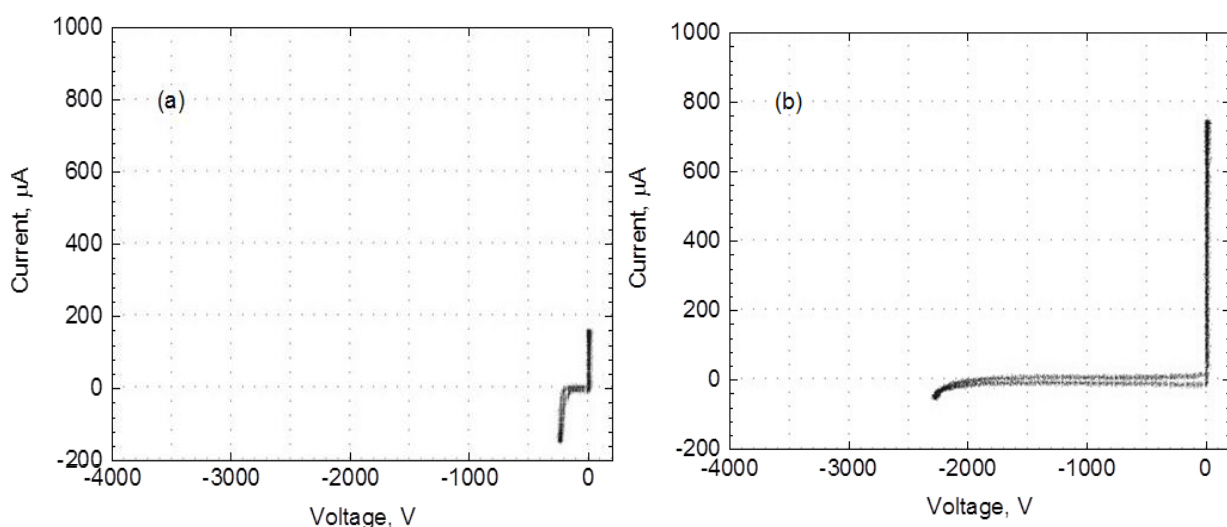


Рис. 6. Типичные обратные ВАХ диодов (а) необлученных и (б) облученных аргонном, сфотографированные с экрана высоковольтного характериографа. Шкала напряжения одина для обоих графиков.

Как видно, обратные ВАХ после облучения кардинально улучшаются: напряжение, при котором начинается заметный рост обратного тока, увеличивается с ~ 200 В до ~ 2000 В.

Анализ ВАХ диодов с разработанной системой защиты от поверхностного пробоя показал, что вольтамперные характеристики приборов как в прямом, так и в обратном направлении хорошо описываются моделью термоэлектронной эмиссии. При этом коэффициент идеальности ВАХ в диапазоне температур 295 - 380 К составлял ~ 1.02 . Суммируя полученные в данной главе результаты, можно сделать вывод, что охранный контур в виде комбинации краевого полуизолирующего контура, созданного облучением высокоэнергетичными (53 МэВ) ионами аргона, и эффективной полевой обкладки позволяют создать высоковольтные (блокирующее напряжение ~ 2 кВ) 4Н-SiC диоды Шоттки с близким к теоретическому пределу коэффициентом идеальности. Результаты, содержащиеся в этой главе, описаны в работе [А6].

В пятой главе “Микропрофилирование 4Н-SiC структур сухим травлением” описывается разработанная нами технология микропрофилирования 4Н-SiC методами сухого травления, сочетающая низкую температуру проводимых технологических операций, высокую чистоту обработки, требуемую селективность по отношению к разным маскирующим материалам, и высокую разрешающую способность.

В §5.1 описаны параметры структуры, которая использовалась для проведения исследований реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ). Исходная структура

состоит из полуизолирующей 4H-SiC подложки с удельным сопротивлением $\sim 10^5$ Ом·см, слабо легированного буферного слоя p -типа проводимости толщиной 0.5 мкм, умеренно легированного канального слоя n -типа проводимости толщиной 0.5 мкм и сильно легированного подконтактного n^+ -слоя толщиной 0.5 мкм.

Изготовление полевого транзистора с затвором Шоттки включает следующие этапы:

1) *Изоляция дискретных транзисторных структур*, осуществляемая травлением мезаструктур до полуизолирующей подложки. Для этого использовался метод ионно-лучевого травления (ИЛТ).

2) *Локализация активного канала в n -слое*, в котором с помощью сухого травления вытравлена канавка на определенную глубину. Канавка формируется методом реактивного ионно-плазменного травления.

3) *Высокотемпературное (1150°C) окисление в атмосфере сухого кислорода* проводилось для дополнительной защиты и обработки поверхности перед напылением барьера и омических контактов. Толщина окисла составляла ~ 60 нм.

4) *Напыление омических контактов истока и стока на n^+ -слое* проводилось методом взрывной фотолитографии. В качестве омических контактов использовалась комбинация слоёв титана и никеля. Затем контакт вжигался при температуре 950°C .

5) *Формирование на дне канавки металлического (Mo) затвора Шоттки*, управляющего проводимостью канала. Для этого также использовался метод взрывной фотолитографии. После напыления в высоком вакууме Mo вжигался на 600°C .

6) *Утолщение омических контактов истока и стока*. Для этого проводилось напыление Al толщиной не менее 1.5 мкм. Процесс проводился также методом взрывной фотолитографии. Использовалась двухслойная маска с использованием фоторезиста и специального LOR-резиста, который позволяет получить грибовую форму профиля маски и упрощает процесс взрыва толстых металлов.

В §5.2 описаны эксперименты по обработке мезаструктур методом ионно-лучевого травления. Селективность этого процесса по отношению к маскирующим материалам обычно невысока, и это обстоятельство позволяет, используя маску из фоторезиста, формировать при травлении наклонные стенки, которые необходимы для создания маски фоторезиста и напыления металла. Результирующий наклон будет зависеть от соотношения скоростей травления полупроводника и маски, а также от профиля края маски: чем он более пологий, тем больше будет результирующий наклон стенки мезаструктуры. Полученные профили травления мезаструктур показаны на рис. 7. Как видно, стенки мезы гладкие и пологие. Глубина травления составляет ~ 1.7 мкм.

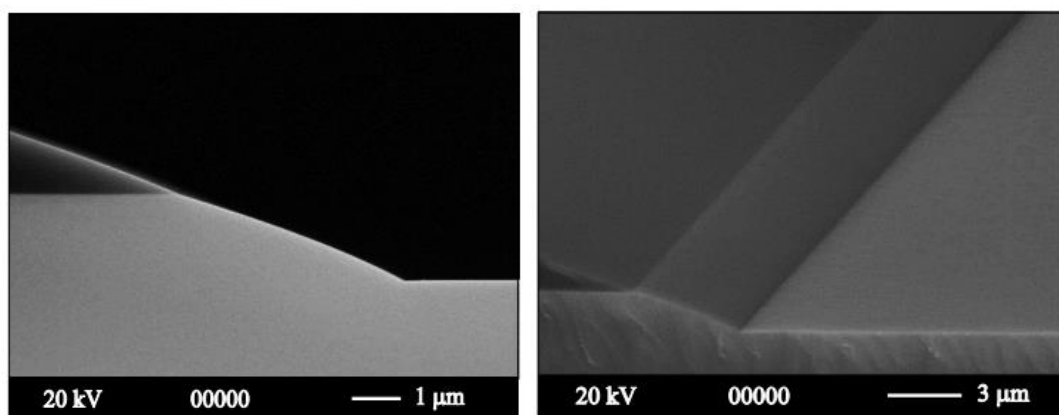


Рис. 7. Электронно-микроскопическое изображение профиля ионно-лучевого травления мезоструктур через маску фоторезиста.

В §5.3 описаны эксперименты по травлению канала методом реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ). Особенность такого травления заключается в том, что при селективном травлении разных материалов методом РИПТ, мощный поток ионов поступает на основание ступеньки канала (образующейся на границе с маской при травлении полупроводника), вследствие отражения ионов от вертикальной поверхности ступеньки под скользящими углами: скорость травления, определяемая как физическим распылением, так и ионно-стимулированными реакциями, повышается у основания ступеньки, что приводит к образованию канавки у основания протравливаемой ступеньки. Еще одна особенность РИПТ заключается в том, что при травлении через металлическую маску стенка протравливаемой ступеньки получается строго вертикальной, которую можно использовать при создании диодов. Вертикальная стенка SiC покрывается монослоем графита и, поскольку она не подвергается ионной бомбардировке, блокирует латеральное травление. Для целей прецизионного травления образование подобных канавок недопустимо, поскольку толщина канала 4H-SiC полевого транзистора обычно составляет 0.2 - 0.3 мкм, в то время как глубина канавок у истокового и стокового выступов может достигать единиц микрометров. При изменении параметров процесса травления удалось добиться того, что канавка у основания ступеньки не образуется, однако имеется явно выраженный подтрав под маску, что говорит об относительно невысокой анизотропии процесса. Если в качестве маски использовать фоторезист (рис. 8), то в разработанных режимах травления РИПТ 4H-SiC в смеси гексафторида серы и кислорода можно получить гладкую поверхность вытравленного рельефа канала за счет того, что селективность по отношению к фоторезисту существенно меньше, чем селективность по отношению к никелевой маске. При этом получаются слегка наклонные стенки, зависящие от толщины и

профиля фоторезиста. Наилучший результат был достигнут при использовании маски из толстого фоторезиста без термообработки. При этом получились гладкие стенки, с относительно небольшим наклоном от вертикали. Глубина травления канала составляет ~ 0.6 мкм.

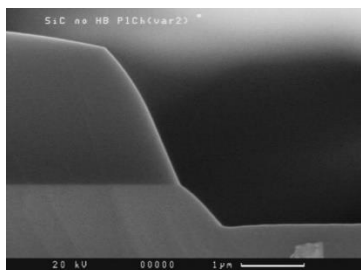


Рис. 8. Электронно-микроскопическое изображение профиля канала при использовании РИПТ через маску фоторезиста.

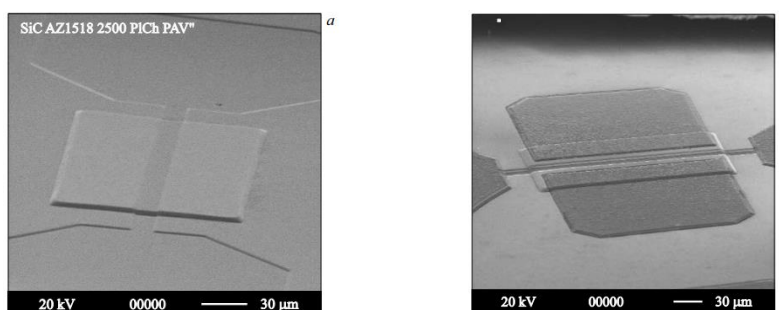


Рис. 9. Электронно-микроскопическое изображение профилированной структуры 4H-SiC (a) и готового 4H-SiC-ПТШ (b).

В §5.4 описаны электрические характеристики полевого транзистора с барьером Шоттки (ПТШ), полученного с использованием описанных способов «сухого» травления.

Рассчитанный из прямой ВАХ фактор идеальности составляет $n \approx 1.07$. Обратные ВАХ затвор–исток были измерены при напряжениях до 300 В и температурах до 190 °С. Рост обратного тока начинался только при обратном напряжении ~ 250 В, при котором максимальное электрическое поле в промежутке сток–затвор достигало величины $\sim 1.5 \cdot 10^6$ В/см. (Важно заметить, что эта величина близка к критическому полю лавинного пробоя в 4H-SiC [6]). Таким образом можно утверждать, что полученный в результате разработанной технологии сухого травления профиль структуры и качество травленной поверхности обеспечивает максимально возможную при заданном уровне легирования величину напряжения пробоя.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что прямые и обратные ВАХ барьера Шоттки затвор–исток весьма близки к идеальным, что свидетельствует о

высоком качестве подготовки поверхности канала перед формированием контакта Шоттки.

Разработанные низкотемпературные способы микропрофилирования могут быть альтернативой высокотемпературному газовому травлению. Данные технологии потенциально пригодны и для других приборов. В частности, формирование мезаструктур с наклонными стенками может оказаться востребованным для создания высоковольтных вертикальных диодов с так называемой «положительной» фаской, предотвращающей поверхностный пробой. Результаты, содержащиеся в этой главе, описаны в работе [А3].

В шестой главе «Высоковольтные лавинные диоды с p - n -переходом и прямой фаской» впервые проведено моделирование и разработка технологии новой охранной системы для высоковольтных лавинных диодов с применением прямой краевой фаски, описана технология изготовления опытного образца и проведены измерения основных параметров диода.

В водной части главы описываются типы диодов, для которых может быть эффективно применение прямой фаски.

В §6.1 в рамках программы, реализующей численное моделирование двумерных электростатических полей методом конечных элементов, проделаны расчеты распределения электрического поля в объеме и на поверхности высоковольтного диода. в зависимости от параметров прямой фаски. Угол фаски α варьировался в пределах от 3° до 11° градусов. Результаты моделирования показывают, что для меза-эпитаксиальных $4H$ -SiC p^+ - p - n - n^+ -диодов прямая фаска может быть эффективным конструктивным решением проблемы краевого пробоя за счет уменьшения поверхностного поля до величины, меньшей поля в объеме.

В §6.2 детально описана разработка технологии создания охранного контура в виде прямой фаски. В «кремниевой» технологии фаску снимают с помощью механической шлифовки. В случае карбида кремния такой способ исключен, поскольку изготавливаемые по групповой технологии чипы имеют малые размеры (поперечные размеры чипов составляют обычно не более трех миллиметров). Прямая фаска может быть создана с использованием фотолитографических методов и процессов сухого травления карбида кремния. Чтобы стенки при травлении получались наклонными (с малым углом α), необходим такой процесс, при котором маска и карбид кремния травятся со сравнимыми скоростями. Кроме того, край маски также должен иметь малый угол наклона (β) относительно горизонтальной поверхности. Наиболее

технологичная маска – это маска из фоторезиста, а наиболее подходящий способ травления карбида кремния, обеспечивающий слабую селективность по отношению к фоторезисту, – реактивно-ионное травление. Как следует из результатов моделирования, при формировании прямой фаски в 4H-SiC диодах с p - n_o -переходом нет необходимости вытравливать меза-структуру до n^+ -области: достаточно протравить её до плоскости p - n_o -перехода (на глубину около 1.5 - 2 микрон).

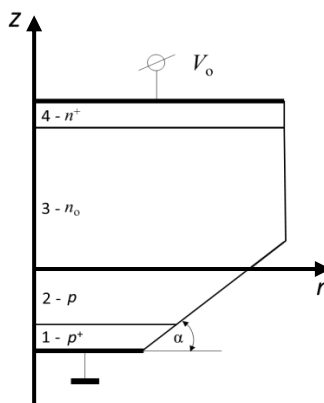


Рис. 10. Схематическое изображение структуры меза-эпитаксиального 4H-SiC p^+ - p - n_o - n^+ -диода с обозначениями слоев структуры и α – основного параметра (α), характеризующего прямую фаску.

Соотношение углов наклона маски из фоторезиста и угла, полученного после травления, может быть оценено в рамках простой геометрической модели. При селективности травления 1 : 1 ($K = 1$) краевой профиль маски будет "копироваться" в карбиде кремния. В случае технологических проблем по созданию фоторезистивной маски с малыми углами ($\alpha < 10^\circ$) эти проблемы могут быть решены подбором таких режимов травления, при которых скорость травления фоторезиста будет выше скорости травления SiC ($K > 1$). Например, при угле наклона маски $\beta = 22^\circ$, результирующий угол $\alpha = 8^\circ$ получается при селективности травления фоторезиста по отношению к SiC 2.9 : 1 ($K = 2.9$).

Была исследована технология изготовления фоторезистивной маски с минимально возможным углом клина. Угол наклона боковой стенки после задубливания зависит от толщины слоя резиста и от размеров исследуемого элемента: на элементах размером от 100 до 600 мкм измеренные углы монотонно уменьшались от 42° до 22° (при размерах элементов более 600 мкм угол уже не изменялся). Для последующего травления меза-структур использовались образцы с маскирующими площадками, имеющими угол наклона боковых стенок 22° .

Затем проводили эксперименты по подбору режимов реактивного ионно-плазменного травления. К травлению предъявлялись следующие требования:

- глубина травления SiC должна составлять не менее 3 мкм (при этом скорость травления должна обеспечивать приемлемое морфологическое совершенство протравленной поверхности SiC);
- коэффициент K должен варьироваться в зависимости от заданного значения угла α : при углах α в пределах 6 - 10° коэффициент K необходимо изменять в пределах от 2.3 до 3.8;
- толщина слоя фоторезиста должна составлять не менее 12 мкм; это необходимо, например, в случае травления SiC на глубину 3 мкм с селективностью травления по отношению к фоторезисту 1 : 3.8.

Эксперименты по травлению проводились в лабораторном ИСП-реакторе, в ВЧ-плазме NF_3 . Экспериментально подбирались оптимальные параметры процесса – селективность и скорость травления. С этой целью варьировались мощность ВЧ-разряда и давление рабочего газа в реакционной камере. И мощность, и давление по возможности выбирались минимальными (при условии сохранения приемлемой скорости травления) для того, чтобы обеспечить приемлемое морфологическое качество протравленных поверхностей SiC. Наилучшие результаты с точки зрения достижения требуемых параметров – глубины травления SiC и угла наклона боковых стенок меза-структур – были получены при мощности ВЧ-разряда в пределах 20 - 50 Вт и давлении газа 0.4 Па. На рис. 11а и 11б показаны микрорельефы, полученные при травлении SiC в данном режиме.

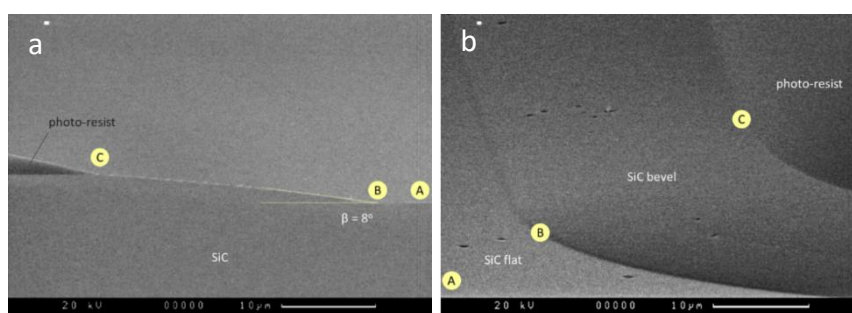


Рис. 11. Электронно-микроскопическое изображение а) скола протравленной SiC меза-структуры; б) поверхности, протравленной SiC меза-структуры в аксонометрической проекции. Участок АВ – плоское дно SiC меза-структуры, участок ВС – пологая боковая стенка SiC меза-структуры с углом наклона 8°.

Полученный экспериментально результат ($\alpha = 8^\circ$ при $K = 3$) совпадает с результатом, который предсказывает рассмотренная выше простая модель.

Из полученных модельных и экспериментальных результатов следует, что критически важными параметрами, определяющими конечную геометрию формируемых меза-структур, являются исходный краевой угол маски и селективность травления SiC по отношению к маске. Как показала практика, на фоторезистивных маскирующих элементах добиться углов менее 20° чрезвычайно сложно, если вообще возможно. Однако, технологические проблемы по созданию фоторезистивной маски с малыми углами могут быть решены коррекцией селективности травления.

В §6.3 описана технология изготовления опытных диодов. Создание диодов проводилось на структуре с такими же параметрами, как у структуры, использованной для создания диодов с охранной системой в виде полуизолирующей области (глава 3).

Последовательность основных технологических операций включала:

1. *Формирование сплошного катодного омического контакта к илифированной n-подложке.* Контактным металлом служил никель (толщина слоя около 0.3 мкм).
2. *Формирование на поверхности p^+ -слоя анодных омических контактов.* Контактным слоем служила комбинация из титана и хрома (толщины обоих слоев составляли 50 нм), нанесенная электронно-лучевым испарением в вакууме и отожженная при температуре 950°C в течение 5 минут. Далее ионным распылением поверх вожженного контактного слоя наносился слой никеля толщиной 0.3 мкм.
3. *Формирование охранного контура* в виде прямой фаски. Меза-структуры с пологими стенками формировались с помощью селективного РИТ 4H-SiC в плазме NF_3 с маской из фоторезиста. наклонные стенки получались при одновременном травлении 4H-SiC и резистивной маски, край которой имел форму острого клина с углом около 22° . На рис. 12 показано микроскопическое изображение поверхности мезаструктуры и ее профиль, полученные с помощью профилометра DEKТАК 3030.

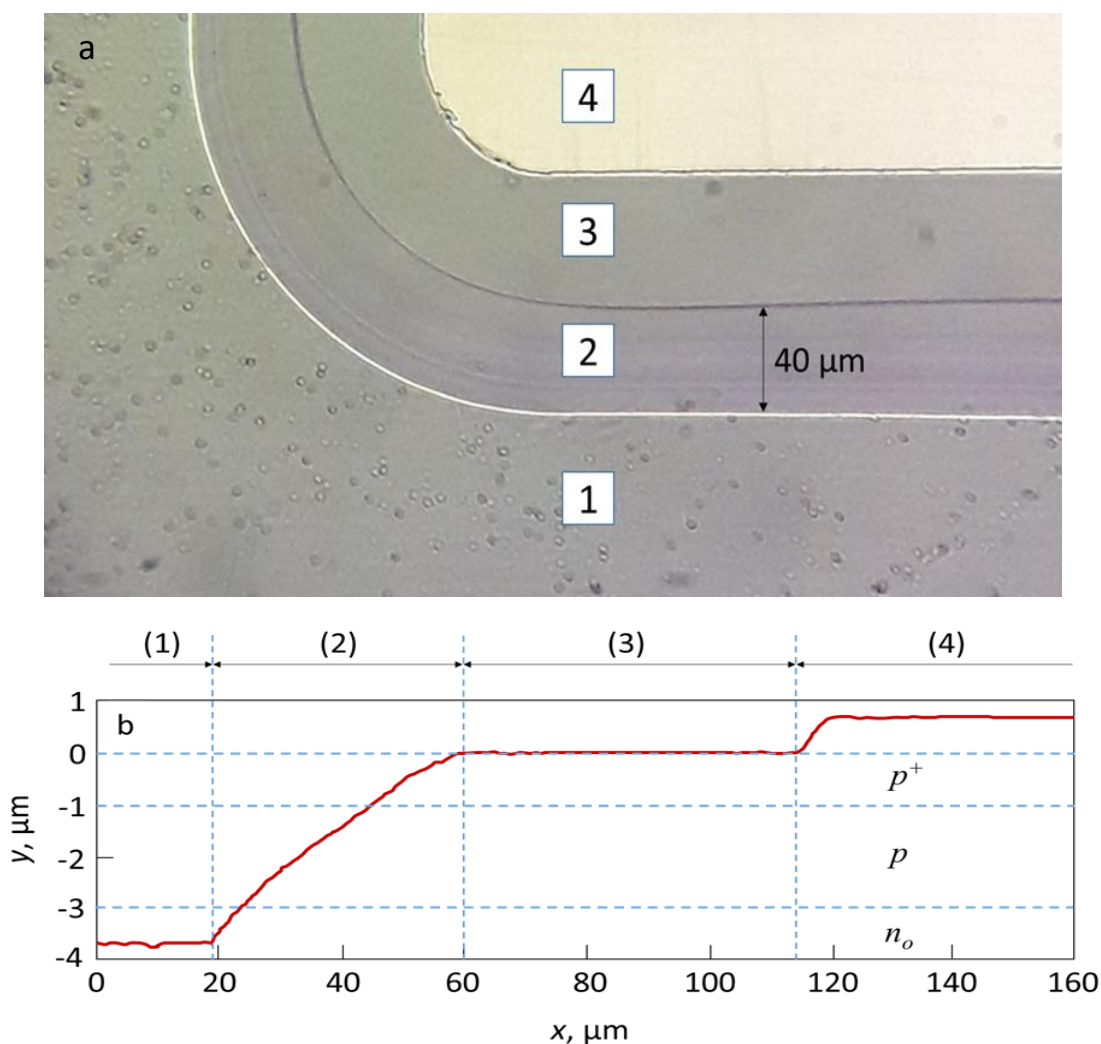


Рис. 12. Микроскопическое изображение (а) и профиль (б) поверхности $p^+-p-n_0-n^+$ -диода с прямой фаской: (1) – n_0 -база, (2) – фаска, (3) – p^+ -эмиттер, (4) – анодный никелевый контакт.

Изготовленные диоды имели меза-структуру высотой 3.6 мкм, которая немного больше глубины залегания $p-n_0$ -перехода (3 мкм), а угол наклона боковой стенки 5° от плоскости $p-n_0$ -перехода.

4. *Резка пластин на чипы.* Пластина с дискретными диодными структурами разрезалась алмазным диском на отдельные чипы размером $2 \times 2 \text{ мм}^2$.

5. *Корпусирование чипов.* Изготовленные чипы монтировались в металlostеклянные корпуса с последующим присоединением анодных выводов.

Разработанная впервые технология создания диодов с охранной системой в виде прямой фаски позволила получить диоды с характеристиками, практически совпадающими с соответствующими характеристиками лавинных диодов, созданных на основе аналогичных диодных структур с охранной системой в виде краевой полуизолирующей области (глава 3), и близкими к теоретически предельным.

В §6.4 описаны экспериментальные результаты. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов измерялись с помощью цифрового характериографа Л2-100. На вставке к рис. 13 показана типовая ВАХ в прямом направлении, измеренная при токах до 10 А (плотность тока 10^3 А/см²).

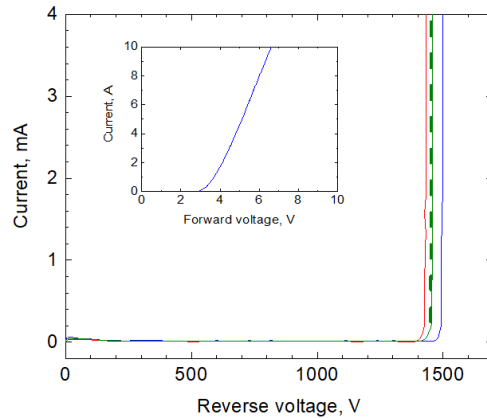


Рис. 13. Измеренные обратные ВАХ трех $p^+-p-n_0-n^+$ -диодов (сплошные линии) и рассчитанная обратная ВАХ идеализированного одномерного $p^+-p-n_0-n^+$ -диода (пунктирная линия). На вставке показана типичная ВАХ, измеренная в прямом направлении.

Напряжение отсечки диодов составляет около 3 В. Дифференциальное сопротивление в открытом состоянии равняется ~ 0.3 Ом. Как и следовало ожидать, измеренная прямая ВАХ практически полностью совпадает с вольтамперной характеристикой, показанной на рис. 3 (глава 3). Значительно менее тривиальным является то обстоятельство, что обратные вольтамперные характеристики также практически полностью совпадают с вольтамперными характеристиками, приведенными на рис. 3. Очевидно, что впервые разработанные для высоковольтных SiC структур охранные системы эффективно защищают диоды от поверхностного пробоя и позволяют реализовать практически предельные теоретические значения напряжения пробоя.

В режиме пробоя дифференциальное сопротивление диода составляет около 3 Ом, (0.03 Ом·см² при размерах контакта 960×960 мкм²). Столь малая величина сопротивления свидетельствует о том, что лавинный пробой однороден по площади.

Диоды демонстрировали резкий пробой при напряжениях от 1420 до 1500 В. Разброс обусловлен, очевидно, неоднородностью параметров эпитаксиальной структуры (согласно данным производителя, неоднородность легирования эпитаксиальных слоев n - и p -типа может достигать 25% и 50%, соответственно, а неоднородность толщины

эпитаксиальных слоев - 10%). Таким образом, очевидно, что эффективность работы прямой фаски в качестве охранного контура близка к 100%.

Также, в этой главе более подробно описаны особенности использования схемы разблокированного индуктивного переключения (Unclamped Inductive Switching, UIS), которая используется для измерений импульсных обратных ВАХ. Во время импульсных испытаний через диод пропусклась серия одиночных импульсов лавинного тока с нарастающей амплитудой. Изготовленные диоды выдерживали без деградации одиночные импульсы лавинного тока с амплитудой, как минимум, 10 А и длительностью 1.2 мкс (рассеиваемая энергия 9 мДж).

В заключение важно подчеркнуть, что впервые предсказанная в рамках двумерного моделирования и реализованная возможность использования в качестве высокоэффективного защитного краевого контура прямой фаски, способна обеспечить защиту от поверхностного пробоя. Прямая фаска относительно проста в изготовлении: нет необходимости в литографии с высоким разрешением; не требуется проводить глубокого травления меза-структур на всю толщину блокирующей n_o -базы. Созданный с помощью технологии реактивно-ионного травления высоковольтный 4H-SiC лавинный диод с охранным контуром в виде прямой фаски с углом наклона стенки меза-структуры 8° демонстрирует напряжение пробоя, совпадающее с расчетным значением идеализированного одномерного диода (1450 В) и высокую однородность лавинного тока вплоть до значений плотности обратного тока $\sim 10^3$ А/см². Результат этой работы опубликован в статьях [A1, A2, A8]. Этот метод можно использовать при создании таких важнейших структур, как быстродействующие диодные размыкатели тока, лавинные диоды, биполярные n - p - n -транзисторы, МОП-транзисторы с инверсным n -каналом и диодов Шоттки с n_o -базой.

В данной работе впервые рассмотрены и реализованы альтернативные варианты охранных систем, позволяющие исключить технологические трудности (высокотемпературные (до 2000 °С) процессы, а также прецизионную литографию с разрешением ~ 1 мкм), способов создания существующих приборов на SiC.

В **Заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы:

1. Проведено двумерное численное моделирование высоковольтных 4H-SiC p^+ - n - n^+ -диодов с охранный полуизолирующей i -областью, толщиной 10 мкм, образованной за счет полной компенсации легирующих доноров в этой области глубокими ловушками. Показано, что при комнатной температуре эффективность полуизолирующей охранный i -области по предотвращению поверхностного пробоя

близка к 100%: Расчетное напряжение лавинного пробоя p^+-n-n^+ -диода с такой охранной i -областью для модельной структуры составляет 1100 В (и с высокой точностью совпадает с напряжением пробоя идеализированного одномерного диода с параметрами, совпадающими с параметрами одномерной p^+-n-n^+ -структуры). С повышением температуры охранная i -область монотонно утрачивает свою функциональность вследствие теплового выброса захваченных ловушками электронов.

2. Изготовлены высоковольтные 4H-SiC $p^+-p-n_0-n^+$ -диоды с контролируемым лавинным пробоем при обратном напряжении 1460 В и охранной полуизолирующей i -областью. Полуизолирующая i -область толщиной 10 мкм формировалась с помощью облучения высокоэнергетичными (53 МэВ) ионами аргона. Параметры изготовленных диодов свидетельствуют о высокой однородности протекания тока при пробое: лавинное сопротивление составляет не более 0.03 Ом·см². В режиме одиночных импульсов диоды сохраняют функциональность при плотностях лавинного тока до $\sim 10^3$ А/см²; При длительности импульсов лавинного тока 4 мкс энергия, рассеиваемая диодами без деградации, составляет ~ 5 Дж/см² при локальном температурном перегреве ~ 850 градусов.

3. Изготовлены высоковольтные 4H-SiC диоды Шоттки. с контролируемым лавинным пробоем при обратном напряжении 2000 В. Для подавления поверхностного пробоя использовалась комбинированная охранная система, включавшая охранную полуизолирующую i -область, толщиной 10 мкм, созданную с помощью облучения высокоэнергетичными (53 МэВ) ионами аргона, и полевою обкладку над этим слоем. Сравнение вольт-амперных характеристик (ВАХ) диодов с такой охранной системой и контрольных диодов с незащищенной поверхностью показало, что прямые ВАХ не изменяются, в то время как напряжение лавинного пробоя при обратном напряжении при наличии охранной системы возрастает на порядок. ВАХ диодов как в прямом, так и в обратном направлении хорошо описываются классической теорией термоэмиссионного тока, с учетом понижения высоты барьера Шоттки с ростом обратного напряжения.

4. Разработаны и исследованы методы “сухого” травления 4H-SiC: ионно-лучевого травления (ИЛТ) и реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ). В рамках разработанной технологии создан полевой транзистор с затвором в виде барьера Шоттки с блокирующим напряжением, соответствующим теоретическому пределу, низким уровнем токов утечки и малым коэффициентом идеальности перехода затвор–исток. Показано, что использование фоторезиста в качестве маски при ИЛТ

пучком ионов аргона позволяет получать мезаструктуры с гладкими пологими наклонными стенками. Изучено влияние режимов травления и маскирующего материала на процесс травления мезаструктур методом РИПТ. При использовании в процессе травления защитных масок различного типа возможно получение структур с углами наклона стенок от строго вертикальных (травление через металлическую маску), до стенок с достаточно большим углом наклона (РИПТ 4H-SiC в смеси гексафторида серы и кислорода). Полученный результат свидетельствует о том, что разработанные в настоящей работе низкотемпературные способы микропрофилирования могут быть альтернативой высокотемпературному газовому травлению. Разработанные технологии формирования мезаструктур с наклонными стенками могут быть эффективно использованы для создания высоковольтных вертикальных диодов с так называемой “прямой” фаской, предотвращающей поверхностный пробой.

5. Проведено численное моделирование пространственного распределения электрического поля в высоковольтных (~ 1500 В) обратносмещенных мезаэпитаксиальных $p^+-p-n_0-n^+$ -диодах с прямой фаской. Показано, что формирование прямой фаски под углами менее 10° к плоскости $p-n_0$ -перехода позволяет в несколько раз уменьшить краевое поверхностное поле по сравнению с полем в объеме. Продемонстрирована возможность формирования SiC меза-структур с пологими боковыми стенками (прямой фаской) с помощью РИПТ карбида кремния через маску из фоторезиста, край которой имеет форму острого клина. Проведены детальные исследования технологических режимов создания маски с острым углом резистивного клина и режимов РИПТ, позволяющих получать заданное соотношение скоростей травления маски и структуры. На основе полученных результатов изготовлены высоковольтные (с блокирующим напряжением ~ 1500 В) лавинные $p^+-p-n_0-n^+$ -диоды, выполненные в виде меза-структур с пологими боковыми стенками, образующими прямую фаску с углом наклона боковых стенок около 8° от плоскости $p-n_0$ -перехода. Рассчитанная с помощью TCAD-моделирования обратная ВАХ идеализированного одномерного диода с параметрами, соответствующими экспериментально реализованным структурам, с хорошей точностью совпадает с экспериментально измеренными значениями. Таким образом, эффективность работы охранного контура в виде прямой фаски составляет 100%. Протекание лавинного тока однородно по всей площади прибора. Диоды выдерживают без деструкции импульсы лавинного тока с

амплитудой, 10 А (плотность тока $> 10^3$ А/см²) и длительностью 1.2 мкс (рассеиваемая энергия 9 мДж).

Основные результаты диссертационной работы изложены в публикациях:

- A1. Лебедева Н.М., Самсонова Т.П., Ильинская Н.Д., Трошков С.И., Иванов П.А. «Формирование SiC-мезаструктур с пологими боковыми стенками «сухим» селективным травлением через маску из фоторезиста», 2020, ЖТФ, т.90, 6 стр. 997-1000
- A2. Лебедева Н.М., Ильинская Н.Д., Иванов П.А. «О защите высоковольтных мезаструктурных 4H-SiC-приборов от поверхностного пробоя: прямая фаска», 2020, ФТП, т.54, 2 стр. 207-211
- A3. Ильинская Н.Д., Лебедева Н.М., Задиранов Ю.М., Иванов П.А., Самсонова Т.П., Коньков О.И., Потапов А.С. «Микропрофилирование 4H-SiC сухим травлением в технологии формирования структуры полевого транзистора с затвором Шоттки», 2020, ФТП, т.54, 1 стр. 97-102
- A4. Иванов П.А., Потапов А.С., Лебедева Н.М., Грехов И.В. «Лавинный пробой в 4H-SiC диодах Шоттки: вопросы надежности» 2020, ЖТФ, т.90, 12 стр. 2133-2138
- A5. Иванов П.А., Лебедева Н.М. «TCAD-моделирование высоковольтных 4H-SiC диодов с охранной полуизолирующей областью», 2021, ФТП, т.55, 2 стр. 201-206
- A6. Иванов П.А., Лебедева Н.М., Ильинская Н.Д., Кудояров М.Ф., Самсонова Т.П., Коньков О.И., Задиранов Ю.М. «Высоковольтные 4H-SiC диоды Шоттки с полевой обкладкой», 2021, ФТП, т.55, 2 стр. 188-194
- A7. Иванов П.А., Кудояров М.Ф., Лебедева Н.М., Ильинская Н.Д., Самсонова Т.П. «Высоковольтные лавинные 4H-SiC-диоды с охранной полуизолирующей областью», 2021, Письма ЖТФ, т.47, 6 стр. 48-50
- A8. Иванов П.А., Лебедева Н.М., Ильинская Н.Д., Самсонова Т.П., Коньков О.И. «Высоковольтные лавинные 4H-SiC диоды с прямой фаской», 2021, ФТП, т.55, 4 стр. 349-353

Тезисы докладов

1. Лебедева Н.М., Иванов П.А., Ильинская Н.Д., Кудояров М.Ф. «Высоковольтные 4H-SiC диоды с охранной полуизолирующей i-областью», Труды 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ, 2020, с.60-62
2. Лебедева Н.М., Иванов П.А., Ильинская Н.Д., Самсонова Т.П. «Высоковольтные лавинные 4H-SiC диоды с прямой фаской.», Электроника и микроэлектроника СВЧ, т.1, 1, 2021, с. 84 - 88

3. Иванов П.А., Лебедева Н.М., Ильинская Н.Д., Самсонова Т.П., Кудояров М.Ф. «Высоковольтные лавинные 4H-SiC диоды с охранной краевой полуизолирующей областью», Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 24-й Всероссийской молодежной научной конференции, 2021г., с. 182-184

Список цитируемой литературы

-
- [1] Козлов В.А., Козловский В.В. «Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и alpha-частицами. Обзор», ФТП, 35, 769, (2001)
- [2] Иванов П.А., Кудояров М.Ф., Козловский М.А., Потапов А.С., Самсонова Т.П. «Полуизолирующие слои 4H-SiC, полученные имплантацией высокоэнергетичных (53 МэВ) ионов аргона в эпитаксиальные пленки n-типа проводимости», ФТП, 50, 937, (2016)
- [3] <http://www.silvaco.com>
- [4] Konstantinov A., Pham H., Lee B., Park K. S., Kang B., Allerstam F., and Neyer T. «Investigation of avalanche ruggedness of 650 V Schottky-barrier rectifiers», Solid-State Electronics, vol. 148, pp. 51-57, 2018
- [5] Tarplee M.C., Madangarli V.P., Zhang Q. and Sudarshan T.S. «Design Rules for Field Plate Edge Termination in SiC Schottky Diodes» IEEE transactions on electron devices, 2001, 48(12), p. 2659
- [6] Konstantinov A.O., Wahab Q., Nordell N., Linderfelt U. «Ionization Rates and Critical Fields in 4H SiC Junction Devices», Mater. Sci. Forum, 1998, 264-268, 513