РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени А.Ф. ИОФФЕ

На правах рукописи

ЛЕБЕДЕВА НАТАЛЬЯ МИХАЙЛОВНА

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

Специальность: 1.3.11 — физика полупроводников

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель - доктор физико-математических наук

Иванов Павел Анатольевич

Консультант – доктор физико-математических наук

Левинштейн Михаил Ефимович

Санкт-Петербург

2024

Оглавление

Введение **4**

Глава 1. Лавинный пробой идеализированного одномерного диода и краткий обзор основных постростовых технологий **9**

§ 1.1 Лавинный пробой идеализированного одномерного диода 10

§ 1.2 Основные постростовые технологии, используемые при изготовлении приборов на SiC 16

1.2.1 Реактивно-ионное травление 16

1.2.2 Омические контакты 20

1.2.3. Барьеры Шоттки 25

1.2.4. Термическое окисление 26

1.2.5. Радиационные технологии 29

§ 1.3. Охранные системы высоковольтных приборов 34

Глава 2. Моделирование охранной системы в виде краевой полуизолирущей области для высоковольтных лавинных диодов с *p-n*-переходом **39**

§ 2.1 Принципы формирования охранной системы с помощью краевых полуизолирующих слоев 39

§ 2.2 Моделирование высоковольтного диода с *p-n*-переходом и охранной системой в виде краевой полуизолирующей области 44

Глава 3. Создание высоковольтных лавинных диодов с *p-n*-переходом и охранной системой в виде краевой полуизолирущей области **55**

§ 3.1 Технология локального гальванического осаждения металлических столбиков с вертикальными стенками 55

§ 3.2 Технология изготовления диодов 59

§ 3.3 Экспериментальные результаты. 61

Глава 4. Высоковольтные 4H-SiC диоды Шоттки с полевой обкладкой 66

§ 4.1 Технология изготовления диодов 68

§ 4.2 Экспериментальные результаты 70

Глава 5. Микропрофилирование 4H-SiC структур сухим травлением ... 76

§ 5.1 Структура полевого транзистора с затвором Шоттки на основе 4H-SiC 78

§ 5.2 Травление мезаструктур до полуизолирующей подложки методом ионно-лучевого травления 81

§ 5.3 Травление канала методом реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ) 82

§ 5.4 Электрические характеристики полевого транзистора с затвором Шоттки, полученного с использованием методов сухого травления ... 85

Глава 6. Высоковольтные лавинные диоды с *p-n*-переходом и прямой фаской **91**

§ 6.1 Моделирование 93

§ 6.2 Технология создания охранного контура в виде прямой фаски ... 98

§ 6.3 Технология изготовления высоковольтных лавинных диодов .. 105

§ 6.4 Экспериментальные результаты 108

Заключение: основные результаты и выводы **113**

Список основных публикаций по теме **116**

Тезисы докладов и труды конференций **117**

Список литературы **118**

Введение

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 – топливно-энергетический комплекс, промышленность, транспорт, связь, авиацию, космос, военную технику, быт. В то же время 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. Развитие силовой электроники сопровождается внедрением новых технологий, способных повысить энергоэффективность и надежность работы преобразовательных устройств. В настоящее время в силовую электронику интенсивно внедряются приборы на основе материалов с большой шириной запрещенной зоны, в частности, карбида кремния политипа 4H (4H-SiC).

4H-SiC по основным электрофизическим характеристикам – ширине запрещенной зоны, предельной скорости носителей тока, напряженности поля лавинного пробоя, теплопроводности – намного превосходит кремний. Использование твердотельных ключей на основе 4H-SiC взамен используемых сегодня кремниевых приборов позволяет более чем в 100 раз улучшить соотношение между мощностью и быстродействием. Например, силовой преобразователь на основе мощных 4H-SiC полевых транзисторов может иметь в 5 - 10 раз большую частоту промежуточных преобразований и, следовательно, во столько же раз меньшие размеры всех пассивных элементов, чем аналогичный преобразователь на Si транзисторах. Возможность работы 4H-SiC приборов при более высоких температурах

позволяет резко уменьшить габариты систем охлаждения и упростить их конструкцию. Все это дает возможность снизить массогабаритные показатели преобразователей и добиться улучшенных показателей по контролю их параметров, а это, в свою очередь, обеспечивает создание более компактных схем с повышенными характеристиками по надежности. Исходя из сказанного выше, очевидно, что дальнейшие разработки и исследования приборов на основе 4H-SiC представляют важную и актуальную задачу.

В силовой полупроводниковой электронике применяют приборы, работающие в режиме мощного импульсного лавинного пробоя. К таким приборам относятся быстродействующие ограничительные лавинные диоды, предназначенные для защиты электронной аппаратуры от импульсных перенапряжений (TVS – Transient Voltage Suppressor), пороговые лавинные S-диоды для систем импульсного электропитания, лавинные транзисторы для генерации нано- и субнаносекундных импульсов, пикосекундные обострители импульсов с задержанным волновым пробоем и др. Особо можно отметить применение лавинных диодов для изготовления высоковольтных выпрямительных столбов. Лавинные диоды, соединенные последовательно в столб, позволяют более равномерно распределять напряжение между обратно смещенными диодами и тем самым предотвращать выход всей линейки из строя в случае перенапряжения на одном или нескольких диодах одновременно. Несмотря на столь большое разнообразие приборов с характеристиками, выгодно отличающими приборы на 4H-SiC от аналогичных на Si, по-прежнему существует проблема преждевременного краевого пробоя в высоковольтных диодах при работе в режиме мощного импульсного лавинного пробоя. Поэтому поиск методов усовершенствования и улучшения параметров таких приборов до сих пор актуален.

Главной *целью работы* была разработка технологии изготовления и исследования высоковольтных 4H-SiC диодов на основе физического анализа

возможных подходов к защите высоковольтных SiC структур. Для этого разрабатывались новые конструктивно-технологические решения. Основное внимание уделялось созданию высокоэффективных охранных систем, позволяющих устранить преждевременный краевой пробой и повысить напряжение пробоя диодов до теоретически предельной величины. Представленные научные результаты синтезируют выбор конструкции диодов, физическое моделирование, разработку технологии изготовления диодов, создание лабораторных образцов диодов и их экспериментальные исследования.

Объекты исследования. В диссертации рассматриваются следующие 4H-SiC диоды:

- высоковольтные лавинные p^+-p-n_0-n^+-диоды с краевой полуизолирующей *i*-областью;
- высоковольтные диоды Шоттки с краевой полуизолирующей *i*-областью;
- высоковольтные лавинные p^+-p-n_0-n^+-диоды с прямой фаской.

В ходе работы решались следующие *основные задачи*:

1. Поиск новых перспективных конструктивных решений охранных систем высоковольтных диодов. Оценка перспектив применения в качестве охранного контура прямой фаски и краевой полуизолирующей *i*-области.

2. Физическое моделирование диодов с прямой фаской и краевой полуизолирующей *i*-областью; сравнение модельных характеристик с характеристиками идеализированных одномерных диодов, имеющих теоретически предельные параметры.

3. Разработка операций групповой технологии формирования охранных структур – прямой фаски и краевой полуизолирующей *i*-области.

4. Изготовление образцов высоковольтных диодов Шоттки с краевой полуизолирующей *i*-областью; исследование и анализ их электрических характеристик.

5. Изготовление образцов высоковольтных лавинных диодов с p-n_0–переходом (с прямой фаской и краевой полуизолирующей i-областью); исследование и анализ их электрических характеристик, в том числе в режиме мощного лавинного пробоя.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые:

1. Показано, что краевой полуизолирующий контур может служить эффективной охранной системой, предотвращающей поверхностный пробой вплоть до температуры ~ 600 K. Такой контур создан путем облучения SiC высокоэнергетичными (53 МэВ) ионами аргона.

2. Экспериментально продемонстрировано, что охранный контур в виде комбинации краевого полуизолирующего контура, созданного облучением ионами аргона, и полевой обкладки, позволили создать высоковольтные 4H-SiC диоды Шоттки с близким к теоретическому пределу коэффициентом идеальности $n \approx 1.02$.

3. В рамках двумерного моделирования обратно смещенного высоковольтного 4H-SiC диода предсказана возможность использования в качестве высокоэффективного защитного краевого контура прямой фаски. Создан высоковольтный 4H-SiC лавинный диод с охранным контуром в виде прямой фаски с напряжением пробоя, совпадающим с теоретически предельным, и демонстрирующий высокую однородность лавинного тока вплоть до значений плотности обратного тока ~ 10^3 А/см^2.

4. Разработана технология микропрофилирования 4H-SiC структур методами сухого травления, сочетающая низкую температуру технологических операций, высокую чистоту обработки, высокую селективность по отношению к различным маскирующим материалам и высокую разрешающую способность. В рамках разработанной технологии создан полевой транзистор с затвором в виде барьера Шоттки (БШ) с теоретически предельно возможным напряжением пробоя, низкими

уровнями токов утечки и коэффициентом идеальности перехода затвор-исток n ≈ 1.07.

Практическая значимость. В рамках работы разработаны универсальные методы, которые могут быть использованы в постростовой технологии изготовления как уже существующих приборов на основе 4H-SiC, так и тех, которые предполагается разрабатывать в будущем. По сравнению с существующими охранными методами разработанные в диссертации методы относительно просты в реализации, поскольку не требуют проведения высокотемпературных процессов, применения прецизионной литографии, и специфического технологического оборудования.

Выносимые на защиту научные положения

1. В 4H SiC p^+-p-n_o-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 ≈ 1.02.

3. Сохранение высокого качества материала в структуре 4H-SiC при создании охранного контура 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: Автором были разработаны технологии постростовой обработки 4H-SiC-структур для создания охранного контура в виде полуизолирующей *i*-области для высоковольтных диодов с *p*-*n*-переходом и диодов Шоттки, а также охранного контура в виде прямой фаски для высоковольтных диодов с *p*-*n*-переходом. Диссертантом были проведены экспериментальные исследования различных этапов постростовой технологии, разработан оптимальный технологический маршрут изготовления перечисленных приборов, по результатам исследований были созданы опытные партии приборов. Кроме того, автор принимала активное участие в моделировании и проведении измерений вольт-амперных характеристик изготовленных приборов.

Глава 1. Лавинный пробой идеализированного одномерного диода и краткий обзор основных постростовых технологий

Карбид кремния (SiC) по основным электрофизическим характеристикам – ширине запрещенной зоны, предельной скорости носителей (электронов), напряженности поля лавинного пробоя, теплопроводности – намного превосходит кремний.

Существует более 250 политипов SiC [1, 2]. Однако в настоящее время подавляющее большинство SiC приборов реализуется на основе политипа 4H вследствие высокой подвижности электронов, большой величины запрещенной зоны, меньшей величины энергии ионизации легирующей примеси [3], и изотропии подвижности электронов [4, 5].

Способность 4H-SiC приборов функционировать при высоких температурах окружающей среды (вплоть до 700 K [6]) позволяет резко уменьшить габариты систем охлаждения и упростить их конструкцию, что особенно важно для космической и автомобильной электроники. Это дает

возможность снизить массогабаритные показатели любых устройств [7]. Использование твердотельных «ключей» на основе 4H-SiC взамен кремниевых приборов позволяет более чем на порядок увеличить рабочую частоту устройств при заданной мощности.

Хотя к настоящему времени на основе 4H-SiC созданы приборы с рабочим напряжением, превышающим 25 кВ [8], для подавляющего большинства применений оптимальное рабочее напряжение лежит в пределах от нескольких сотен вольт до 1-2 кВ [9]. Однако независимо от рабочего напряжения величина критического поля пробоя для любого прибора на основе 4H-SiC превышает несколько сотен киловольт на сантиметр [10].

При разработке любого высоковольтного прибора на основе 4H-SiC одной из важнейших задач является предотвращение поверхностного пробоя. Определяющую роль в оптимизации любого прибора играет технология его изготовления. В настоящей главе анализируются основные физические подходы и технологические процессы, лежащие в основе разработки высоковольтных и лавинных приборов на основе 4H-SiC.

§ 1.1 Лавинный пробой идеализированного одномерного диода

В силовой полупроводниковой электронике широко применяют приборы, работающие в режиме мощного импульсного лавинного пробоя. В данной работе исследовались именно такие приборы. В этой главе рассматриваются особенности лавинного пробоя на примере идеализированного одномерного диода. Рассмотрение лавинного пробоя одномерного идеализированного диода позволяет определить предельно достижимые параметры структуры. При этом предполагается, что пробой происходит однородно по всей площади. Напряжение пробоя лимитируется физическими факторами, а именно критическим полем пробоя и распределением носителей, обусловленным уровнем легирования.

Диоды на основе 4H-SiC обычно конструируют так, чтобы при обратном смещении область пространственного заряда (ОПЗ) полностью перекрывала

блокирующую *n*-базу при напряжении, составляющем около половины от пробивного (это так называемый диод с "проколом" *n*-базы). В диоде с "проколом" базы критическое поле пробоя должно зависеть от уровня легирования и толщины *n*-базы и может быть определено из условия лавинного пробоя, которое в простейшем виде, при условии $\boldsymbol{\alpha}_n = \boldsymbol{\alpha}_p = \boldsymbol{\alpha}$ ($\boldsymbol{\alpha}_n$ и $\boldsymbol{\alpha}_p$ – коэффициенты ионизации электронов и дырок, соответственно) может быть записано в виде:

$$M = \frac{1}{1-\int_0^L \alpha(F)dx'} \; ; \qquad \int_0^L \alpha(F)dx' \rightarrow \qquad (1)$$

здесь M – коэффициент умножения носителей, *F(x)* – распределение поля вдоль обратно смещенной базы диода.

В более общем случае условие пробоя имеет вид:

$$\int_0^d \alpha_n \exp[-\int_x^d (\alpha_n - \alpha_p)dx']dx = 1 \; , \qquad (2)$$

где *d* – толщина блокирующей *n*-базы [11]. Зависимости коэффициентов ионизации от электрического поля описываются следующими выражениями:

$$\alpha_n = \alpha_{no} \exp(-E_n / E) \qquad (3)$$

$$\alpha_p = \alpha_{po} \exp(-E_p / E) \qquad (4)$$

В данном параграфе расчеты проводились со следующими параметрами [12]: $\alpha_{no} = 1.76 \cdot 10^8$ см$^{-1}$, $\alpha_{po} = 3.41 \cdot 10^8$ см$^{-1}$, $E_n = 3.3 \cdot 10^7$ В/см, $E_p = 2.5 \cdot 10^7$ В/см.

При пробое распределение поля *E* в *n*-базе записывается в следующем виде:

$$E = E_B - qNx/\varepsilon \; , \qquad (5)$$

где q – элементарный заряд, ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника, N – концентрация доноров в *n*-базе. С использованием выражений (2) – (5) можно получить следующее интегральное уравнение относительно E_B (оно решалось средствами Mathcad):

$$\int_0^d \alpha_{n0} \exp(-\frac{E_n}{E_B - qNx/\varepsilon}) \exp(-\int_x^d [\alpha_{no} \exp(-\frac{E_n}{E_B - qNx'/\varepsilon}) - \alpha_{po} \exp(-\frac{E_p}{E_B - qNx'/\varepsilon})] dx') dx = 1 \qquad (6)$$

Как видно, в уравнение (6) входят два параметра блокирующей *n*-базы – концентрация доноров *N* и толщина *d*. На рис. 1 показаны рассчитанные зависимости критического поля пробоя E_B от толщины базы при характерных значениях уровня легирования.

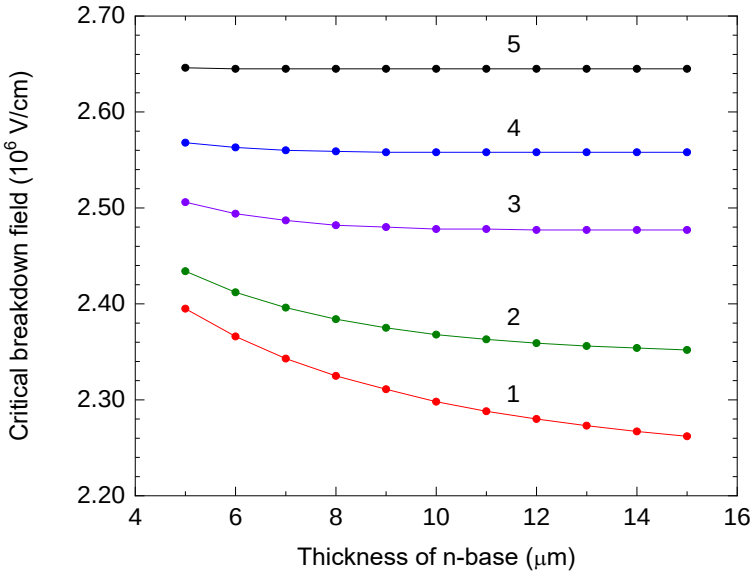


Рис. 1. Зависимость критической напряженности поля от толщины *n*-базы для различных концентраций доноров [13]: линия 1 – 10^{15} см$^{-3}$, линия 2 – $2 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$, линия 3 – $4 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$, линия 4 – $6 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$, линия 5 – $9 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$.

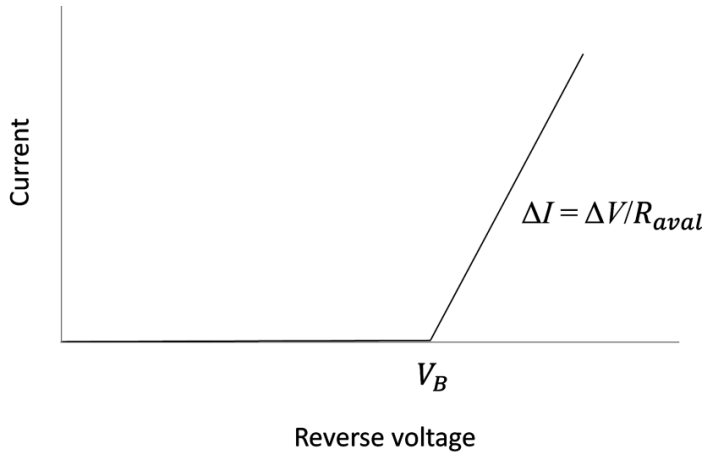


Рис. 2. Идеализированная ВАХ обратно смещенного диода.

В условиях пробоя важнейшими электрическими параметрами являются напряжение лавинного пробоя (V_B) и дифференциальное сопротивление на лавинном участке вольт-амперной характеристики (ВАХ) – лавинное сопротивление (R_{aval}). На рис. 2 показана идеализированная ВАХ обратно смещенного диода. Видно, что при $V < V_B$ ток $I = 0$, а при $V > V_B$ ток линейно растет при увеличении напряжения так, что $\Delta I = \Delta V/R_{aval}$. На рис. 3 показаны соответствующие распределения электрического поля E в области пространственного заряда (ОПЗ) одномерной n-n^+-структуры для двух случаев – в условиях, когда приложенное напряжение в точности равно напряжению пробоя ($V = V_B$) и для случая $V > V_B$, когда лавинное умножение происходит в очень узком слое – там, где электрическое поле достигает критического значения E_B).

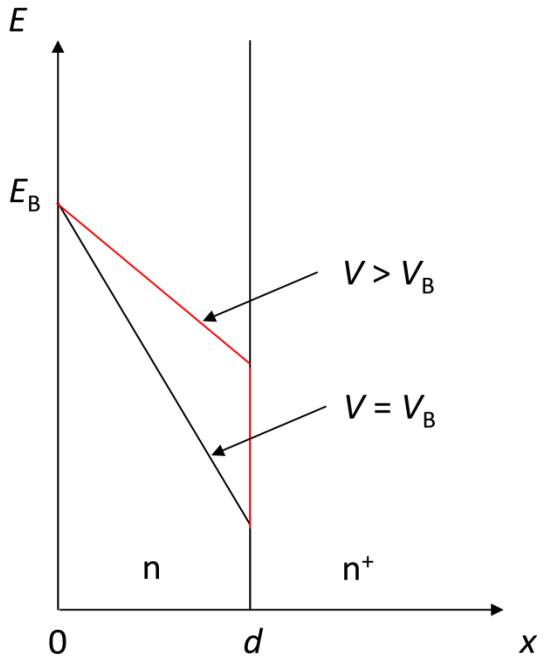


Рис. 3. Распределения электрического поля в ОПЗ структуры с "проколом" *n*-базы.

При известной величине E_B можно легко рассчитать напряжение пробоя и лавинное сопротивление. При $V = V_B$ (начало пробоя), когда градиент поля в ОПЗ задается только концентрацией положительно заряженных ионизированных доноров *N* (концентрация свободных электронов в ОПЗ еще мала: n << N), напряжение пробоя рассчитывается как

$$V_B = E_B d - qNd^2/2\varepsilon \quad (7)$$

При $V > V_B$, когда концентрация свободных электронов n в ОПЗ становится существенной ($n \geq 0.1N$), в уравнении Пуассона для ОПЗ необходимо учитывать отрицательный объемный заряд свободных электронов. (Отметим, что при полях $E \geq 10^6$ В/см электроны в 4H-SiC дрейфуют в ОПЗ с постоянной насыщенной скоростью $v_s = 8 \cdot 10^6$ см/с [14], и их концентрация n в пределах ОПЗ не зависит от координаты). В присутствии свободных электронов градиент поля в ОПЗ уменьшается, так что падение напряжения возрастает:

$$V = E_B d - q(N - n)d^2/2\varepsilon \quad (8)$$

Лавинный ток I и концентрация электронов n связаны простой зависимостью:

$$I = qnv_sS, \tag{9}$$

где S - площадь анода. Из формул (7) – (9) можно вывести следующее выражение для лавинного сопротивления диода:

$$R_{aval} = (V_s - V_B)/I = d^2/2\varepsilon v_sS \tag{10}$$

Таким образом, в диоде с "проколом" *n*-базы лавинное сопротивление не зависит от уровня легирования и задается только ее толщиной d и площадью S.

Одномерная модель, описанная в данном параграфе, предполагает, что пробой происходит по всей площади диода и реализуется максимально возможное критическое напряжение пробоя. В реальных диодах лавинный пробой никогда не бывает таким, как в идеализированных диодах. Это объясняется наличием краевых эффектов и неоднородностей структуры. В случае, если краевые эффекты не подавлены, измеренное напряжение пробоя (V'_B) будет меньше, а измеренное дифференциальное сопротивление (R'_{aval}) будет больше значений, рассчитанных по формулам (7) и (10), соответственно. То есть, измеряя V'_B и R'_{aval} и, сравнивая их с расчетными значениями, можно делать прогнозы относительно уровня защищенности диодов от поверхностного пробоя и степени их устойчивости к электротепловому пробою.

Рассмотренный выше эффект является основой работы полупроводниковых приборов, в которых используются явления ударной ионизации и лавинного пробоя. Создание таких приборов включает в себя большой спектр технологических операций.

§ 1.2 Основные постростовые технологии, используемые при изготовлении приборов на SiC

1.2.1 Реактивно-ионное травление

Карбид кремния известен своей уникальной химической инертностью. Практически единственный доступный способ химического травления SiC – в расплавах щелочей при 450 – 600 °C – совершенно непригоден в приборной технологии и к тому же селективен по отношению к кристаллографической ориентации протравливаемой поверхности.

Для формирования микрорельефа (меза-структур и канавок) при изготовлении SiC приборов широко используют метод сухого реактивно-ионного травления (РИТ). Данный метод описан в нескольких обзорных работах (см., например, [15, 16]). Наибольшее распространение при травлении SiC методом РИТ получили фторсодержащие реактивные газы (SF_6, CF_4, NF_3, BF_3, CHF_3), обеспечивающие достаточно высокие скорости травления и приемлемое качество протравленных поверхностей. Механизм РИТ SiC во фторсодержащих газах сочетает в себе химические реакции и прямое физическое распыление. Атомы Si удаляются с поверхности за счет их химической реакции с активными фторными радикалами, генерируемыми в плазме (при этом образуются летучие молекулы SiF_4), а атомы C – за счет их преимущественного физического распыления ускоренными ионами. Особенность селективного травления SiC методом РИТ состоит в том, что стенка протравливаемой ступеньки получается вертикальной. При травлении через маску вертикальная стенка SiC покрывается монослоем графита и, поскольку она не подвергается ионной бомбардировке, блокирует тем самым латеральное травление. Именно этим объясняется высокая анизотропия, достигаемая при селективном травлении SiC методом РИТ. Аппаратура для РИТ SiC практически не отличается от РИТ-систем, разработанных для кремния и других полупроводниковых материалов, и эти системы можно

использовать для травления SiC. В частности, исследования РИТ SiC проводились в ВЧ-установках с конденсаторно-связанной плазмой (КСП-РИТ) [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24], с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-РИТ) [25, 26, 27, 28, 29], а также в установках с возбуждением электронного циклотронного резонанса (ЭЦР-РИТ) [30, 31, 32, 33]. РИТ SiC можно проводить без специального нагрева/охлаждения обрабатываемых подложек. Однако, скорости травления SiC существенно ниже скоростей травления Si.

Скорость травления. Основным отличием РИТ SiC от РИТ Si является контроль удаления атомов углерода. Для повышения скорости удаления атомов углерода в реактивный газ часто добавляют кислород или аргон. Кроме того, это делается и для увеличения концентрации активных радикалов в плазме. При сухом травлении SiC на скорость процесса влияние оказывает также летучесть продуктов реакции и энергия ионов. Поэтому на практике необходимо выбирать оптимальный состав газовой смеси и ее рабочее давление, а также выбирать напряжение автосмещения электрода, на котором располагается образец [34]. На рис. 4 показана зависимость скорости КСП-РИТ SiC в различных фторсодержащих газах с добавлением кислорода [35]. Травление SiC в NF_3 обеспечивает высокую скорость травления, однако нужно считаться с тем, что NF_3 – токсичный газ. Добавление небольшого количества O_2 повышает скорость травления. Скорость травления SiC можно также увеличить, проводя процессы в плазме высокой плотности (высокоплотной плазмой характеризуются ИСП-РИТ и ЭЦР-РИТ). В процессе ИСП-РИТ можно независимо контролировать плотность плазмы и автосмещение [34]. Однако нужно отметить, что чрезмерное повышение автосмещения чревато повреждением протравливаемой поверхности и образованием точечных объемных дефектов.

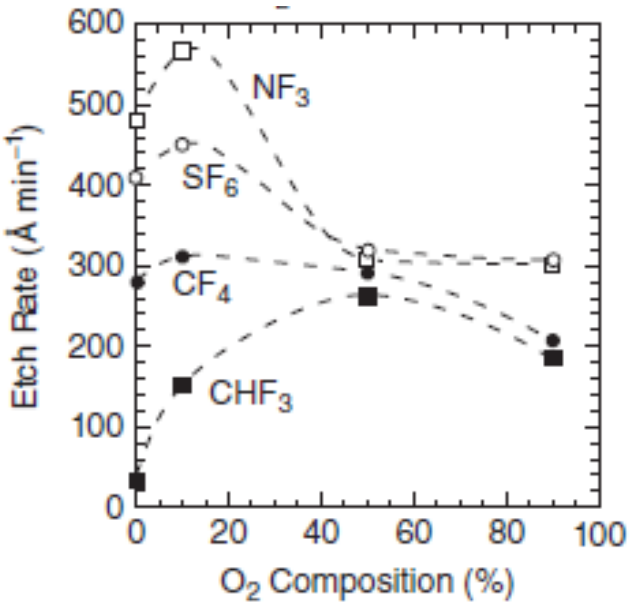


Рис. 4. Скорость КСП-РИТ SiC в зависимости от состава газовой смеси [35].

В частности, в работе [36] сообщалось, что в процессе РИТ в объеме SiC (на глубине до нескольких микрометров) генерируются несколько глубоких уровней, которые компенсируют примесную проводимость (в особенности это касается SiC *p*-типа).

Соотношения скоростей травления 4H-SiC и различных маскирующих материалов (селективность травления). В таблице 1 приведены данные по селективности травления SiC по отношению к различным маскирующим материалам.

Таблица 1. Селективность РИТ SiC по отношению к различным маскирующим материалам [35].

Маска	SiO_2	ITO	Al	Ni	Фоторезист
Селективность	0.8-3	10- 20	5-30	>50	<0.5

Фоторезист, который часто используется при РИТ Si, дает низкую селективность в случае SiC. Высокая селективность (более 10) достигается при использовании в качестве маски металлов, таких как Al и Ni. Однако при

маскировании Al образующиеся при травлении мелкие частицы Al_2O_3 могут адсорбироваться на поверхности. При этом возникает эффект "микромаскирования", приводящий к огрублению поверхности. Эффект "микромаскирования" может быть ослаблен путем добавления водорода в реактивный газ. Добавление H_2 приводит к образованию летучего соединения AlH_3, что эффективно удаляет микрочастицы, распыленные с Al-маски [21, 23, 28]. Однако при этом несколько снижается селективность травления. При изготовлении SiC приборов в промышленных условиях металлические маски обычно не используются. Как правило используют SiO_2, нанесенный методом CVD (Chemical Vapor Deposition). За счет добавки кислорода или за счет повышения автосмещения селективность РИТ SiC по отношению к SiO_2 может быть увеличена до 5 - 10.

Профили травления. Помимо скорости и селективности травления, не менее важным является контроль профилей травления. На рис. 5 показаны примеры профилей протравленного SiC, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).

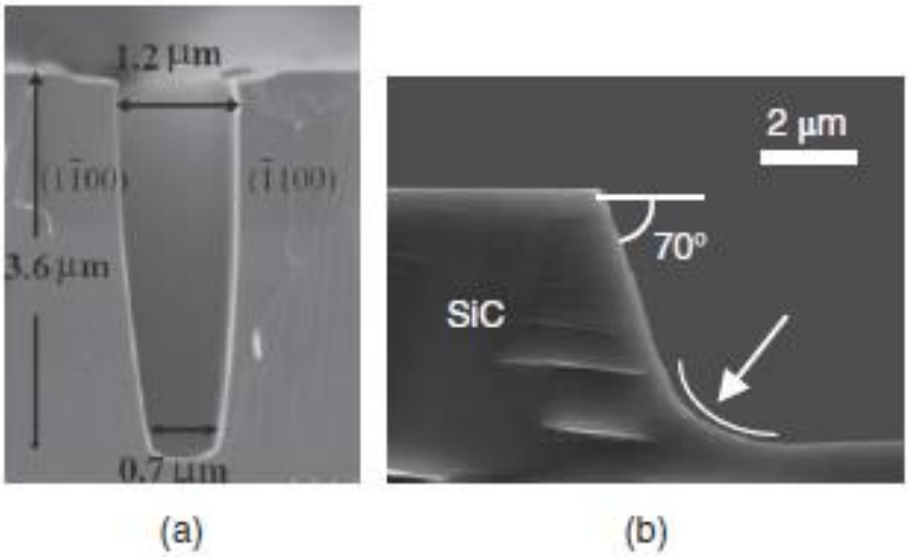


Рис. 5. Примеры профилей протравленного SiC, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа: (a) канавка с соотношением сторон 1:3, сформированная с помощью ИСП-РИТ с маской SiO_2 ([37]; (b) меза-структура, сформированная с помощью КСП-РИТ с маской SiO_2 [38].

На рис. 5a показана канавка (соотношение сторон 1 : 3), сформированная методом ИСП-РИТ с маской SiO_2. Показанная на рис. 5b меза-структура также была сформирована методом КСП-РИТ с маской SiO_2. Меза-структуры с очень малым углом скоса могут быть сформированы с использованием в качестве маски толстого фоторезиста, задубленного при высокой температуре [39].

Из приведенных примеров можно заключить, что процессы РИТ SiC исследованы достаточно детально. Однако методы точного контроля селективности травления и снижения шероховатости протравленных поверхностей до сих пор остаются предметом технологических экспериментов и физико-химического анализа.

1.2.2 Омические контакты

Омические контакты металл/полупроводник являются элементами практически всех полупроводниковых приборов. Сопротивление идеального омического контакта при протекании тока должно быть одинаковым для разных полярностей приложенного напряжения и должно быть насколько возможно малым по величине. Омический контакт не должен обладать инжектирующими свойствами, то есть он не должен влиять на соотношение концентраций основных и неосновных носителей тока в приборе. С практической точки зрения приемлемым омическим контактом будет такой контакт, через который протекает ток требуемой плотности при падении напряжения, достаточно малом по сравнению с падением напряжения на активной области прибора. Помимо малого электрического сопротивления, омический контакт должен обладать воспроизводимыми физико-химическими свойствами, иметь малое тепловое сопротивление и обеспечивать надежный монтаж прибора в корпус.

Как известно, электрические свойства контактов металл/полупроводник во многом определяются металлофизической структурой границ их раздела. Для

формирования невыпрямляющего контакта полупроводника и нанесенного на него металла обычно проводят быстрый термический отжиг (БТО) при достаточно высоких температурах, при которых на границе раздела могут протекать различные металлургические реакции – эвтектическое плавление и рекристаллизация (твердофазная эпитаксия), взаимная диффузия атомов металла и полупроводника, гетерогенные химические реакции и др.

К настоящему времени в качестве омических контактов к SiC *n*- и *p*-типа исследованы различные металлы и их комбинации. Ниже кратко описаны контактные системы, получившие наибольшее распространение – это Ni для SiC *n*-типа и Al/Ti для SiC *p*-типа.

Омические контакты к SiC n-типа. До настоящего времени достоверно не установлен механизм формирования невыпрямляющего контакта никеля к SiC *n*-типа. Структурные исследования показали, что во время БТО Ni взаимодействует с SiC с образованием слоя силицида Ni_2Si [40]. И хотя образование силицида происходит уже при 600 °C, для достижения невыпрямляющей характеристики контакта необходим отжиг при более высоких температурах. В работах [41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52] было показано, что низкоомный Ni контакт к сильно легированному SiC *n*-типа формируется только после БТО при температурах свыше 900 °C. На рис. 6 показана зависимость удельного сопротивления Ni контактов к 4H-SiC *n*-типа от температуры отжига.

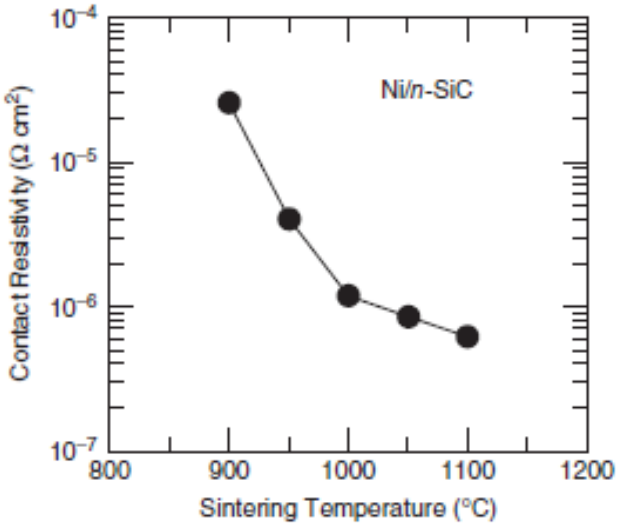


Рис. 6. Удельное сопротивление Ni контактов к 4H-SiC *n*-типа в зависимости от температуры отжига. Толщина слоя Ni составляет 100 нм, концентрация доноров в 4H-SiC *n*-типа – $2\cdot10^{19}$ см$^{-3}$ [35].

Как видно, удельное контактное сопротивление значительно снижается с увеличением температуры отжига и стремится к насыщению на уровне $1\cdot10^{-6}$ Ом·см^2 при температуре отжига свыше 1000 °C.

Как известно, Ni не образует карбидов, поэтому на границе раздела Ni/SiC может образовываться углеродная фаза. Существует гипотеза, что избыточный углерод на границе раздела образует низкий по высоте потенциальный барьер с 4H-SiC *n*-типа. Тем самым утверждается роль промежуточного слоя углерода в омическом поведении контакта [53]. Однако подтверждения этой гипотезы пока нет. В работе [54] было высказано предположение о том, что при отжиге в разупорядоченной области на границе раздела происходит термоактивированная структурная перестройка дефектов, в результате которой возникают электрически активные донорные центры вакансионного типа. Механизм протекания тока через контакт в этом случае сводится к макрополевой туннельной эмиссии носителей. В пользу того, что при вжигании никеля появляются именно донорные центры, косвенно свидетельствует тот факт, что в отличие от SiC *n*-типа, никель не образует омического контакта с SiC *p*-типа даже при

сравнительно высоких температурах отжига. В то же время оже-профили распределения Si, C и Ni в контактах к SiC *p*-типа свидетельствуют об образовании как силицида никеля, так и разупорядоченной области.

На рис. 7 показана зависимость удельного контактного сопротивления Ni от концентрации доноров в 4H-SiC. Как видно, для достижения низкого контактного сопротивления (менее $1 \cdot 10^{-5}$ Ом·см^2) необходимо повышать концентрацию доноров в 4H-SiC до уровня ~10^{19} см$^{-3}$ и выше.

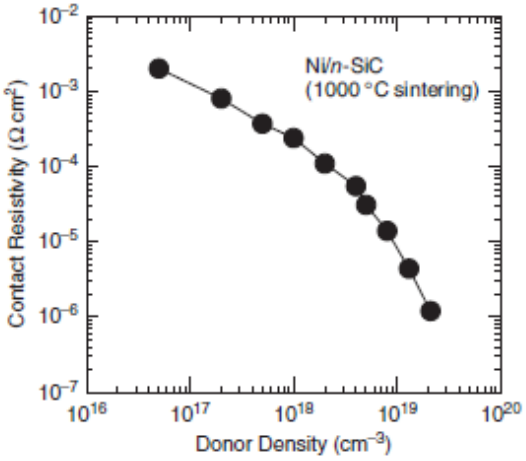


Рис. 7. Зависимость удельного сопротивления Ni-контактов к *n*-SiC от концентрации доноров [35].

Как было отмечено ранее, Ni не образует карбидов, поэтому необходим контроль избыточного углерода на границе раздела. Для решения "углеродной" проблемы были предложены комбинации Ni с карбид-образующими металлами, такими как Cr [55], Ti [56, 57], Ta [58], W [59, 60], Co [61]. Следует еще раз подчеркнуть, что при формировании омических контактов определяющую роль играет химическая реакция металла с SiC с образованием твердофазных продуктов – силицидов и карбидов. В результате протекания такой гетерогенной реакции контакты имеют, как правило, островковую морфологию. Известно, что топохимические реакции начинаются в области протяженных дефектов кристаллической решетки (дислокаций, границ зерен и т.п.), где потери энергии на деформацию связей минимальны и существует некоторый свободный объем, облегчающий

переориентацию реагирующих частиц. Поэтому такие реакции весьма чувствительны ко всем нарушениям структуры, облегчающим образование зародышей новой фазы. Они могут быть активированы термическими, механическими и другими воздействиями, увеличивающими концентрацию дефектов. В частности, формирование Ni контакта к SiC подложке *n*-типа (с концентрацией доноров не более $5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$) существенно облегчается, если металл осаждается на шлифованную поверхность.

Омические контакты к SiC p-типа. Для формирования низкоомных омических контактов к SiC *p*-типа наиболее часто используют комбинации различных металлов с алюминием, который является акцептором в SiC. Чистый Al, как правило, не используется по причине низкой температуры плавления (630 °C) и сильной сегрегации Al во время высокотемпературного отжига. В настоящее время наиболее распространена комбинация Al/Ti [62, 63, 64]. Оптимальная толщина слоев следующая: Al (300 нм)/Ti (80 нм). БТО проводят при температурах 900 - 1000 °C. Структурные исследования показали, что во время отжига Ti взаимодействует с SiC с образованием фазы Ti_3SiC_2 [65, 66]. При этом ее роль в формировании невыпрямляющей характеристики контакта остается невыясненной.

На рис. 8 показана зависимость удельного сопротивления контактов Al/Ti от концентрации акцепторов в 4H-SiC.

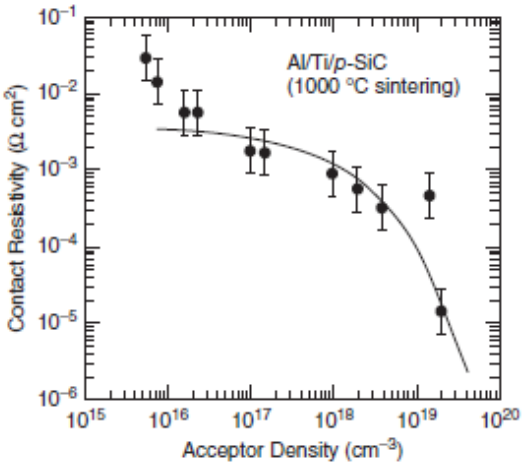


Рис. 8. Зависимость удельного сопротивления контактов Al/Ti от концентрации акцепторов в 4H-SiC [64].

Как видно, для достижения низкого контактного сопротивления (менее $1 \cdot 10^{-5}$ Ом·см^2) необходимо повышать концентрацию акцепторов до уровня $3 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$ и выше. Особо важно выделить тот факт, что сопротивление контактов к имплантированным алюминием *p*-слоям всегда выше по сравнению с контактами к эпитаксиальным слоям с той же концентрацией акцепторов.

Стоит отметить высокую долговременную стабильность разработанных омических контактов к SiC как *n*-, так и *p*-типа. В работах [42, 44, 51] было показано, что контакты Ni/*n*-SiC и Al/Ti/*p*-SiC не деградируют ни после их выдержки при 300 °C в течение 5000 часов, ни после выдержки при 500 °C в течение 500 часов.

1.2.3. Барьеры Шоттки

Высоковольтные 4H-SiC диоды с барьером Шоттки (БШ) в настоящее время находят широкое применение в устройствах силовой электроники. В свое время ключевой проблемой в технологии БШ была воспроизводимость и стабильность их свойств; кроме того, барьеры нередко оказывались неидеальными, что было следствием различных неоднородностей структуры контакта. В частности, на характеристики 4H-SiC БШ могут оказывать влияние такие факторы, как выход пор и дислокаций на поверхность эпитаксиального слоя [67], модификация поверхности в результате постимплантационного отжига охранных колец [68, 69], модификация поверхности в результате предварительного травления [70], окисления поверхности эпитаксиального слоя перед нанесением металла барьера Шоттки [71] и образование тонкого промежуточного слоя между металлом и SiC [72]. Кроме того, на свойства БШ существенное влияние оказывает термический отжиг [73, 74, 75]. Важно также и то, что свойства дискретных БШ, сформированных в виде матрицы на пластине 4H-SiC, варьируются от контакта к контакту, что является дополнительным фактором, объясняющим

значительный разброс имеющихся в литературе данных по характеристикам БШ на основе 4H-SiC.

Для стабилизации свойств БШ были предложены различные варианты предварительной подготовки поверхности перед нанесением металла, а также быстрая термообработка (RTA – Rapid Thermal Annealing) нанесенных барьерных контактов в вакууме или инертной среде. Во многих работах было показано, что RTA способствует структурной модификации границы раздела металл – 4H-SiC, а это приводит, в свою очередь, к заметному изменению электрических характеристик контактов [76, 77, 78]. В работах [72, 79, 80] были разработаны методы формирования стабильных контактов Шоттки с регулируемым по высоте барьером.

1.2.4. Термическое окисление

В планарной технологии кремниевых приборов широко используют диэлектрические слои из термической двуокиси кремния (в качестве подзатворных диэлектриков МОП-приборов, для межкомпонентной и межслоевой изоляции, для пассивации поверхности и т.п.). Преимущества пассивации поверхности кремния термическим окислом SiO_2 обусловлены низкой плотностью интерфейсных электронных состояний, низкой плотностью заряда, фиксированного в окисле, и низкой скоростью поверхностной рекомбинации. Кроме того, пленки SiO_2 характеризуются высокой электрической прочностью.

Карбид кремния, как и кремний, термически окисляется с образованием на поверхности гомогенной пленки SiO_2 высокого качества. Поэтому термическое окисление SiC широко используется для формирования подзатворного диэлектрика в силовых МОП-транзисторах на основе 4H-SiC, а также для пассивации поверхности SiC.

Термическое окисление SiC обычно проводят в сходных с окислением Si условиях: в потоке влажного или осушенного кислорода, при температурах 900 – 1200 °C. На свойства пленок SiO_2, получаемых термическим

окислением, оказывают влияние условия, при которых проводится окисление (температура, задающая скорость процесса, и окислительная атмосфера), а также кристаллографическая ориентация окисляемой поверхности.

Процесс окисления SiC существенно отличается от окисления кремния просто в силу того, что SiC – это бинарное соединение. Кроме того, SiC – более стойкий к термическому окислению материал. Достаточно толстые пленки окисла образуются только за несколько часов. Понятно, что скорость окисления SiC лимитируется, главным образом, скоростью оттока атомов углерода, высвобождающихся в процессе окисления, от интерфейса SiO_2/SiC. Термическое окисление SiC описывается следующей простой химической реакцией:

$$SiC + 3/2\ O_2 \rightarrow SiO_2 + CO \qquad (11)$$

Зная плотность SiO_2 и SiC, можно определить, что при образовании на поверхности SiC окисла толщиной 100 нм "расходуется" слой SiC толщиной 46 нм. Во время окисления большинство высвобождающихся атомов углерода диффундируют через растущий окисел в виде молекул CO, а небольшая часть атомов углерода диффундирует в объем SiC, что приводит к уменьшению дефектов, включающих углеродные вакансии [81]. При этом считается, что вблизи границы раздела SiO_2/SiC все же остается некоторое количество атомов углерода.

Кинетика окисления SiC показывает очень сильную ориентационную зависимость. Наибольшие различия в скорости роста окисла наблюдаются для плотноупакованных полярных граней (0001)Si и (0001)C. На рис. 9 показаны зависимости толщины окисла на поверхности SiC с ориентациями (0001)Si и (0001)C от времени окисления при различных температурах [82] (окисление проводилось в сухом кислороде).

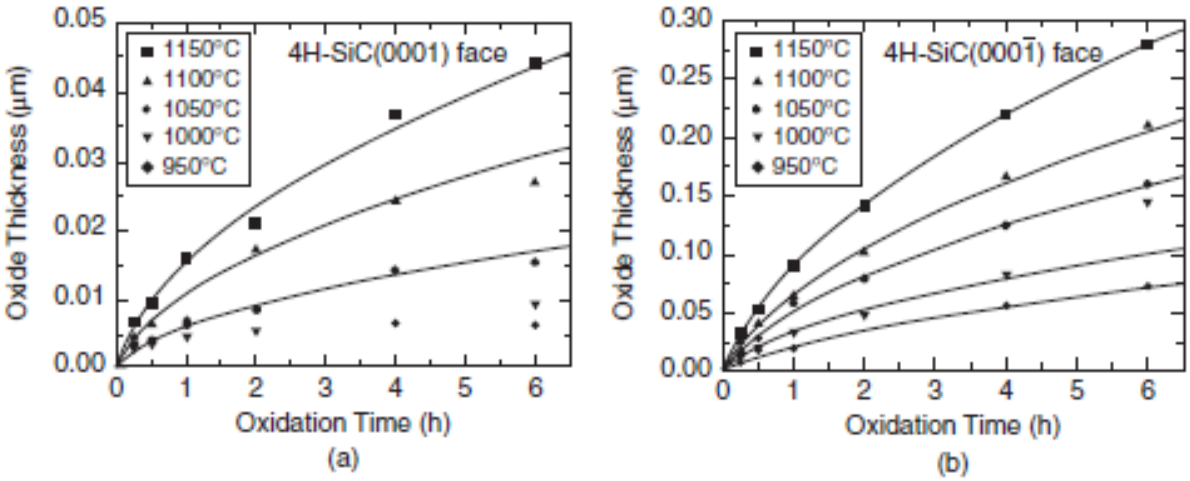


Рис. 9. Зависимости толщины окисла на поверхности SiC с ориентацией (0001)Si (a) и (0001)C (b) от времени окисления при различных температурах [82].

Как видно, поверхность с ориентацией (0001)C окисляется почти на порядок быстрее, чем поверхность с ориентацией (0001)Si. Эту особенность окисления SiC используют, в частности, для идентификации полярности граней кристалла [83]. Зависимости, показанные на рис. 9, неплохо описываются известной моделью Deal – Grove [84, 85]:

$$d_{ox}^2 + Ad_{ox} = Bt\ , \qquad (12)$$

где d_{ox} – толщина оксида, t – время окисления. Коэффициенты B и B/A называются параболической и линейной константами скорости окисления, соответственно. Как и в случае кремния, влажное окисление (включая пирогенное) дает более высокие скорости окисления по сравнению с сухим окислением. При этом длительное влажное окисление может приводить к образованию поверхностных ямок вследствие большей скорости окисления в местах выхода на поверхность дислокаций [86, 87]. Ускоренное окисление также наблюдается в областях, имплантированных высокоэнергетичными частицами: окисел на имплантированных участках обычно на 10 - 40% толще, чем на неимплантированных участках.

1.2.5. Радиационные технологии

К настоящему времени радиационная модификация свойств полупроводниковых материалов и приборов приобрела большое значение. Сформировалось целое направление: "радиационная технология полупроводников". Наиболее часто используемые радиационные технологии включают ионное легирование, радиационно-стимулированное ускорение диффузии внедренных примесных атомов, формирование аморфизированных поверхностных и скрытых пористых слоев, введение центров излучательной рекомбинации, управление рекомбинационными параметрами неравновесных носителей, компенсация примесной проводимости радиационными дефектами и др.

Ионное легирование акцепторами. В технологии кремниевых силовых приборов важное место занимает диффузия примесей. В SiC коэффициенты диффузии большинства примесей чрезвычайно малы, поэтому для локального легирования акцепторами широкое применение находит ионная имплантация. Процесс легирования методом ионной имплантации примесей требует восстановления кристаллической структуры SiC, нарушенной в результате бомбардировки тяжелыми ионами, а также электрической активации введенных примесей. С этой целью проводят высокотемпературный отжиг имплантированных слоев.

Основной примесью, используемой для легирования SiC акцепторами, в том числе с помощью ионной имплантации, является алюминий. Имплантацию другой акцепторной примеси – бора – для изготовления приборов в промышленных условиях обычно не применяют, поскольку имплантация бора не обеспечивает требуемых электрических параметров имплантированных слоев и хорошей воспроизводимости результатов.

Имплантированные атомы алюминия проявляют очень слабую диффузионную активность даже при очень высоких температурах отжига (в пределах 1600 – 1700 °C). Напротив, имплантированные атомы бора во время

активационного отжига обнаруживают значительную диффузионную активность [88, 89]. С одной стороны, в результате диффузии бора наружу из имплантированного слоя SiC часть имплантированных атомов теряется, а с другой стороны, в результате диффузии бора в глубину SiC имплантированный профиль сильно размывается. Таким образом, использование бора – не лучший выбор при создании слоев *p*-типа проводимости с помощью имплантации.

На рис. 10 показаны зависимости степени электрической активации имплантированных в SiC атомов алюминия и бора от температуры постимплантационного отжига [90]. Температура, при которой проводилась имплантация, – комнатная, доза имплантации – $1 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$.

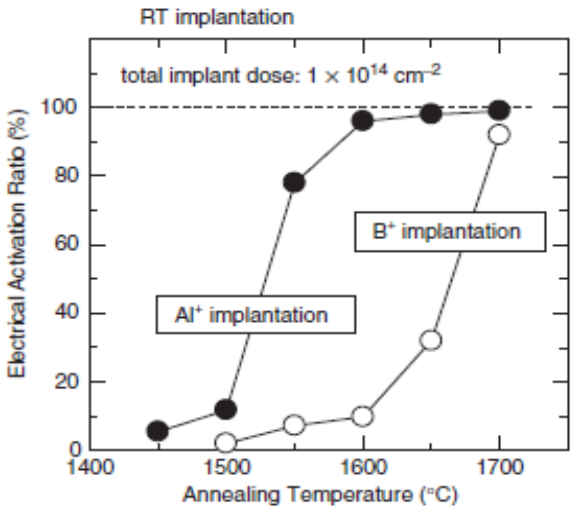


Рис. 10. Зависимости степени электрической активации имплантированных в SiC атомов алюминия и бора от температуры постимплантационного отжига [90].

Высокотемпературный отжиг имплантированных слоев необходим не только для электрической активации внедренных атомов, но и для полного восстановления структуры кристаллической решетки, что необходимо для достижения хороших выпрямляющих характеристик имплантированных *p-n*-переходов [91, 92, 93].

На рис. 11 показаны зависимости сопротивления слоев 4H-SiC(0001), имплантированных алюминием и бором, от дозы имплантации при

комнатной и при повышенной температуре [94]. Отжиг после имплантации проводился при 1800 °C в течение 30 минут.

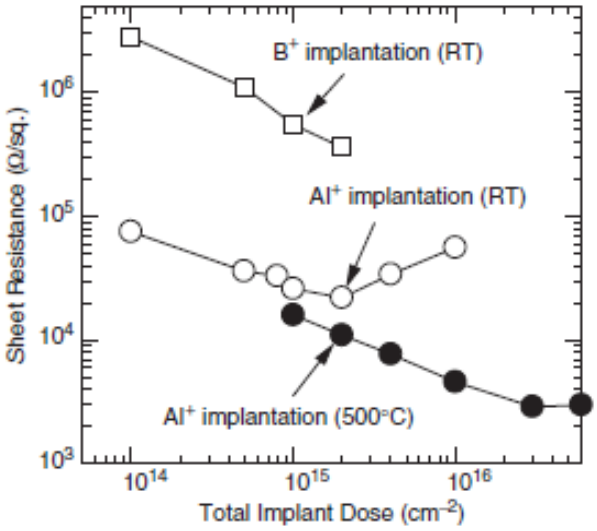


Рис. 11. Зависимости сопротивления слоев 4H-SiC(0001), имплантированных алюминием и бором при комнатной и при повышенной температуре и отожженных при 1800 °C в течение 30 минут, от дозы имплантации [94].

Имплантация алюминия при повышенной температуре необходима, когда требуется сформировать сильно легированные (более 10^{19} см$^{-3}$) p^+-области. Для формирования умеренно легированных *p*-областей достаточно имплантации алюминия при комнатной температуре с последующим высокотемпературным отжигом.

Как отмечалось выше, для достижения полного восстановления структуры решетки и высокой степени электрической активации постимплантационный отжиг проводится, как правило, при очень высоких температурах (1600 – 1700 °C). Температуру отжига не снижают даже если имплантация проводилась при повышенных температурах (500 – 1000 °C). Так делается из-за термической стабильности нескольких глубоких уровней, которые возникают в процессе ионной имплантации и которые вызывают частичную компенсацию внедренных акцепторов.

При высокотемпературном отжиге обычно наблюдается нарушение зеркальности поверхности SiC. Без специальных мер при отжиге зеркальность поверхность полностью теряется [95]: во-первых, происходит десорбция Si с поверхности SiC, а во-вторых, идет миграция поверхностных атомов. На рис. 12 показаны изображения, полученные с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) поверхности имплантированного алюминием 4H-SiC(0001), отожженного при 1800 °C в течение 5 минут с углеродным покрытием и без такового. Доза имплантации – $1 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$.

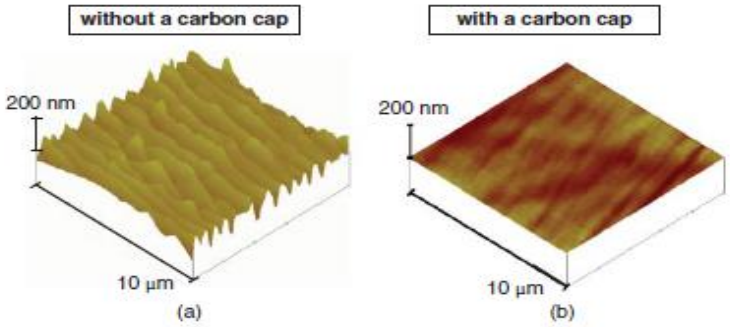


Рис. 12. АСМ-изображения поверхности имплантированного алюминием 4H-SiC(0001), отожженного при 1800 °C в течение 5 минут: с углеродным покрытием (a) и без него (b) [35].

Для образца, покрытого углеродом, шероховатость поверхности, определяемая как среднеквадратичное отклонение по высоте, составляла 1.0 нм на площади 10×10 мкм. Незащищенный образец показал гораздо более высокую шероховатость – 16.4 нм.

На рис. 13 показана зависимость шероховатости поверхности (площадь 10×10 мкм) от дозы имплантации для 4H-SiC(0001), имплантированного алюминием и отожженного при 1700 °C в течение 20 минут, с углеродным покрытием и без него.

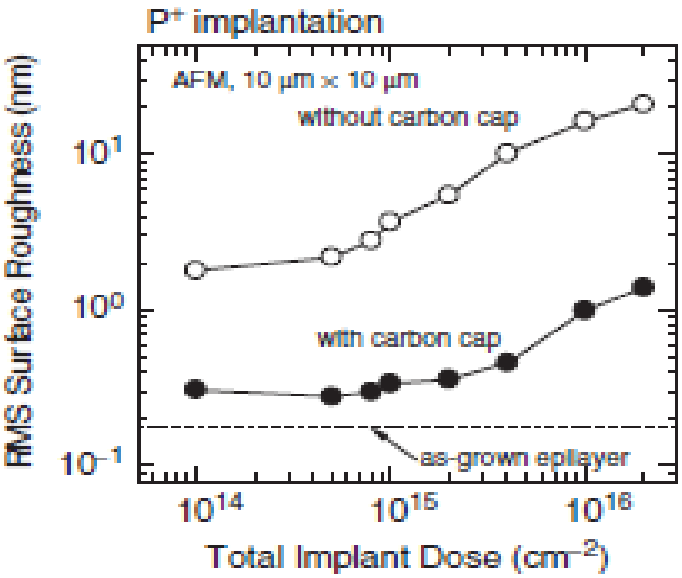


Рис. 13. Зависимость шероховатости поверхности (площадь 10×10 мкм) от дозы имплантации для 4H-SiC(0001), имплантированного алюминием и отожженного при 1700 °C в течение 20 минут, с углеродным покрытием и без него [35].

Шероховатость незащищенной поверхности SiC значительно увеличивается при увеличении дозы имплантации. Большая доза создает больше разорванных связей, и в результате большее количество поверхностных атомов может мигрировать при более низкой температуре (то есть миграционный барьер уменьшается из-за повреждений, вызванных имплантацией). Напротив, шероховатость поверхности даже при большой дозе имплантации может быть минимизирована за счет использования углеродного покрытия. Углеродное покрытие обычно формируют путем высокочастотного распыления графита или графитизации нанесенного фоторезиста. Во время высокотемпературного отжига на границе углерод/SiC химические реакции не происходят. После отжига углеродное покрытие легко снимается в кислородной плазме или путем его сжигания при температурах 700 – 800 °C; в этих процессах SiC окисляется минимально (на глубину не более нескольких нанометров).

Также следует отметить попытки создания высокоомных слоев SiC посредством имплантации ионов аргона. В работе [96] описан способ создания слоя с высоким удельным сопротивлением таким методом. Приведена серия экспериментов по имплантации различных доз аргона (от 10^{12} до 10^{15} см$^{-2}$) и энергиями от 30 до 400 кэВ для создания слоя аморфного карбида кремния. При этом толщина получаемых слоев составляла от 0,029 мкм (для энергии 30 кэВ) до 0,358 мкм (для энергии 400 кэВ). В работе [97] исследовались характеристики диода Шоттки с охранной системой в виде тонкого полуизолирующего слоя на периферии диода. Для создания таких диодов был выбран режим облучения с дозой ионов $1 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$ и энергией 30 кэВ. Однако, до последнего времени этот метод не получал ни дальнейшего развития, ни практического применения.

§ 1.3. Охранные системы высоковольтных приборов

Ключевой проблемой при конструировании высоковольтных 4H-SiC приборов является устранение нежелательных краевых и поверхностных эффектов.

В планарных p^+-n–переходах (рис. 14) уменьшение радиуса кривизны (r_J) p^+-n–перехода сопровождается увеличением электрического поля в переходе при заданном обратном напряжении, и это значительно снижает напряжение пробоя. Из-за этого блокирующее напряжение планарных приборов обычно ограничивается преждевременным краевым пробоем, если не применяются конструктивно-технологические приемы, позволяющие частично или полностью устранить краевые эффекты.

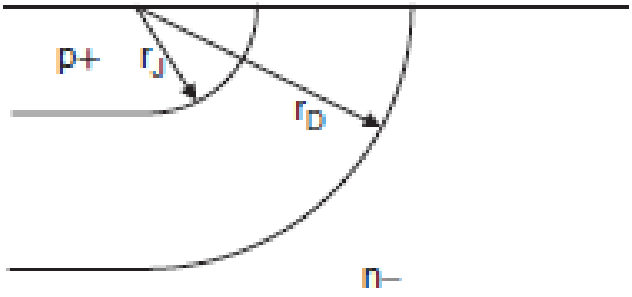


Рис. 14. Поперечное сечение планарного p^+-n–перехода с цилиндрической краевой конфигурацией; r_J – радиус кривизны перехода, r_D – радиус кривизны края обедненной области.

Для планарных 4H-SiC приборов с блокирующей *n*-базой (диодов Шоттки и МОП-транзисторов) было предложено множество конструктивно-технологических решений проблемы краевого пробоя, предусматривающих формирование на периферии базовой *n*-области локальных имплантированных областей *p*-типа.

Охранные JTE-структуры. Наиболее популярным методом формирования охранного краевого контура стало создание так называемой JTE-структуры (Junction Termination Extension) [98]. JTE-структура состоит из одного или нескольких концентрических колец *p*-типа (с тщательно контролируемой концентрацией акцепторов), окружающих основной переход, как показано на рис. 15.

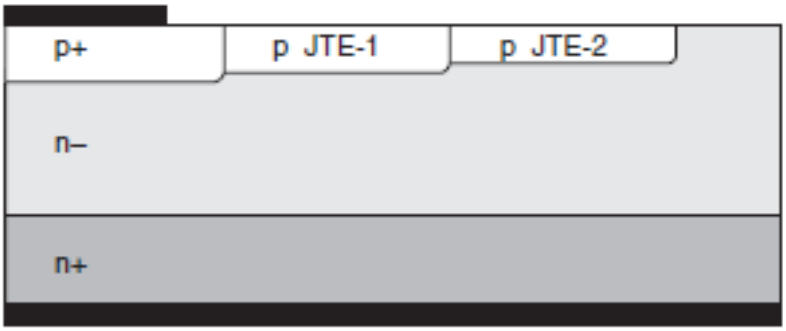


Рис. 15. Поперечное сечение p^+-n–перехода с двухзонной охранной JTE-структурой.

Ключевое требование к JTE-структуре – это точно заданная величина поверхностной концентрации акцепторов в *p*-кольцах. Поверхностная концентрация акцепторов должна выбираться такой, чтобы *p*-кольцо оказалось полностью обедненным основными носителями (дырками) еще до возникновения лавинного пробоя на крае кольца. В этом случае отрицательно заряженные ионизированные акцепторы в обедненных кольцах выравнивают распределение электрического поля на крае основного перехода, вытягивая переход в латеральном направлении, как показано на рис. 16.

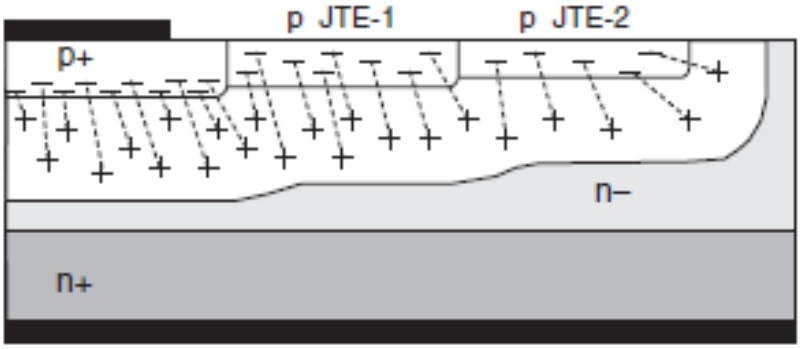


Рис. 16. Силовые линии электрического поля на крае планарного обратносмещенного p^+-*n*–перехода с двухзонной JTE-структурой.

В случае однозонной JTE-структуры (и при фиксированной ширине *p*-кольца) напряжение пробоя быстро падает при дозах имплантации, превышающих оптимальную. По этой причине обычно выбирают такую дозу, которая составляет около 75% от оптимальной (учитывая, что степень активации акцепторов в процессе отжига может несколько меняться). Напряжение пробоя в приборах с однозонной JTE-структурой увеличивается при увеличении ширины *p*-кольца до тех пор, пока ширина *p*-кольца не превышает двойной толщины обедненной области при пробое. Довольно узкий интервал доз имплантации, обеспечивающий достижение высокого напряжения пробоя в приборах с однозонной JTE-структурой, может быть расширен за счет применения многозонной JTE-структуры с несколькими *p*-кольцами.

Моделирование показало, что профиль легирования внедренных акцепторов мало влияет на эффективность охраны [99], но весьма важную роль может играть поверхностный заряд, который должен тщательно контролироваться, например, путем формирования на поверхности высококачественного диэлектрического пассивирующего слоя.

Плавающие охранные кольца. На рис. 17 показан планарный обратносмещенный p^+-n–переход с четырьмя плавающими охранными p-кольцами. Также показаны несколько эквипотенциальных линий при обратном смещении.

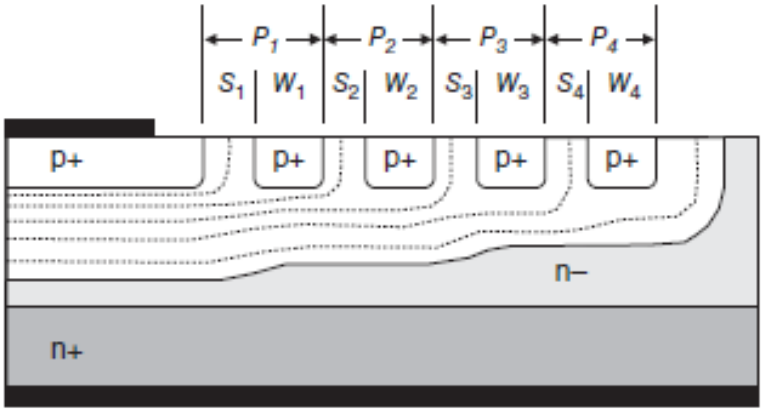


Рис. 17. Поперечное сечение планарного p^+-n–перехода с четырьмя плавающими охранными кольцами (FFR – Floating Field Ring).

По мере увеличения обратного напряжения обедненная область основного перехода постепенно расширяется, пока не достигнет первого кольца. Кольцо действует как эквипотенциальная область, а обедненная область продолжает расширяться наружу от этого кольца. Эквипотенциальные линии на рис. 17 могут быть приняты за последовательные положения края обедненной области при постепенном увеличении обратного напряжения. Охранный эффект заключается в том, что обедненная область вытягивается в латеральном направлении вдоль поверхности, уменьшая тем самым краевое электрическое поле. Плавающие охранные p-кольца, как правило, сильно легированы, что является преимуществом по сравнению с JTE-структурой. Критическими параметрами FFR-структуры являются количество колец,

ширина каждого кольца и расстояние между ними. Чтобы быть эффективной, FFR-структура должна простираться в латеральном направлении на расстояние, по крайней мере, вдвое больше глубины области обеднения при пробое.

Для высоковольтных приборов нередко используется несколько десятков концентрических охранных колец, и это вводит огромное количество свободных конструктивных параметров. Поэтому алгоритм оптимизации FFR-структуры задать довольно трудно.

Комбинированные охранные системы. Наиболее сложные охранные системы объединяют концепции JTE- и FFR-структур. В частности, были предложены многозонные плавающие (MFZ – Multi-Floating Zone) JTE-структуры [100] и довольно похожие на них пространственно-модулированные (SM – Space-Modulated) JTE-структуры [101].

В MFZ JTE-структуре применяется серия концентрических плавающих *p*-колец, которые обедняются до достижения пробоя. Структура, показанная на рис. 18, похожа на FFR-структуру, показанную на рис. 16, с той разницей, что *p*-кольца в первой слабее легированы. Кроме того, в структуре на рис. 18 период каждой зоны одинаков, но отношение W/S уменьшается от внутреннего кольца к внешнему.

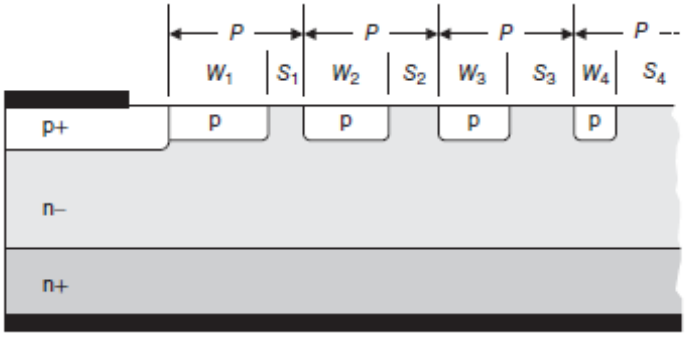


Рис. 18. Поперечное сечение p^+-*n*–перехода с MFZ JTE-структурой.

MFZ JTE-структура обеспечивает гораздо более широкий диапазон допустимых доз имплантации, нежели однозонная JTE-структура.

Приведенные в главе данные показывают, что современное качество материала позволяет создавать приборы, параметры которых практически совпадают с теоретически предсказанными значениями. Основным препятствием к реализации таких параметров являются проблемы, связанные с краевым пробоем. Во всех конструктивных вариантах исполнения описанных выше охранных систем, мелкие имплантированные *p-n*–переходы позволяют уменьшить кривизну силовых линий электрического поля, и дают возможность поднять напряжение пробоя вплоть до его теоретически предельной величины. Несмотря на значительные успехи, создание таких охранных систем сопряжено со многими технологическими трудностями. При их реализации необходимо использование высокотемпературных (до 2000 °C) процессов, а также прецизионной литографии с разрешением ~ 1 мкм. Поэтому поиск новых способов защиты от краевого пробоя все еще актуален. В данной работе будут рассмотрены реализованные нами альтернативные варианты охранных систем.

Глава 2. Моделирование охранной системы в виде краевой полуизолирущей области для высоковольтных лавинных диодов с *p-n*-переходом

§ 2.1 Принципы формирования охранной системы с помощью краевых полуизолирующих слоев

Физический механизм действия охранной системы с помощью краевых полуизолирующих слоев состоит в компенсации примесной проводимости в приповерхностной области полупроводниковых структур. При имплантации высокоэнергетичных заряженных частиц (электронов, легких и тяжелых ионов) имплантируемые частицы при торможении в приповерхностной области полупроводника создают дефекты с глубокими энергетическими уровнями в запрещенной зоне, способные захватывать свободные носители заряда (компенсирующие дефекты). В принципе, облучением можно

добиться полной компенсации примесной проводимости, создавая тем самым приповерхностные полуизолирующие слои [102].

До недавнего времени исследования компенсации примесной проводимости в SiC радиационными дефектами проводились преимущественно с использованием легких заряженных частиц – электронов и протонов [103, 104, 105]. Было показано, что скорость удаления свободных носителей составляет от долей до нескольких единиц обратных сантиметров.

В нашей работе [106] была исследована компенсация проводимости в *n*-4H-SiC облучением тяжелыми частицами – ионами аргона. Было показано, что за счет более интенсивного дефектообразования при торможении тяжелых ионов скорость удаления свободных носителей оказывается на несколько порядков больше (~ 10^4 см$^{-1}$).

Экспериментальные образцы в работе [106] изготавливались на основе коммерческих эпитаксиальных 4H-SiC структур. Эпитаксиальная структура состояла из подложки n^+-типа с удельным сопротивлением 0.02 Ом·см и *n*-слоя с концентрацией доноров $2\cdot10^{16}$ см$^{-3}$ и толщиной 10 мкм. На тыльной стороне формировался никелевый омический контакт. Затем проводилось облучение эпитаксиального *n*-слоя ионами аргона с энергией 53 МэВ на Уникальной Научной Установке (УНУ) «Циклотрон ФТИ». Доза облучения составляла около $7\cdot10^{11}$ см$^{-2}$. На поверхности облученного слоя формировались металлические Ni контакты. Площадь контактов S составляла 1.2 мм^2. Образцы после облучения термическому отжигу не подвергались.

Измерения адмиттанса изготовленных структур (со смещением до 40 В при обеих полярностях) показали, что они обладают свойствами электрического конденсатора с малыми утечками: емкость конденсатора C равнялась 12.5 пФ (она практически не зависела от частоты в пределах 1 кГц - 1 МГц). Был сделан вывод о том, что в результате облучения формируется приповерхностный полуизолирующий слой, толщина которого d составляет $d = \varepsilon S/C$ = 8.9 мкм (ε = $8.85\cdot10^{-11}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость 4H-

SiC). Определенная таким образом толщина полуизолирующего слоя была близка к рассчитанному по программе SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) пробегу ионов аргона. Электрические свойства полуизолирующего *i*-слоя исследовались путем анализа тока монополярной инжекции электронов в *i*-слой из *n*-области (рис. 19).

Рис. 19. Схематическое сечение полупроводниковой *n*-структуры с приповерхностным полуизолирующим *i*-слоем. Стрелкой показана инжекция электронов из полупроводника в полуизолирующий слой.

Анализ инжекционного тока позволяет определить параметры локальных состояний в запрещенной зоне 4H-SiC, используя теорию инжекционных токов в изоляторах с ловушками захвата носителей [107]. При комнатной температуре удельное сопротивление облученных аргоном *i*-слоев составляет не ниже $7 \cdot 10^{12}$ Ом·см. За компенсацию донорной проводимости ответственны радиационные дефекты, закрепляющие положение равновесного уровня Ферми на глубине 1.1 - 1.2 эВ ниже дна зоны проводимости 4H-SiC (рис. 20 и 21).

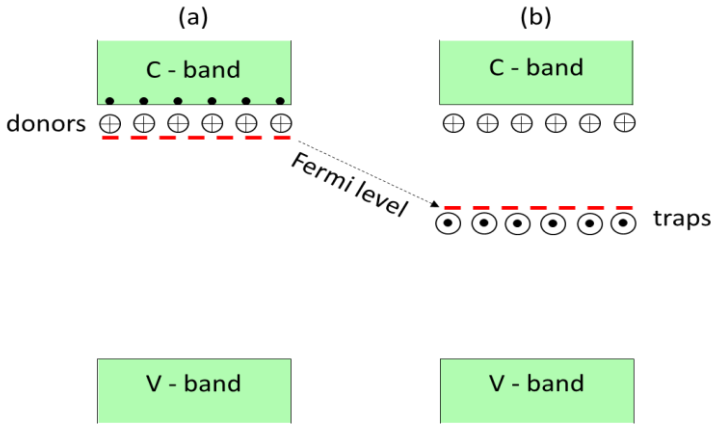


Рис. 20. Механизм компенсации донорной проводимости в *n*-4H-SiC радиационными дефектами с глубокими уровнями: зонные диаграммы до имплантации (a) и после имплантации (b).

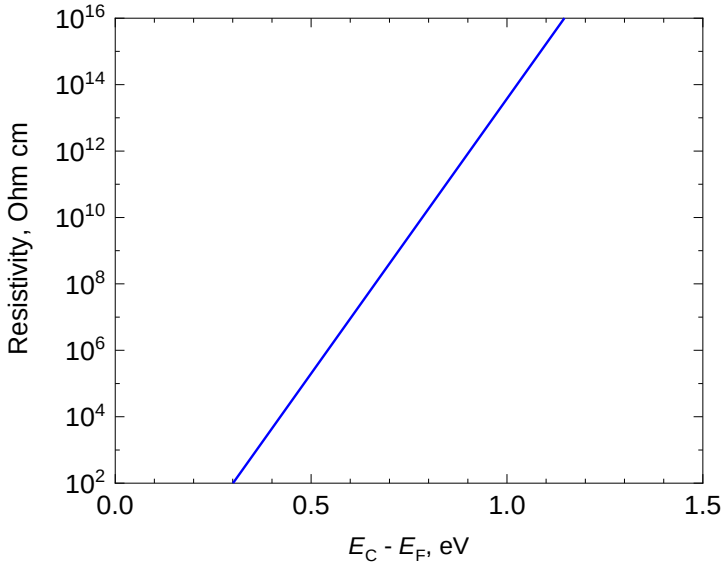


Рис. 21. Расчетная зависимость удельного сопротивления 4H-SiC от положения уровня Ферми в запрещенной зоне [108].

В работе [109] исследовано влияние термического отжига на электрические свойства облученных слоев. Вначале проводилось облучение образцов 4H-SiC со стороны *n*-слоя ионами аргона с энергией 53 МэВ. Доза облучения составляла $1 \cdot 10^{12}$ см$^{-2}$. Электрические характеристики слоев *i*-SiC, не подвергнутых дополнительной термической обработке после облучения, проявляли некоторую нестабильность [106]. Далее образцы подвергались изохронной термической обработке в вакууме (30 минут) при разных температурах: 400, 600, 800 и 1000 °C. Затем на поверхности имплантированных слоев формировались анодные никелевые контакты площадью S = 2.56 мм^2. Наконец на обратную сторону каждого из образцов напылялся сплошной слой никеля (катод). ВАХ изготовленных структур с металлическими контактами измерялись в диапазоне токов 10^{-9} - 10^{-4} А. На рис. 22 показаны типичные ВАХ изготовленных структур, измеренные при комнатной температуре и при положительном потенциале анода. Как видно, электрическое сопротивление отожженных структур немонотонно зависит от температуры термообработки.

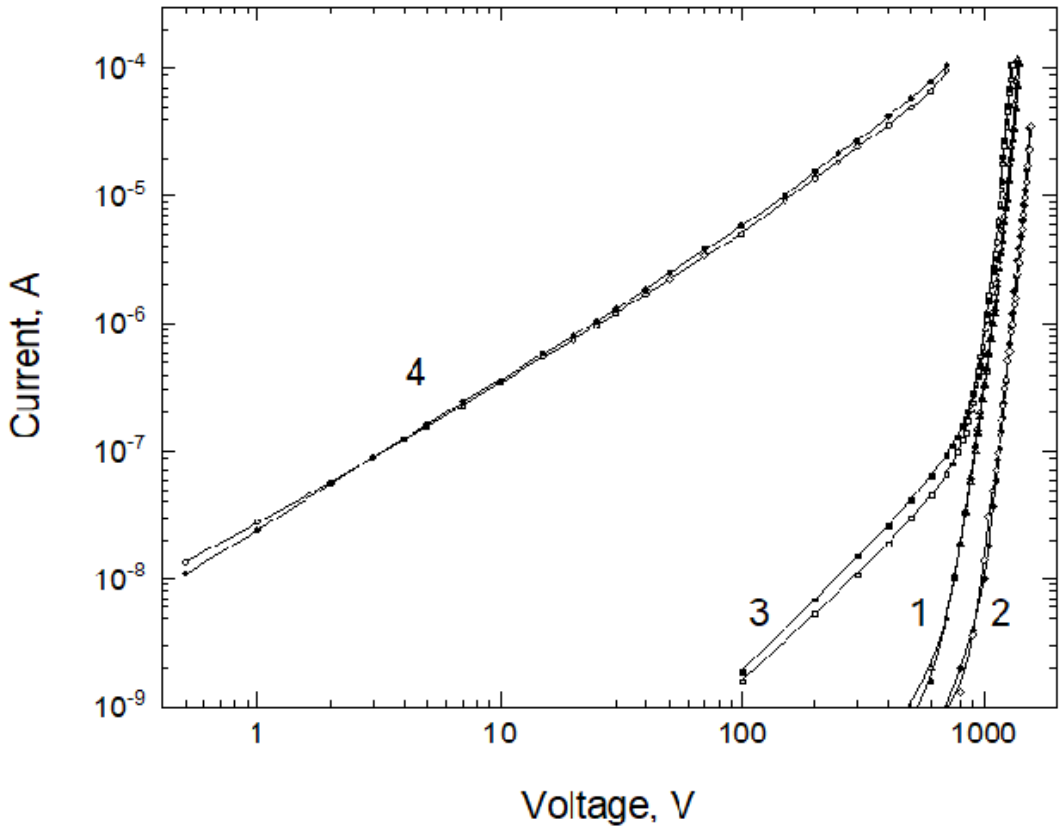


Рис. 22. Типичные ВАХ изготовленных структур, измеренные при комнатной температуре. Температура термообработки [°C]: линия 1 – 400, линия 2 – 600, линия 3 – 800, линия 4 – 1000 [109].

Наиболее высокоомными облученные слои *i*-SiC становились после термообработки при температуре 600 °C: их удельное сопротивление при комнатной температуре составляет не менее $2 \cdot 10^{13}$ Ом·см.

На рис. 23 показаны ВАХ структур (отожженных при 600 °C), измеренные при температурах от 25 до 230 °C.

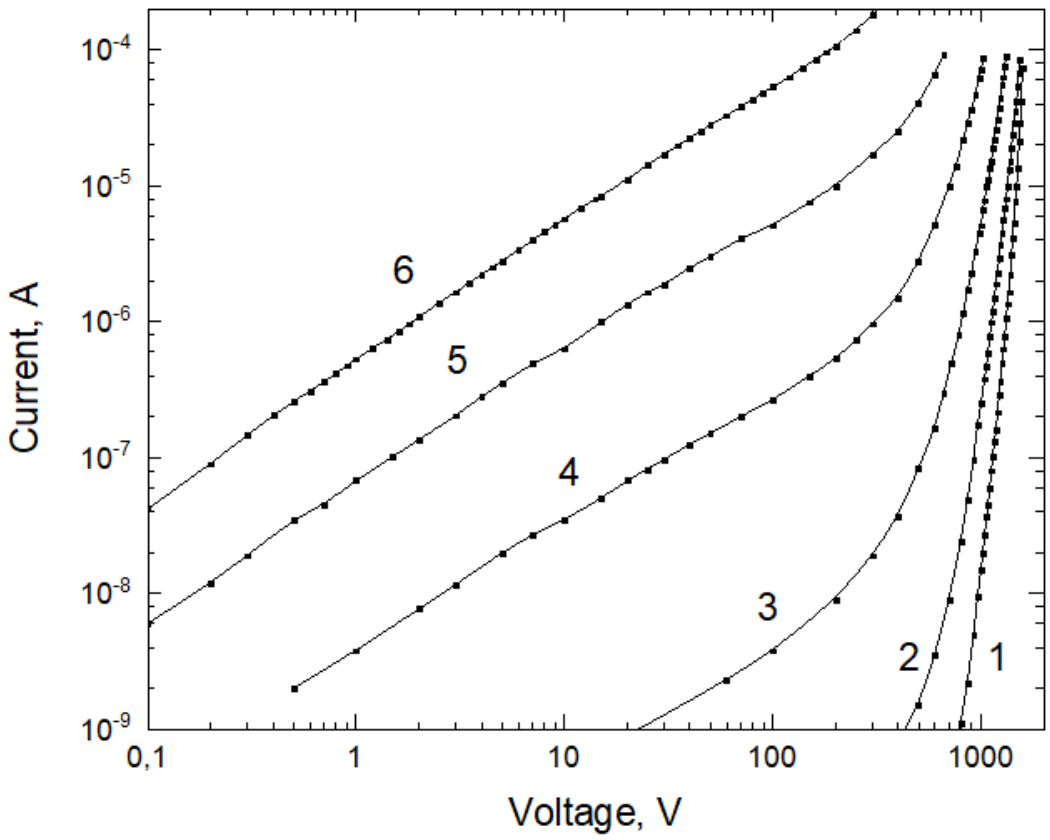


Рис. 23. ВАХ структур (отожженных при 600°С), измеренные при температурах: 1 – 25 °С, 2 – 65 °С, 3 – 105 °С, 4 – 145 °С, 5 – 185 °С, 6 – 230 °С [109].

Как видно, при повышении температуры проводимость облученного слоя монотонно возрастает. Но даже при температуре 230 °С материал остается высокоомным – удельное сопротивление составляет около $5 \cdot 10^7$ Ом·см.

Из приведенных данных с очевидностью следует, что, используя облучение высокоэнергетичными (53 МэВ) ионами аргона, можно создавать достаточно толстые (~ 10 мкм) полуизолирующие слои SiC.

§ 2.2 Моделирование высоковольтного диода с *p-n*-переходом и охранной системой в виде краевой полуизолирующей области

Как уже говорилось, одной из важнейших проблем, возникающих при разработке высоковольтных приборов, является проблема предотвращения краевого (поверхностного) пробоя. Одним из способов её решения является

формирование на периферии диода полуизолирующей *i*-области с "вертикальной стенкой", как показано на рис. 24.

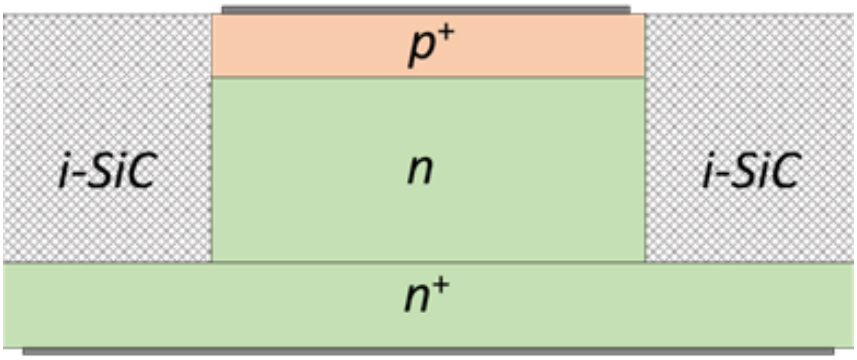


Рис. 24. Схематическая структура квазиодномерного 4H-SiC p^+-n-n^+–диода с охранной полуизолирующей *i*-областью.

Очевидное достоинство такого подхода состоит в том, что «вертикальная стенка» формируется в объеме полупроводника, так что поверхностных эффектов просто нет. Если толщина *i*-области сравнима с толщиной блокирующей *n*-базы, то напряжение пробоя диода может быть приближено, в принципе, к теоретическому пределу для одномерной барьерной структуры. В 4H-SiC диодах с напряжением пробоя 1000 - 3000 В толщина блокирующей *n*-базы составляет от 5 до 15 мкм (рис. 25). Для диода, рассчитанного на напряжение пробоя 1500 В с толщиной блокирующей *n*-базы в 8 мкм (рис. 25), толщина *i*-области должна быть порядка 10 мкм.

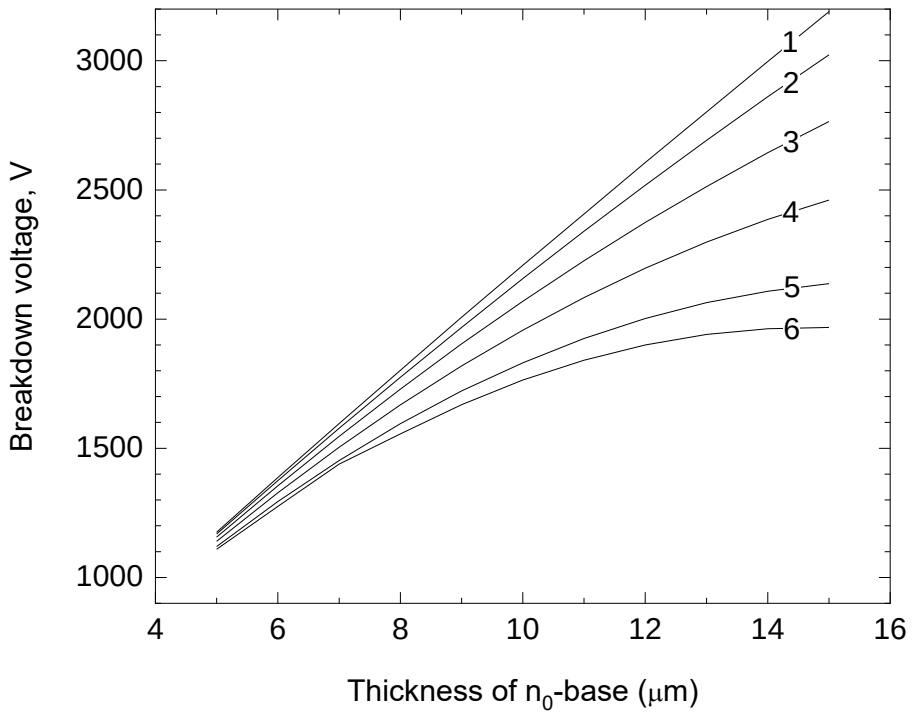


Рис. 25. Расчетные аналитические зависимости напряжения пробоя одномерного 4H-SiC p^+-n-n^+-диода от толщины блокирующей n-базы при различных концентрациях доноров [см$^{-3}$]: линия 1 – 10^{15}, линия 2 – $3\cdot10^{15}$, линия 3 – $5\cdot10^{15}$, линия 4 – $7\cdot10^{15}$, линия 5 – $9\cdot10^{15}$, линия 6 – 10^{16}.

Выше (в § 2.1) было показано, что в n-4H-SiC с помощью облучения высокоэнергетичными (53 МэВ) ионами аргона возможно формирование полуизолирующих слоев i-4H-SiC толщиной около 10 мкм (компенсация донорной проводимости достигается за счет генерации глубоких термостабильных акцепторных дефектов с глубиной залегания в запрещенной зоне 4H-SiC около 1.2 В ниже дна зоны проводимости). Проведено моделирование с использованием программного пакета SILVACO TCAD (Technology Computer Aided Design) [110] высоковольтных (1100 В) 4H-SiC p^+-n-n^+-диодов с охранной полуизолирующей областью, образованной за счет компенсации доноров в n-области глубокими акцепторными ловушками.

Для моделирования был выбран 4H-SiC диод со следующими параметрами эпитаксиальной p^+-n-n^+-структуры: концентрации акцепторов в p^+-области и

доноров в n^+-области (подложка) – $1 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$; концентрация доноров в n-области N = $2 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$, толщины p^+-, n- и n^+-областей – 1, 8 и 1 мкм, соответственно (рис. 26).

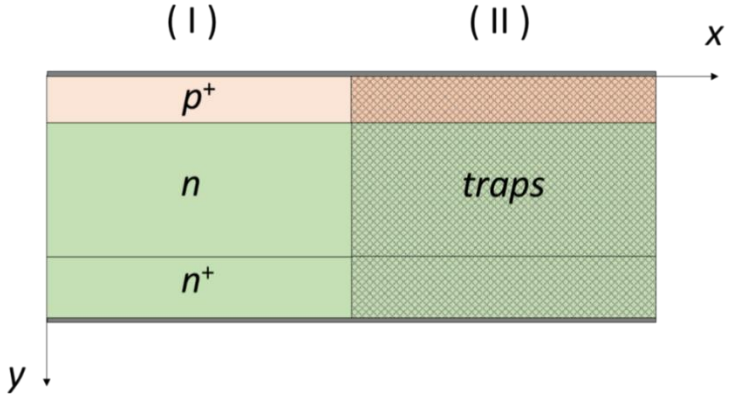


Рис. 26. Поперечное сечение моделируемого 4H-SiC p^+-n-n^+–диода.

Заштрихованная область II шириной 50 мкм и толщиной 10 мкм содержит глубокие моноэнергетические ловушки акцепторного типа. Параметры ловушек следующие: глубина залегания в запрещенной зоне 4H-SiC E_C - E_t = 1.2 эВ, концентрация N_t = $3 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$ (несколько больше концентрации доноров в блокирующей n-базе), фактор вырождения g = 2, сечение захвата электрона σ_n = 10^{-14} см^2, сечение захвата дырки σ_p = 10^{-16} см^2. Свободная от ловушек область I (рабочая область диода) шириной 50 мкм при x < 40 мкм может рассматриваться как идеализированная одномерная p^+-n-n^+-структура.

Для двумерного численного моделирования использовался программный пакет SILVACO TCAD. При моделировании были приняты следующие упрощающие допущения:

1) легирующие примеси в p^+-, n- и n^+-областях полностью ионизованы;

2) подложка и омические контакты к сильнолегированным p^+- и n^+-областям имеют пренебрежимо малое электрическое сопротивление.

Моделировался переходный процесс в простейшей цепи, включающей источник медленно изменяющегося со временем напряжения V(t) и подключенный к источнику напряжения моделируемый 4H-SiC диод (DUT на рис. 27).

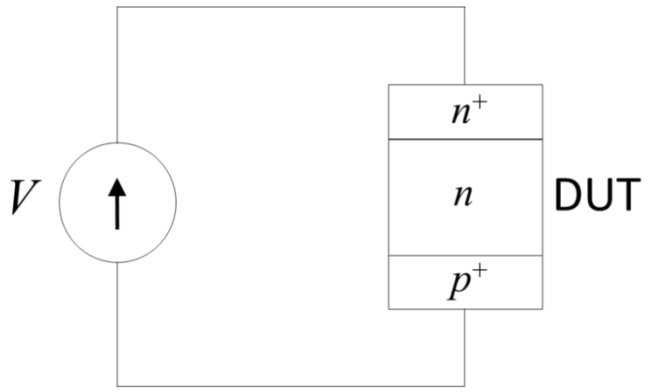


Рис. 27. Электрическая цепь для моделирования обратносмещенного 4H-SiC p^+-n-n^+-диода.

Модельный эксперимент имитирует измерение обратной ВАХ на характериографе и состоит в следующем. Начиная с момента времени $t = 0$, напряжение медленно нарастает со скоростью dV/dt = 1 В/с. Во время нарастания напряжения записывается файл *pn_tr.log*, содержащий временную зависимость тока в цепи. Очевидно, что в любой момент времени *t* мгновенное значение тока I(t) совпадает с его квазистационарным значением. Искомая зависимость I(V) получается путем исключения параметра t из ВАХ, заданной параметрически: I(t) и V(t) (по сути, ось времени на зависимости I(t) просто калибруется в значения напряжения V). Кроме временной зависимости тока, во время переходного процесса записывается файл *data.str*, содержащий пространственные распределения в p^+-n-n^+-структуре таких физических величин как электрическое поле, темп лавинной генерации носителей, плотность тока и др. Это позволяет, в частности, выявить место локализации лавинного пробоя в полупроводниковой структуре. Из физических моделей, которые заложены в модуле ATLAS пакета SILVACO TCAD, использовались следующие:

1) модель низкополевой подвижности носителей тока [111] с параметрами для 4H-SiC из работы [112];

2) модель насыщения дрейфовой скорости носителей тока [111] с параметрами для 4H-SiC из работы [113];

3) модель ударной ионизации [114] с параметрами для 4H-SiC из работы [12];

4) модель генерации-рекомбинации Шокли-Рида-Холла [11] с параметрами для 4H-SiC, принятыми в ATLAS по умолчанию.

Известная для широкозонного 4H-SiC проблема запуска ударной ионизации при комнатной температуре была решена способом, который предлагается в описании ATLAS, а именно путем ограничения снизу плотности дырочного тока. В нашем случае плотность дырочного тока ограничивалась на уровне 10^{-9} А/см^2. Задача моделирования состояла в том, чтобы оценить эффективность работы *i*-области в качестве охранного контура, в том числе при повышенных температурах. Исходя из этого, при моделировании температурно-зависимыми принимались только тепловые генерационно-рекомбинационные процессы (игнорировались, в частности, температурные зависимости ширины запрещенной зоны, дрейфовой скорости носителей тока, коэффициентов ударной ионизации электронов и дырок и др.).

На рис. 28 показано двумерное распределение концентрации свободных электронов в p^+-n-n^+-структуре, рассчитанное в равновесных условиях при комнатной температуре.

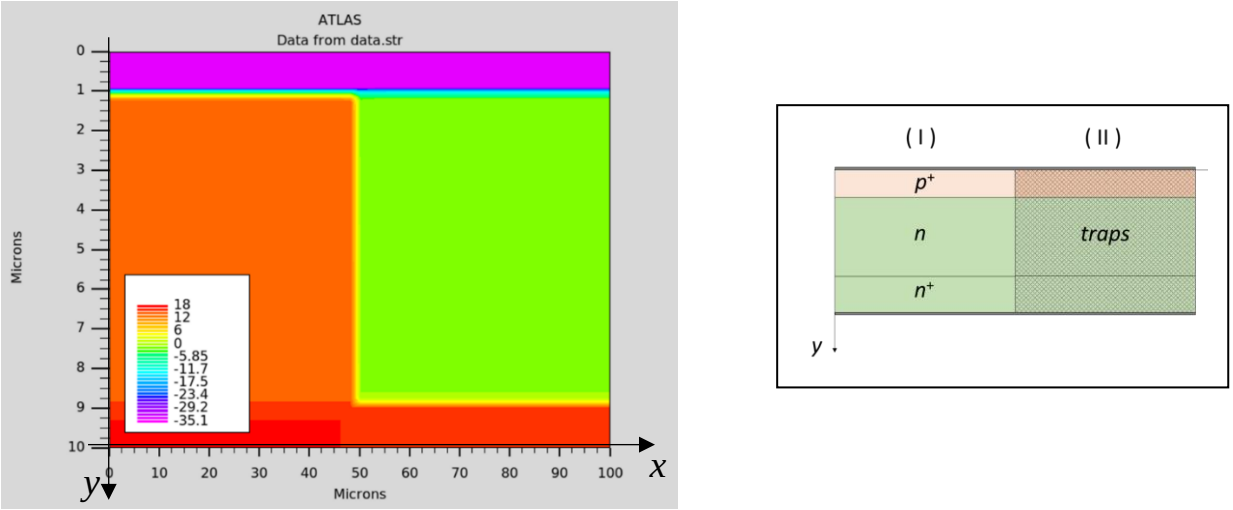


Рис. 28. Двумерное распределение концентрации свободных электронов в p^+-n-n^+–структуре в равновесных условиях (T = 300 K). Концентрация представлена как log n [см$^{-3}$]. Справа для наглядности воспроизведен рис. 26.

Как видно из рис. 28, в той части *n*-базы, которая находится в области 50 - 100 мкм по оси абсцисс, свободных электронов практически нет (n ~ 1 см$^{-3}$). То есть, объемный заряд в этой области близок к нулю (концентрация положительно заряженных ионизованных доноров равна концентрации отрицательно заряженных ионизованных акцепторных ловушек). Поскольку объемного заряда нет, приложенное внешнее электрическое поле в этой области должно быть почти однородным.

На рис. 29 показано двумерное распределение электрического поля в p^+-n-n^+-структуре при обратном напряжении V = 1130 В (T = 300 К).

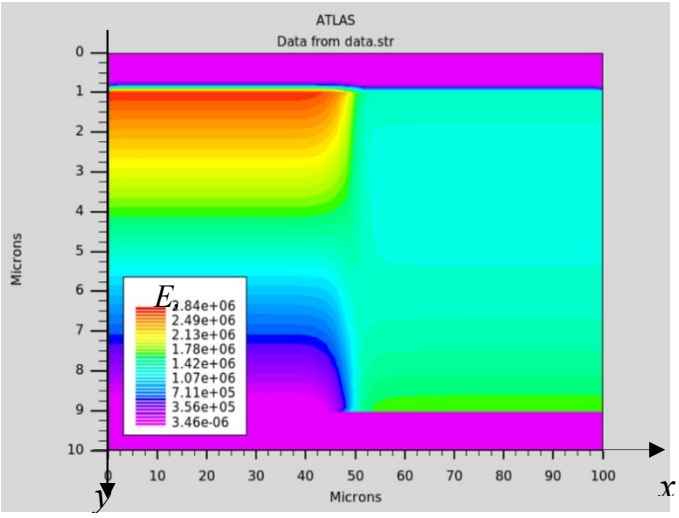


Рис. 29. Двумерное распределение электрического поля *E* [В/см] в p^+-n-n^+–структуре при обратном напряжении 1130 В (*T* = 300 К).

В части *n*-базы при x < 40 мкм распределение электрического поля имеет одномерный характер. Максимальная величина поля (в плоскости p^+-n–перехода) составляет $2.8 \cdot 10^6$ В/см, а толщина области пространственного заряда w_b = 7.8 мкм. В части *n*-базы с координатами x > 50 мкм электрическое поле распределено почти однородно, а его величина вдвое меньше максимального поля в плоскости p^+-n–перехода. Показанная картина распределения поля говорит о том, что лавинный пробой диода с *i*-областью не должен отличаться от пробоя идеализированного одномерного диода.

На рис. 30 показаны две ВАХ, рассчитанные для идеализированного одномерного диода без *i*-области и для модельного двумерного диода с охранной *i*-областью. Напряжение изменялось от нуля до 1130 В (Т = 300 К).

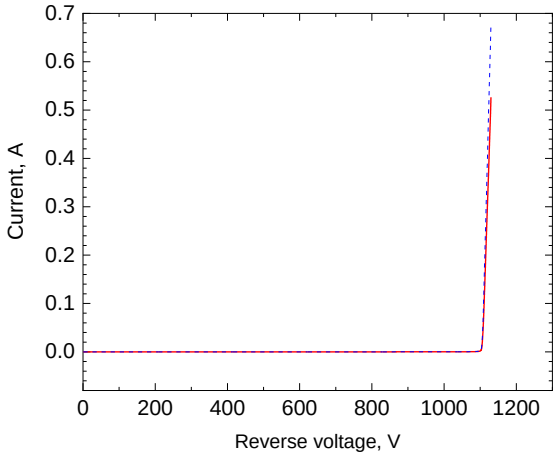


Рис. 30. Расчетные обратные ВАХ идеализированного одномерного диода без *i*-области (пунктирная линия) и модельного диода с *i*-областью (сплошная линия) при изменении напряжения от нуля до 1130 В (Т = 300 К).

Как видно из рисунка, ВАХ практически совпадают. Напряжение лавинного пробоя составляет около 1100 В.

На рис. 31 показано двумерное распределение скорости лавинной генерации носителей в диоде с *i*-областью (V = 1130 В).

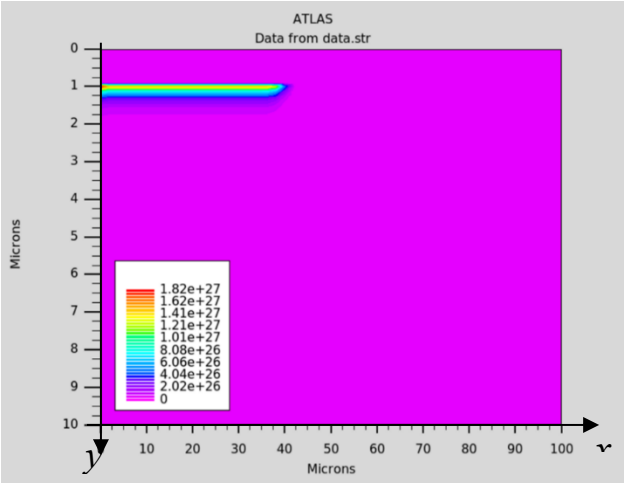


Рис. 31. Двумерное распределение скорости лавинной генерации носителей G [см$^{-3}$с$^{-1}$] в диоде с *i*-областью при V = 1130 В (Т = 300 К).

Как видно, область лавинной генерации полностью локализована в объеме (x < 50 мкм). Таким образом, при комнатной температуре эффективность работы охранной *i*-области, образованной за счет компенсации легирующих доноров в *n*-области глубокими ловушками, близка к 100%.

При повышении температуры эффективность такого метода предотвращения поверхностного пробоя должна постепенно деградировать вследствие теплового выброса захваченных электронов в зону проводимости, поскольку с ростом температуры степень заполнения ловушек электронами должна уменьшаться, а концентрация свободных электронов в охранной *i*-области должна, напротив, увеличиваться. На рис. 32 показаны продольные распределения равновесной концентрации свободных электронов (y = 5 мкм рис. 28) при нескольких температурах в диапазоне от 300 до 1300 К.

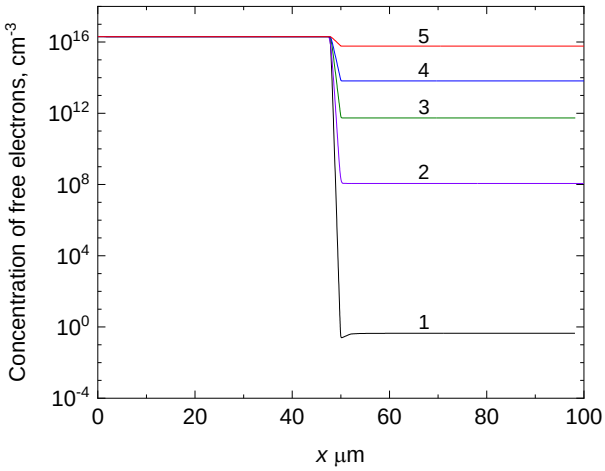


Рис. 32. Продольные распределения концентрации свободных электронов в *n*-базе и полуизолирующей области (y = 5 мкм на рис. 28). Температура [K]: линия 1 – 300, линия 2 – 500, линия 3 – 700, линия 4 – 900, линия 5 – 1300.

С ростом температуры концентрация свободных электронов растет, однако степень компенсации донорной проводимости в полуизолирующей области остается близкой к 100% вплоть до температуры 900 К (при T = 900 K отношение концентраций свободных электронов и легирующих доноров составляет n/N = 0.003). И лишь при температуре свыше 1300 К

концентрация свободных электронов в полуизолирующей части сравнивается с концентрацией доноров в ней.

При наличии внешнего поля степень заполнения ловушек электронами должна уменьшаться с ростом температуры еще быстрее, поскольку свободных электронов в полуизолирующей области нет, а заполнение ловушек регулируется исключительно протекающим генерационным током. При этом следует ожидать, что при повышении температуры пространственное распределение поля будет видоизменяться, стремясь в конечном итоге к распределению поля в рабочей области диода. На рис. 33 показаны продольные распределения поля для y = 1 мкм по рис. 29) при нескольких температурах в диапазоне от 300 до 900 К.

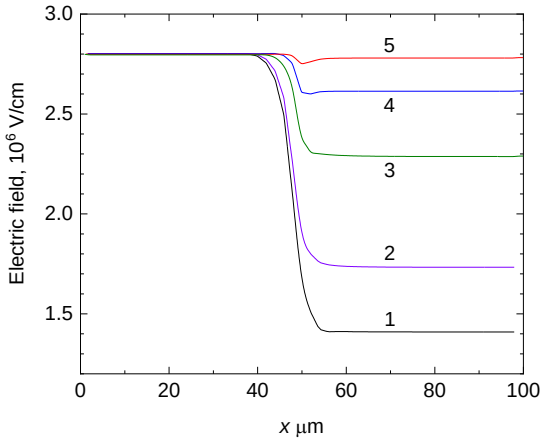


Рис. 33. Продольные распределения электрического поля (*y* = 1 мкм рис. 29). Температура [K]: линия 1 – 300, линия 2 – 500, линия 3 – 600, линия 4 – 700, линия 5 – 900.

Видно, что уже при T = 600 K поле в области x > 50 мкм достигает 80% от величины поля в области *p*-*n*-перехода, а при T = 900 K поля практически выравниваются, так что охранная *i*-область уже полностью теряет свою функциональность.

Проведенное моделирование показало, что краевой полуизолирующий контур может служить эффективной охранной системой в высоковольтных диодах на основе 4H-SiC, в том числе при повышенных температурах (приблизительно до 600 K). Важно отметить несколько моментов,

касающихся реальной структуры диодных чипов, возможностей радиационной технологии формирования *i*-слоев в 4H-SiC и свойств этих слоев.

Выше в данной главе качественно промоделирована структура, половина которой, по сути, представляет собой плоский p^+-i-n^+–конденсатор с *i*-областью в качестве диэлектрика. При x > 55 мкм распределение поля в этом конденсаторе квазиодномерно (см. рис. 28). Картина распределения поля в *i*-области реальной структуры будет принципиально двумерной. При этом, электрическое поле не будет проникать в *i*-область на расстояние больше толщины *n*-базы (по порядку величины). Поэтому по сравнению с промоделированным диодом охранный *i*-контур реальных диодов может быть даже более эффективным (в том числе, при повышенных температурах).

Что касается электрических параметров, компенсирующих радиационные дефекты, вводимые облучением, то пока открытым остается вопрос о надежно измеренных величинах сечений захвата электронов и дырок этими дефектами. (В данном разделе мы приняли их равными 10^{-14} и 10^{-16} см^2, соответственно, ориентируясь на исследования других структурных дефектов в карбиде кремния). Вообще говоря, этот момент весьма важен, поскольку сечения захвата влияют как на степень заполнения уровней дефектов основными носителями, так и на величину генерационных токов утечки, протекающих через *i*-область. Результаты, описанные в этой главе, опубликованы в работе [115].

Глава 3. Создание высоковольтных лавинных диодов с *p-n*-переходом и охранной системой в виде краевой полуизолирущей области

§ 3.1 Технология локального гальванического осаждения металлических столбиков с вертикальными стенками

Как показано в главе 2, краевая охранная система в виде *i*-области может в широком диапазоне рабочих температур обеспечить надежную защиту от поверхностного пробоя.

При изготовлении диодов с краевой охранной *i*-областью необходимо надежно маскировать активную область дискретных приборов от потока ионов. Маскирующие элементы должны иметь вертикальные стенки и быть достаточно толстыми для полного поглощения высокоэнергетичных частиц (например, в металлах глубина проникновения 53 МэВ ионов аргона составляет 5 - 7 мкм). Кроме своего основного предназначения, маскирующие элементы должны иметь хорошие адгезионные характеристики и высокую электропроводность, т.к. являются частью контактной системы диода. Наконец, они должны допускать проведение постимплантационного отжига при температурах до 600 °С.

Локальное гальваническое осаждение через маску из фоторезиста поверх анодного контакта, расположенного над активной областью металлических столбиков с вертикальными стенками (высотой ~ 10 мкм), является наиболее технологичным вариантом формирования маскирующих элементов.

В рамках этой работы была разработана технология формирования маскирующих элементов – металлических столбиков. Одним из рассматриваемых нами материалов для таких столбиков является никель (Ni) Никель является превосходной маской при проведении плазмохимического травления, однако толщина никелевого столбика, необходимая для проведения имплантации на требуемую глубину, составляет ~ 10 мкм. При такой толщине осажденного слоя исключается проведение прямой

литографии в сочетании с мокрым травлением из-за того, что метки совмещения не видны. Поэтому основные усилия были сосредоточены на локальном электрохимическом осаждении Ni через маску фоторезиста.

Данная технология включает в себя:

1) *Предварительную подготовку лицевой поверхности SiC перед напылением коммутирующего подслоя* (*для улучшения адгезии*). Для этого использовалось ионно-лучевое подтравливание поверхности SiC в установке MIMTLA-20 (ускоряющее напряжение 200 В, угол падения ионов 50°) на глубину ~ 10 нм.

2) *Выбор и формирование коммутирующего подслоя*. Коммутирующий слой должен обладать хорошей электропроводностью для дальнейшего электрохимического осаждения Ni и, что особенно важно, хорошей адгезией и к подложке, и к гальванически осажденным слоям. В рамках этой работы были опробованы в качестве коммутирующего слоя Ni, нанесенный методом магнетронного напыления толщиной 200 нм, и двухслойное покрытие Cr(20 нм)/Au(100 нм). Было установлено, что слой никеля не может быть использован в качестве коммутирующего слоя для селективного электрохимического осаждения металлических столбиков высотой ~ 10 мкм, из-за недостаточно хорошей адгезии к омическому контакту и подложкам карбида кремния. Поэтому было выбрано двухслойное покрытие Cr(20 нм)/Au(100 нм). Напыление осуществлялось термическим испарением в вакууме в установке ВУП-5. В данной комбинации Cr служит адгезионным, а Au – высокопроводящим металлом.

Для улучшения адгезии фоторезиста и столбиков металла проводится дополнительное электрохимическое осаждение сплошного слоя золота (40 нм), которое проводилось в режиме импульсного тока, обеспечивающего необходимую структуру осажденного слоя. Причем электрохимическое осаждение адгезионного слоя золота проводится дважды, сначала сплошным

слоем, а затем локально, сразу после создания маски фоторезиста, непосредственно перед осаждением столбиков Ni.

3) *Формирование маски из фоторезиста*. Толщина фоторезиста должна быть больше требуемой толщины столбика для того, чтобы не происходило разрастания металла поверх маски как показано на рис. 34. Таким образом, толщина фоторезиста должна быть не менее 11 - 12 мкм при ожидаемой толщине слоя металла ~ 8 - 10 мкм. При этом, боковая стенка рисунка должна быть строго вертикальной, т.к. осаждаемый столбик Ni в точности повторяет геометрию маски.

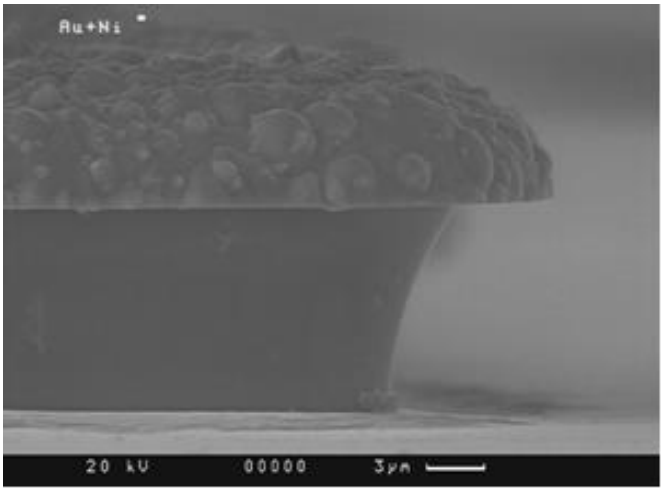


Рис. 34. Электронно-микроскопическое изображение разрастания гальванического Ni при толщине резиста меньшей, чем толщина столбика никеля.

Фоторезист AZ4562 наносился методом центрифугирования. Сначала при скорости вращения 100 об/мин производилось разравнивание резиста, а затем при скорости вращения 2000 об/мин формировался собственно слой фоторезиста. Так как необходимо получить маску толщиной не менее 12 мкм, данную процедуру нанесения фоторезиста проводили дважды. Такой способ нанесения обеспечивает бо́льшую равномерность пленки фоторезиста толщиной ~ 20 мкм. Далее в слое резиста необходимо открыть окна размером 960×960 мкм^2, в которые будет осаждаться Ni. Экспонирование фоторезиста проводили на установке АМК 2104-16 со светодиодным источником с

длиной волны 400 нм. Такой тип осветителя обеспечивает хорошую равномерность засветки, лучшее качество изображения и позволяет получить вертикальные боковые стенки фоторезиста. После экспонирования пластины проявляли в 1% водном растворе KOH.

Поскольку гальванический Ni полностью повторяет геометрию маски фоторезиста, было необходимо подобрать такой режим термообработки, который позволит сохранить боковые стенки вертикальными. Поэтому термообработку маски резиста проводили в специальной установке, в которой задубливание проводится ИК-излучением, а температура контролируется с помощью термопар, расположенных вблизи пластин. При этом, нагрев производится со стороны подложки, что обеспечивает более равномерный нагрев слоя фоторезиста по площади пластины. Температуру плавно поднимали от комнатной до 70 °C в течение 180 минут. При таком способе задубливания не происходит оплывания боковой стенки рисунка

4) *Электрохимическое осаждение никеля*. Электрохимическое осаждение никеля широко используется в промышленности. Сульфаматные электролиты образуют покрытия с минимальным внутренним напряжением, поэтому их применяют в производстве для нанесения относительно толстых слоев никеля. Мы использовали электролит на основе сульфамата никеля следующего состава: сульфамат никеля 300 г/л; хлорид никеля 10 г/л; борная кислота 25 г/л (pH 3,5); лаурил (додецил) сульфата натрия 0,1 г/л. Температура осаждения 50 °C; катодная плотность тока ~ 0.1 мА/мм^2; материал анода – никель; скорость осаждения ~ 0.1 мкм/мин.

В процессе осаждения производилось перемешивание электролита магнитной мешалкой.

5) *Удаление фоторезиста в ацетоне*.

6) *Удаление коммутирующего подслоя ионно-лучевым травлением в вакууме.* Мокрое химическое травление золота в данном случае невозможно, так как Ni разрушается во всех растворах пригодных для травления Au.

Поэтому нами был выбран метод ионно-лучевого травления, которое проводилось в установке MIMTLA-20 (ускоряющее напряжение 500 В, угол падения ионов 5°).

На рис. 35 показано электронно-микроскопическое изображение никелевого столбика, селективно осажденного через фоторезистивную маску.

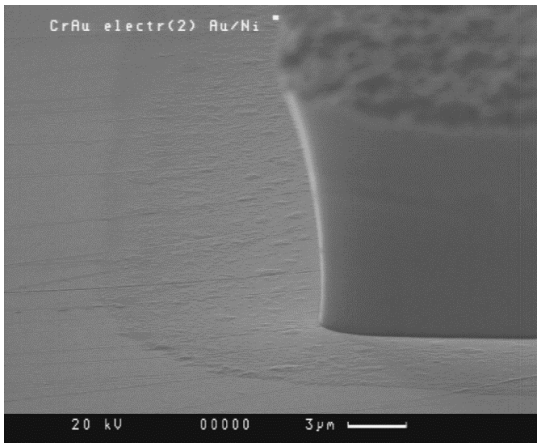


Рис. 35. Электронно-микроскопическое изображение металлического столбика из никеля, выращенного локальным гальваническим осаждением после удаления коммутирующего слоя.

§ 3.2 Технология изготовления диодов

Для изготовления диодов использовалась коммерческая 4H-SiC пластина *n*-типа с выращенной методом CVD-эпитаксии p^+-p-n_o-n^+–структурой. В таблице 2 приведены параметры эпитаксиальных слоев – уровень легирования и толщина.

Таблица 2. Параметры эпитаксиальных слоев.

	Концентрация легирующих примесей (см$^{-3}$)	Толщина (мкм)
p^+	10^{19}	1
p	$8\cdot10^{16}$	2
n_o	$8\cdot10^{15}$	7
n^+	$1\cdot10^{18}$	1

Технология изготовления диодов включала шлифовку тыльной стороны пластины, химическую очистку пластины на разных стадиях технологического процесса, нанесение и термический отжиг металлов, контактную фотолитографию, реактивно-ионное травление меза-структур, резку пластины на чипы и их корпусирование. Последовательность основных технологических операций следующая:

1. *Формирование сплошного катодного омического контакта к шлифованной n^+-подложке*. Контактным металлом служил никель (толщина слоя около 0.3 мкм), нанесенный ионным распылением и отожженный в вакууме при температуре 950 °C в течение 15 минут. Далее ионным распылением поверх вожженного контактного слоя Ni наносился слой серебра толщиной 1 мкм.

2. *Формирование на поверхности p^+-слоя анодных омических контактов*. Анодные контактные площадки размером 960×960 мкм^2 формировались с помощью взрывной фотолитографии. 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 с помощью повторной взрывной фотолитографии.

3. *Формирование охранного контура*. 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 § 3.1). Облучение проводилось ионами Ar^{+8}, ускоренными на Уникальной Научной Установке (УНУ) «Циклотрон ФТИ» до энергии 53 МэВ. Пучок ионов фокусировался в узкую горизонтальную полосу, которая сканировалась по площади мишени для выравнивания дозы облучения. Доза облучения, т.е. полное число внедренных ионов на единицу площади

мишени, определялась по интегральному заряду, приносимому пучком на мишень. После имплантации проводилась термообработка пластины в вакууме при температуре 500 °C в течение 60 минут.

4. *Резка пластин на чипы*. Пластина с дискретными диодными структурами разрезалась алмазным диском на отдельные чипы размером 2×2 мм^2.

5. *Корпусирование чипов*. Изготовленные чипы напаивались в металлостеклянные корпуса с последующим присоединением анодных выводов. Поверхность чипов закрывалась электроизоляционным лаком.

§ 3.3 Экспериментальные результаты.

Вольт-амперные характеристики. Прямые ВАХ изготовленных диодов измерялись с помощью цифрового характериографа Л2-100. Проведен анализ типовой прямой ВАХ, измеренной при токах до 10 А (плотность тока 10^3 А/см^2 при размерах анодного контакта 960×960 мкм^2). Запись проводилась в режиме однократного запуска развертки по напряжению. Было определено, что напряжение открывания диодов составляет около 3 В, а дифференциальное сопротивление в открытом состоянии – около 0.3 Ом.

Обратные ВАХ измерялись с помощью схемы разблокированного индуктивного переключения (более подробно схема описана в § 6.2) (UIS, Unclamped Inductive Switching). Через изготовленные диоды пропускалась серия одиночных импульсов лавинного тока; амплитуда тока поднималась ступенями приблизительно по 0.5 А. Сразу отметим, что диоды выдерживали без деградации импульсы тока амплитудой более 10 А и длительностью 4 мкс. На каждом шаге двухканальным цифровым осциллографом записывались временные диаграммы напряжения на диоде и тока через него. На рис. 36 показаны осциллограммы, записанные для одного из диодов при трех амплитудах тока: 4 А (линии 1 и 1'), 7.5 А (линии 2 и 2') и 13.5 А (линии 3 и 3').

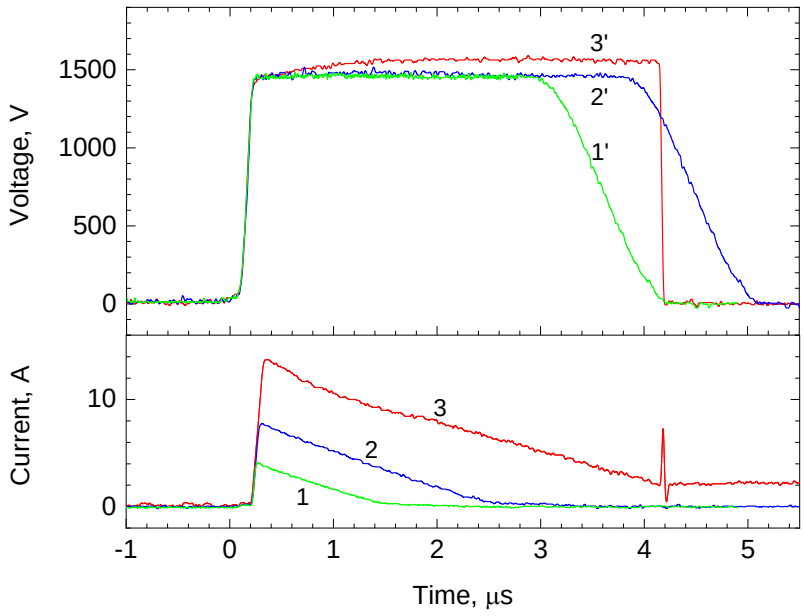


Рис. 36. Осциллограммы тока (кривые 1 - 3) и напряжения (кривые 1' - 3'), измеренные в схеме UIS.

По пиковым значениям тока и соответствующим им значениям напряжения строилась обратная ВАХ (рис. 37). Как видно из Рис. 36, в диоде имеет место резкий деструктивный пробой при напряжении 1460 В (кривые 3 и 3').

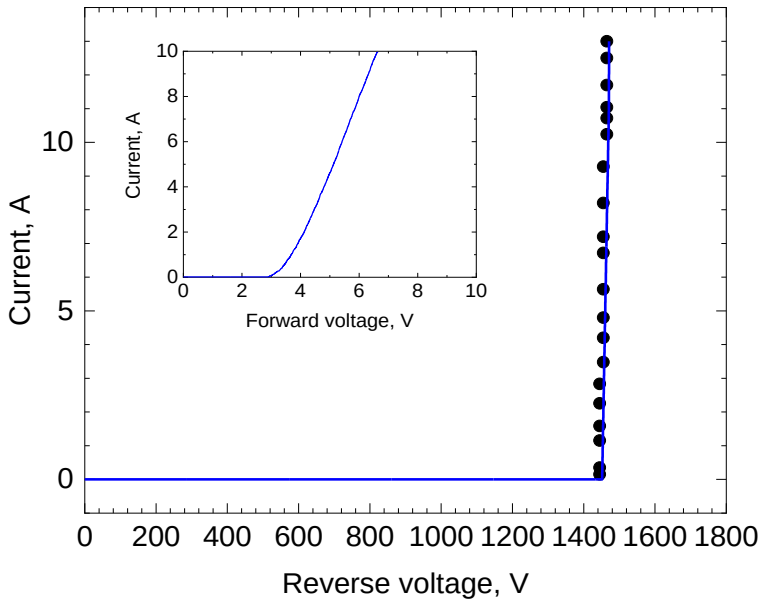


Рис. 37. Измеренная импульсная обратная ВАХ p^+-p-n_o-n^+–диода (точки) и рассчитанная обратная ВАХ идеализированного одномерного диода (сплошная линия). На вставке показана прямая ВАХ.

Для оценки эффективности работы охранного контура проводился расчет обратной ВАХ идеализированного одномерного диода с теми же параметрами структуры, что и у реальных диодов. Как видно из рис. 37, экспериментальная и рассчитанная ВАХ практически идентичны: в режиме пробоя дифференциальное (лавинное) сопротивление диода составляет около 3 Ом (0.03 Ом·см^2 при размерах контакта 960×960 мкм^2). Такая малая величина сопротивления свидетельствует о том, что лавинный пробой однороден по площади. В § 1.1 было выведено аналитическое выражение для расчета лавинного сопротивления диода с "проколом" *n*-базы:

$$R_{aval} = d^2/2\varepsilon vS \tag{13}$$

В диоде с "проколом" *n*-базы лавинное сопротивление задается толщиной базы d, площадью S и насыщенной скоростью дрейфа электронов v. При R_{aval} = 3 Ом, d = 7 мкм и S = 0.01 см^2 рассчитанная по формуле (13) насыщенная скорость дрейфа электронов v = 9·10^6 см/с.

Выше было отмечено, что диоды безотказно выдерживали одиночные импульсы тока амплитудой ~ 10 А (пиковая мощность ~ 15 кВт). Очевидно, что при дальнейшем увеличении тока в конце концов должен происходить отказ вследствие вторичного теплового пробоя. На рис. 36 продемонстрирован деструктивный тепловой пробой при пропускании импульса тока амплитудой 13.5 А. В момент времени, близком к окончанию импульса, наблюдается резкий всплеск тока при уменьшении напряжения до нуля лавинная энергия (E_{max}), которая рассеивается диодом до того, как происходит отказ, рассчитывается следующим образом:

$$E_{max} = \int_0^{t*} IUdt, \tag{14}$$

где *t** – момент времени, при котором происходит отказ. В нашем случае E_{max} ≃ 50 мДж (5 Дж/см^2). Измеренная величина E_{max} оказалась сравнимой с лучшими опубликованными ранее результатами [116].

Представление о физической причине отказа можно получить, определяя локальную температуру, до которой разогревается структура диода при отказе. Температурный перегрев можно оценить двумя способами.

Расчет теплофизического процесса. Расчет проводился при следующих упрощающих допущениях:

1) электрическая мощность, рассеиваемая диодом в режиме лавинного пробоя, равномерно выделяется в области пространственного заряда обратносмещенного p-n_o–перехода,

2) поверхность 4H-SiC кристалла теплоизолирована (отдачи тепла с поверхности нет). Это предположение хорошо выполняется в случае малой длительности импульса перенапряжения.

Характерная длина тепловой диффузии L_T, на которую тепло распространяется за время прохождения лавинного импульса длительностью Δt, оценивается как

$$L_T = \sqrt{\frac{K}{\rho C}\Delta t}\,, \tag{15}$$

где K, C и ρ – средние величины теплопроводности, теплоемкости и удельного веса 4H-SiC, соответственно. Величина температурного перегрева ΔT рассчитывается как

$$\Delta T = \frac{E_{max}}{C\rho(d+L_T)S}\,, \tag{16}$$

где d и S – толщина области пространственного заряда и площадь анода. При расчетах теплофизические параметры 4H-SiC – зависимости коэффициента теплопроводности (C) и теплоемкости (K) 4H-SiC от температуры – были взяты из работы [117]:

$$C(T) = 0.48 + 0.023\exp\left(\frac{T}{262}\right)\ \text{Дж/г}\cdot\text{град} \tag{17}$$

$$K(T) = 2.67\times 10^3\cdot T^{-1.26}\ \text{Вт/см}\cdot\text{град} \tag{18}$$

Ради простоты расчет по формулам (13) – (15) был выполнен с подстановкой коэффициентов для T = 300 K и дал величину перегрева ΔT = 870 K при длительности импульса Δt = 4 мкс.

Расчет из температурной зависимости напряжения пробоя. Во время импульсных UIS-испытаний прямое измерение локальной температуры невозможно, однако возможно косвенное ее определение. Известно, что лавинный пробой в 4H-SiC диодах имеет положительный температурный коэффициент. Действительно, в нашем случае индикатором локального джоулева разогрева было увеличение напряжения пробоя с 1460 В в начале импульса до 1577 В в максимуме (см. кривую 3' на рис. 36). Мы полагаем, что наиболее достоверное значение относительного температурного коэффициента напряжения пробоя составляет $K_U = 9 \cdot 10^{-5}$ K^{-1} [116]. Если принять это значение, то в нашем случае локальный температурный перегрев оценивается величиной 850 K, что практически совпадает со значением, полученным из расчета теплофизического процесса.

Оцененная локальная температура при отказе (1150 K) сравнима с температурой, при которой наступает фундаментальное ограничение на работоспособность диода. Критической является температура, при которой концентрация собственных носителей становится сравнимой с концентрацией легирующих примесей в базовых областях диода. В 4H-SiC, имеющем ширину запрещенной зоны 3.24 эВ, концентрация собственных носителей при комнатной температуре чрезвычайно мала, порядка 10^{-8} $см^{-3}$. Уровень легирования блокирующей базы составляет $8 \cdot 10^{15}$ $см^{-3}$. Концентрация собственных носителей достигает ~ 10^{15} $см^{-3}$ при нагреве до температуры около 1250 K (рис. 38).

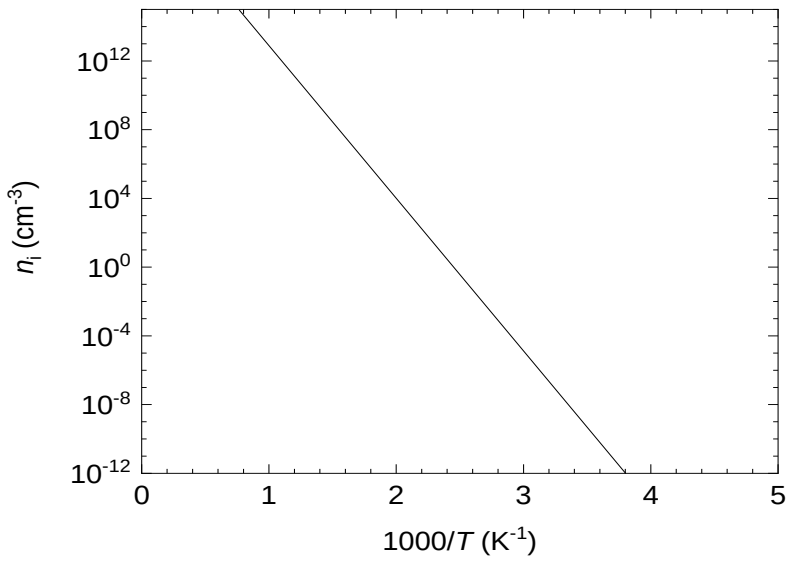


Рис. 38. Температурная зависимость концентрации собственных носителей в 4H-SiC.

Как мы полагаем, в изготовленных в настоящей работе 4H-SiC диодах реализуется именно такое фундаментальное ограничение на величину максимальной рассеиваемой энергии лавинного импульса.

Таким образом, можно утверждать, что созданный в рамках разработанной технологии охранный контур в 4H-SiC p^+-p-n_o-n^+–диодах в виде полуизолирующей i-области ~ 10 мкм кардинально увеличивает напряжение лавинного пробоя. Измеренные обратные вольт-амперные характеристики созданных в рамках такой технологии диодов демонстрируют напряжение пробоя, с высокой точностью совпадающее с теоретическим значением. Измеренные прямые вольт-амперные характеристики диодов также характеризуются параметрами, близкими к предельным теоретическим значениям. Результаты, полученные в данной главе, представлены в работе [118].

Глава 4. Высоковольтные 4H-SiC диоды Шоттки с полевой обкладкой

Для планарных 4H-SiC диодов Шоттки (ДШ) предложено множество конструктивно-технологических решений проблемы предотвращения краевого пробоя, включая создание краевой полуизолирущей области (глава

3), системы охранных колец, мезаструктуры, полевой обкладки, а также комбинации этих технологий (см. соответствующие ссылки в работе [119]). В настоящей главе для повышения предельного рабочего напряжения высоковольтных 4H-SiC диодов Шоттки до значения 2000 В использована комбинация краевой полуизолирущей *i*-области с эффективной полевой обкладкой. Детальный анализ и методика численного расчета полевой обкладки содержатся в работе [119].

Полевая обкладка позволяет «вынести» точку максимальной напряженности электрического поля за пределы рабочей области прибора, в область краевой полуизолирущей *i*-области (рис. 39).

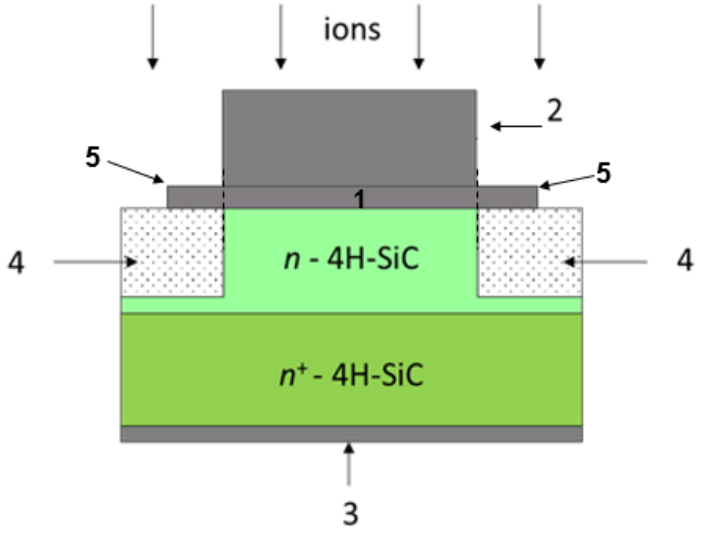


Рис. 39. Конструкция 4H-SiC ДШ с полевой обкладкой и полуизолирующим слоем, созданным с помощью облучения ионами аргона: 1 – контакт Шоттки, 2 – Ni маска для защиты активных областей структур, 3 – омический контакт, 4 – *i*-4H-SiC, 5 – полевая обкладка.

На рис. 40 показана диаграмма, позволяющая в рамках идеализированной одномерной модели пробоя (см. §1.1) оценить толщину блокирующей n-базы и напряжение пробоя высоковольтных 4H-SiC ДШ.

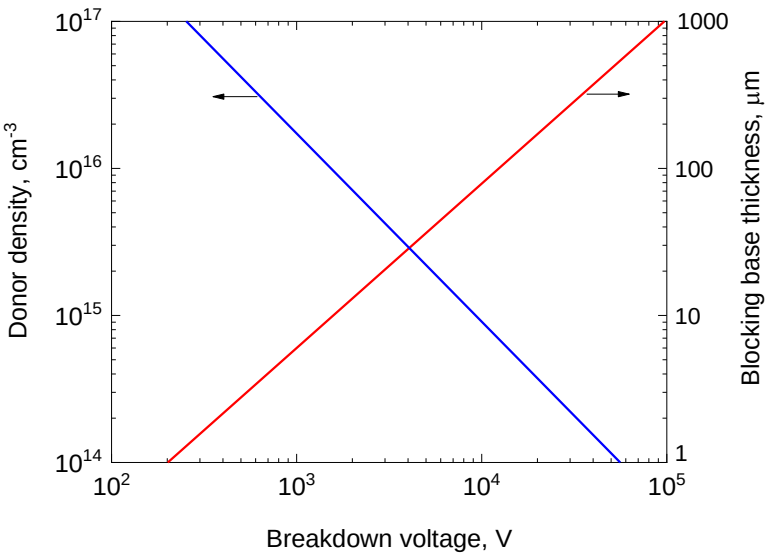


Рис. 40. Зависимости оптимального уровня легирования и толщины *n*-базы 4H-SiC ДШ от напряжения пробоя, рассчитанные с использованием усредненного значения критического поля пробоя $E_B = 4 \cdot 10^6$ В/см.

Как видно из рис. 40, толщина блокирующей базы для ДШ с напряжением пробоя 1000 - 3000 В составляет 6 - 20 мкм.

§ 4.1 Технология изготовления диодов

Для изготовления диодов была использована коммерческая эпитаксиальная n-n^+(подложка)–структура (уровень легирования и толщина n-слоя $2 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$ и 20 мкм, соответственно). Для подавления краевого пробоя на периферии активной области диодов формировалась полуизолирующая i-область толщиной ~ 9 мкм, а контакт Шоттки был вынесен за пределы активной области структуры на 100 мкм (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 (подробно технология описана в § 3.1). Измерены вольт-амперные

характеристики (ВАХ) изготовленных диодов. Измеренные характеристики сравнивались с характеристиками контрольных диодов без имплантации.

1) *Термическое окисление поверхности пластины* происходило в потоке сухого кислорода при температуре 1150 °C в течение 9 часов (толщина слоя окисла на лицевой Si-стороне 60 нм). Экспериментально установлено, что термическое окисление с последующим травлением окисла в буферном травителе и с дополнительным травлением ионным пучком с углом наклона 50 градусов к вертикальной оси на глубину 50 нм, является оптимальной обработкой поверхности 4H-SiC перед термическим нанесением барьера Шоттки [120].

2) *Формирование катодного омического контакта к подложке* включала

– шлифовку обратной стороны пластины алмазной пастой с размером зерна 3 - 5 мкм;

– нанесение никеля на обратную сторону пластины ионным распылением никелевой мишени (толщина слоя Ni около 300 нм);

– термический отжиг никеля в вакууме при температуре 950 °C в течение 15 минут.

3) *Формирование анодных барьерных контактов с помощью "взрывной" фотолитографии* включало

– нанесение фоторезиста и формирование в слое фоторезиста окон размером 1160×1160 мкм^2;

– химическое травление окисла в окнах (в буферном травителе);

– ионно-лучевое подтравливание поверхности 4H-SiC в окнах с помощью ионной (Ar^+) пушки на глубину ~ 50 нм, угол наклона к вертикальной оси 50 градусов.

– нанесение молибдена на лицевую сторону пластины с фоторезистом электронно-лучевым напылением в высоком вакууме (толщина слоя Mo около 250 нм);

– удаление фоторезиста с напыленным на него Mo-слоем в органических растворителях;

– отжиг барьерных Mo-контактов в вакууме при температуре 600 °C в течение 2 минут.

4) *Формирование металлической маски для облучения.* Данная операция детально описана в § 3.1. Толщина металлических столбиков должна быть не менее 8 - 10 мкм в высоту с основанием 960×960 мкм^2.

5) *Облучение и термообработка*. Облучение проводилось восьмизарядными ионами Ar^{+8}, ускоренными на УНУ "Циклотрон ФТИ" до энергии 53 МэВ. Пучок ионов фокусировался в узкую горизонтальную полосу, которая сканировалась по площади мишени для выравнивания дозы облучения. Доза облучения – полное число внедренных ионов на единицу площади мишени – определялась по интегральному заряду, приносимому пучком на мишень. После облучения проводилась термообработка пластины в вакууме при температуре 500 °C в течение 60 минут. Это необходимо, так как электрические характеристики полуизолирующих слоев *i*-SiC, не подвергнутых дополнительной термической обработке после облучения, проявляли некоторую нестабильность, которая исчезает после термообработки (уже при 400 °C), однако именно при 600 °C слои *i*-SiC становятся наиболее высокоомными (их удельное сопротивление при комнатной температуре составляет не менее $1.6 \cdot 10^{13}$ Ом·см) [121].

§ 4.2 Экспериментальные результаты

Для качественных измерений ВАХ использовался лабораторный высоковольтный (до 4000 В) характериограф. На время измерений пластина погружалась во фторуглеродную 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. 41 показаны типичные прямые ВАХ необлученных и облученных диодов, измеренные при малых токах.

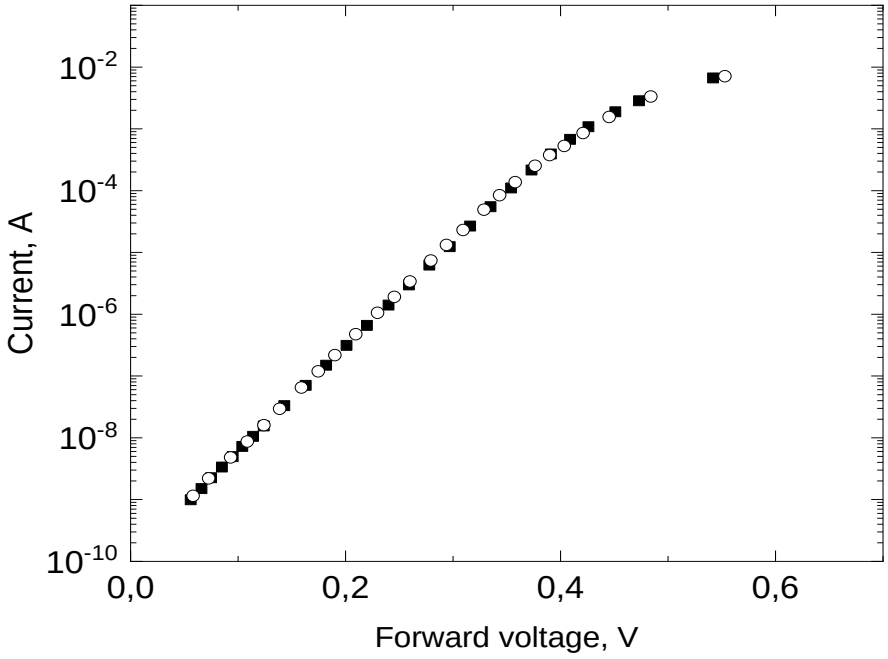


Рис. 41. Типичные прямые ВАХ необлученных (кружки) и облученных (квадраты) диодов.

Как видно, прямые ВАХ после облучения практически не изменяются, что свидетельствует о том, что активная область диодов была надежно защищена от облучения. На рис. 42 показаны обратные ВАХ необлученных и облученных диодов, сфотографированные с экрана высоковольтного характериографа.

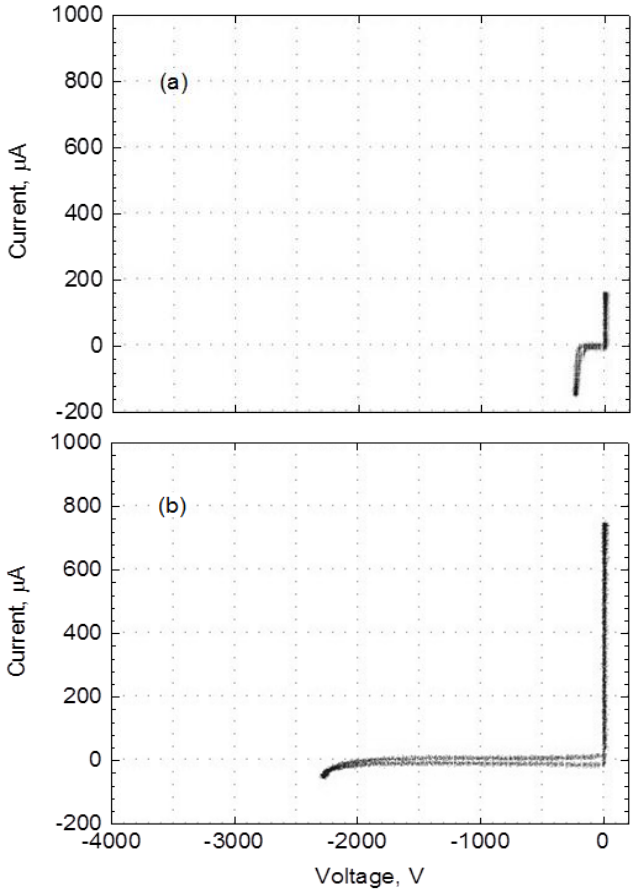


Рис. 42. Типичные обратные ВАХ необлученных (a) и облученных (b) диодов, сфотографированные с экрана высоковольтного характериографа.

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

Анализ ВАХ облученных диодов. Классическая диодная теория (теория термоэлектронной эмиссии) предсказывает для диодов Шоттки следующую зависимость тока I от напряжения V [11]:

$$I = SA^{*}T^{2}\exp(-\frac{\Phi_{Bo}}{kT})[\exp(\frac{qV}{kT})-1], \qquad (19)$$

где q – элементарный заряд, A* – константа Ричардсона, S – площадь Шоттки контакта, Φ_{Bo} – высота барьера (в классической теории она считается неизменной), V – приложенное напряжение (положительное для прямого направления и отрицательное для обратного), T – абсолютная температура, k

– константа Больцмана. ВАХ реальных диодов Шоттки обычно отличаются от ВАХ идеализированных диодов. В прямом направлении эти отличия, как правило, не столь значительны, так что прямые ВАХ можно описать эмпирической формулой

$$I_f = I_o[\exp(\frac{qV_f}{nkT}) - 1], \qquad (20)$$

которая отличается от выражения (19) тем, что в ней фигурируют эмпирические величины – ток "насыщения" I_o и коэффициент идеальности n. По величине коэффициента n принято судить о качестве диодов Шоттки. Считается, что для хороших ДШ коэффициент идеальности должен быть меньше 1.1.

На рис. 43 точками показаны типичные прямые ВАХ изготовленных 4H-SiC ДШ, измеренные при разных температурах в диапазоне 295 - 380 К.

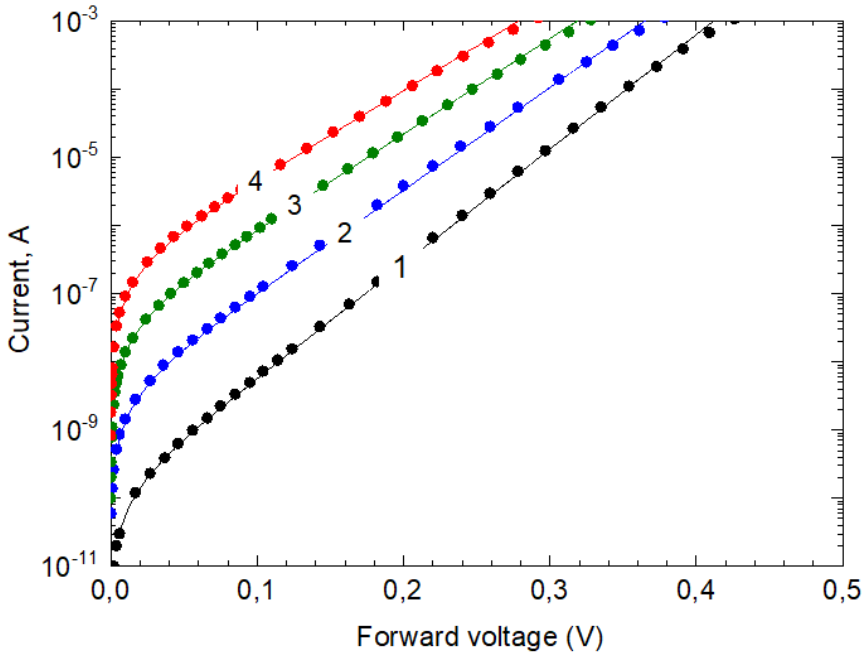


Рис. 43. Типичные прямые ВАХ изготовленных ДШ с Mo-барьерами Шоттки при разных температурах: линия 1 – 295 К, линия 2 – 328 К, линия 3 – 353 К, линия 4 – 380 К. Точки – эксперимент, сплошные линии – аппроксимации по формуле (20).

На участке, предшествующем ограничению тока последовательным сопротивлением блокирующей *n*-базы диода, измеренные ВАХ были аппроксимированы по формуле (20) (в этом случае I_o и n выступали в качестве подгоночных параметров). При всех температурах коэффициент идеальности лишь немногим отличался от единицы: $n \approx 1.02$.

Классическая формула (19) предсказывает, что обратный ток в диодах Шоттки должен насыщаться при напряжениях, составляющих около нескольких единиц kT/q:

$$I_o = SA^*T^2 \exp(-\frac{\Phi_{Bo}}{kT}) \qquad (21)$$

На практике этого почти никогда не случается, и всегда имеет место довольно значительное увеличение тока с ростом обратного смещения. Утечки могут быть обусловлены дефектами, неоднородностями распределения высоты барьера по площади контакта, конструктивными особенностями диодов, приводящими к преждевременному краевому пробою, и др. Но даже в контактах с совершенной структурой обратный ток может расти вследствие зависимости высоты барьера от напряжения смещения.

На рис. 44 точками показаны типичные обратные ВАХ изготовленных диодов, измеренные при напряжениях до 1000 В в диапазоне температур 295 - 380 К.

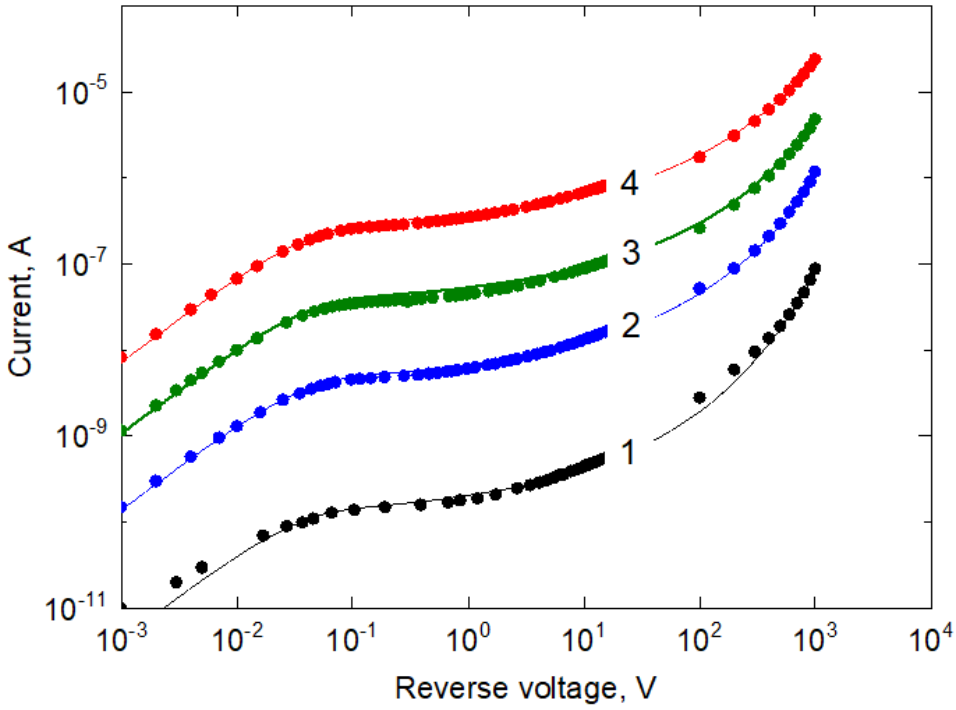


Рис. 44. Типичные обратные ВАХ Mo-барьеров Шоттки при разных температурах: линия 1 – 295 К, линия 2 – 328 К, линия 3 – 353 К, линия 4 – 380 К. Точки – эксперимент, сплошные линии – аппроксимации.

В двойном логарифмическом масштабе измеренные ВАХ выглядят как "мягко" нарастающие зависимости тока от напряжения: при увеличении напряжения от 0.1 до 1000 В обратный ток возрастает по меньшей мере на три порядка величины. Наиболее вероятный механизм, ответственный за наблюдаемый рост обратного тока, – это зависимость высоты барьера от напряжения смещения. В классической диодной теории высота барьера считается неизменной, однако существуют по меньшей мере две причины понижения высоты барьера с ростом обратного напряжения. Первая причина – это влияние сил изображения на форму и высоту потенциального барьера (эффект Шоттки [11]). Вторая причина – это наличие между металлом и полупроводником тонкого промежуточного диэлектрического слоя, на котором есть небольшое падение напряжения, уменьшающее высоту барьера [122].

Оценки, проделанные в работе [123], показывают, что ВАХ облученных 4H-SiC ДШ как в прямом, так и в обратном направлении хорошо описываются по модели термоэлектронной эмиссии, если дополнительно учитывается понижение высоты барьера с ростом изгиба зон в полупроводнике. Тем не менее, для получения экстремально высоковольтных диодов Шоттки с полевой обкладкой все-таки необходимо дополнительно формировать наиболее эффективные охранные системы, например, JBS-структуры [124].

В данной главе показано, что охранная система в виде комбинации краевого полуизолирующего контура, созданного облучением высокоэнергетичными (53 МэВ) ионами аргона, и эффективной полевой обкладки позволяет создать высоковольтные (блокирующее напряжение ~ 2 кВ) 4H-SiC диоды Шоттки с близким к теоретическому пределу коэффициентом идеальности – $n \approx 1.02$.

Глава 5. Микропрофилирование 4H-SiC структур сухим травлением

В настоящей главе описывается разработанная нами технология микропрофилирования 4H-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.

Карбид кремния политипа 4H (4H-SiC) намного превосходит кремний по электрической прочности, предельной скорости дрейфа носителей заряда, теплопроводности, радиационной устойчивости, химической инертности. Поэтому 4H-SiC по праву считается перспективным материалом для высоковольтной, высокотемпературной, радиационно-стойкой полупроводниковой электроники нового поколения [35]. Однако, чтобы получить высокоэффективный прибор, необходимы не только качественный

теоретический расчет, но также разработка современных технологических решений, позволяющих на практике реализовать изделие.

С технологической точки зрения карбид кремния является исключительно сложным материалом. Серьезные трудности возникают при необходимости формирования непланарных микроструктур с помощью селективного травления. Хорошо известна химическая инертность SiC: при температурах до 300 – 400 °C он практически не взаимодействует ни с одним из известных для других полупроводниковых материалов химических травителей. Практически единственный доступный способ химического травления — в расплавах щелочей при 450 – 600 °C — имеет ряд недостатков, которые существенно ограничивают его применение в приборной технологии. Другим известным методом травления, который пытаются применять в технологии SiC является газовое (хлорное) химическое травление. Оно осуществляется при температуре 1000 – 1500 °C [35]. Несмотря на ряд достоинств, в том числе образование гладких, наклонных стенок, строго ориентированных вдоль направления $(0\bar{3}3\bar{8})$, с наименьшей плотностью состояний, этот способ также непригоден в приборной технологии из-за высоких температур процесса.

Необходимы такие процессы травления, которые сочетали бы в себе низкую температуру, высокую чистоту обработки, требуемую селективность по отношению к разным маскирующим материалам, высокую разрешающую способность.

В свое время прорыв в этом направлении был обеспечен тем, что для SiC был разработан метод сухого травления в плазме фторсодержащих молекулярных газов, таких как CF_4, SF_6 и др. [125, 126]. Травление SiC во фторсодержащих газах происходит по механизму реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ), который сочетает в себе химические реакции и прямое физическое распыление [127]. Атомы Si удаляются с поверхности за счет химической реакции ионов F^+ с SiC и образования

летучих молекул SiF_4, а атомы C – за счет их преимущественного физического распыления ионами F^+.

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы разработать технологию микропрофилирования 4H-SiC методами сухого травления, оценить сравнительные преимущества и недостатки такой технологии травления и представить результаты на примере 4H-SiC-полевого транзистора Шоттки (ПТШ).

Другой важной целью было подобрать такую технологию травления, которая может обеспечить наклонные боковые стенки протравленных структур при формировании ПТШ с мезаконструкцией на эпитаксиальных слоях на основе 4H-SiC. Это необходимо, так как основным способом нанесения фоторезиста для создания маски при групповой технологии изготовления приборов является метод центрифугирования. При центрифугировании вертикальная ступенька высотой превышающей ~ 1 мкм вызывает неоднородность нанесения фоторезиста или даже обрыв маски на краях мезаконструкций. Кроме того, на вертикальной стенке, особенно, при глубине рельефа более 0.5 мкм, происходит неравномерное нанесение металлов и диэлектриков методами термического или магнетронного распыления.

На момент начала работы, способы формирования ступенек с наклонными стенками с помощью РИПТ карбида кремния для изготовления приборов практически не были представлены в литературе.

§ 5.1 Структура полевого транзистора с затвором Шоттки на основе 4H-SiC

На рис. 45 показана типовая мезаконструкция эпитаксиального ПТШ.

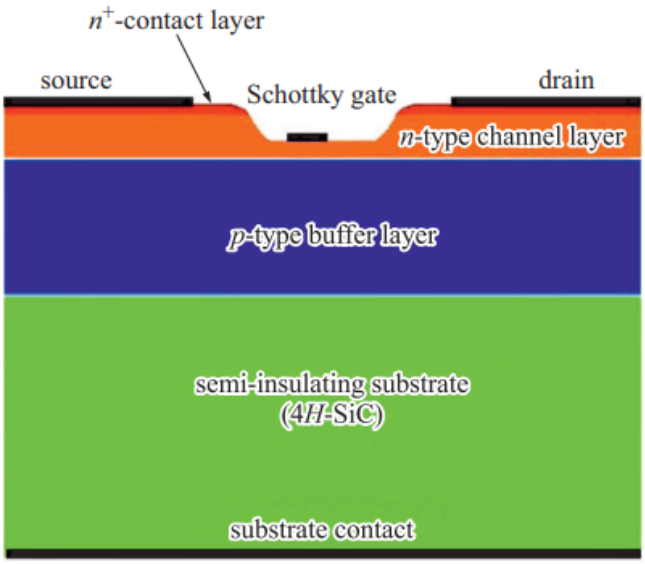


Рис. 45. Схематический поперечный разрез ПТШ на основе 4H-SiC.

Структура состоит из полуизолирующей 4H-SiC подложки с удельным сопротивлением ~ 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. Стенки протравленных структур делают наклонными (с углом как более, так и менее 45° от вертикали), для того чтобы фотолитографическими методами вывести на полуизолятор металлические контактные площадки электродов истока, стока и затвора. Для этого использовался метод ионно-лучевого травления.

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. Глубина травления канала контролировалась с использованием специальных тестовых структур, на которые методом взрывной фотолитографии был напылён слой

никеля. После травления канала, никель химически стравливался с поверхности.

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 из титана и никеля. Напыление проводилось на установке высоковакуумного напыления UMS 500 производства Balzers. Суммарная толщина напыленного контакта составляла ~ 120 нм. Окисел локально вытравливался в буферном травителе непосредственно перед напылением после формирования рисунка маски фоторезиста. Омический контакт вжигался при температуре 950 °C в вакууме (~ $5 \cdot 10^{-6}$ атм.).

5) *Формирование на дне канавки металлического затвора Шоттки,* управляющего проводимостью канала. Для этого также использовался метод взрывной фотолитографии, с помощью которого сначала создавалась маска из фоторезиста определенной конфигурации. Термический окисел вытравливался в буферном травителе, затем электронно-лучевым напылением в высоком вакууме (~ 10^{-8} - 10^{-9} атм.) на установке UMS 500 напылялся слой молибдена (Mo) толщиной около 250 нм. После удаления фоторезиста барьер вжигался в вакууме (~ $5 \cdot 10^{-6}$ атм.) при температуре 600 °C в течение 2 минут.

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

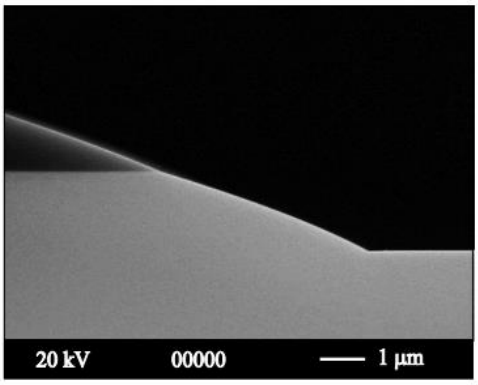
позволяет получить грибковую форму профиля маски и упрощает процесс взрыва толстых металлов.

Для реализации этой технологии нами были использованы методы ионно-лучевого травления (ИЛТ) и реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ). ИЛТ происходит по механизму прямого физического распыления ионами инертного газа, например, Ar. Эксперименты по РИПТ проводились в установке с индуктивно-связанной плазмой, в которой активным реагентом является смесь гексафторида серы и кислорода. Травление происходит за счет направленного потока ионов и включает в себя одновременно и физическое распыление, и ионно-стимулированные реакции.

§ 5.2 Травление мезаструктур до полуизолирующей подложки методом ионно-лучевого травления

Для получения мезаструктур с наклонными стенками были проведены эксперименты по ИЛТ пучком ионов аргона с использованием фоторезиста в качестве маски. Травление данным методом происходит по механизму прямого физического распыления. Селективность этого процесса по отношению к маскирующим материалам обычно невысока, и это обстоятельство позволяет, используя маску из фоторезиста, формировать при травлении наклонные стенки. 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. 46.

Как видно, стенки мезы гладкие, а их наклон > 45° от вертикали. Глубина травления составляет ~ 1.7 мкм.



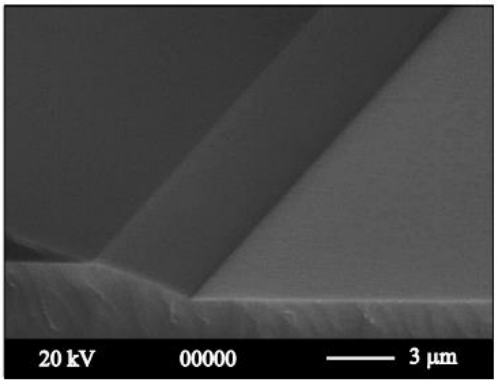


Рис. 46. Электронно-микроскопическое изображение профилей ионно-лучевого травления мезаструктур через маску фоторезиста.

§ 5.3 Травление канала методом реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ)

Травление SiC методом РИПТ имеет характерные особенности, которые необходимо учитывать в технологии формирования приборов на основе 4H-SiC. При селективном травлении разных материалов методом РИПТ (в том числе карбида кремния), мощный поток ионов поступает на основание ступеньки 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 [128]. Еще одна особенность такого процесса заключается в том, что стенка протравливаемой ступеньки при травлении через металлическую маску получается строго вертикальной. Вертикальная стенка SiC покрывается монослоем графита и, поскольку она не подвергается ионной бомбардировке, блокирует латеральное травление; именно этим объясняется высокая анизотропия, достигаемая при травлении SiC методом РИПТ.

Для целей прецизионного травления, образование подобных канавок недопустимо, поскольку толщина канала 4H-SiC полевого транзистора

обычно составляет 0.2 - 0.3 мкм [129], в то время как глубина канавок у истокового и стокового выступов может достигать единиц микрон.

Была проведена серия экспериментов по РИПТ 4H-SiC в установке с индуктивно-связанной плазмой, в которой активным реагентом является смесь гексафторида серы и кислорода. Далее приведены результаты двух наиболее характерных экспериментов по травлению. Травление проводилось с использованием маскирующего материала – пленки никеля толщиной 300 нм.

В первом эксперименте были выбраны следующие параметры РИПТ: давление газа – 0.2 Па, соотношение потоков SF_6/O_2 – 3, мощность генератора – 7 кВт. При указанных параметрах процесса была достигнута скорость травления ~ 2.2 мкм/ч при селективности травления по отношению к никелю приблизительно 1 : 80. На рис. 47(a) приведено изображение протравленной мезаструктуры высотой ~ 7 мкм, полученное с помощью растрового электронного микроскопа CamScan. Следует отметить достаточно высокое качество обработанной поверхности карбида кремния – чистоту и отсутствие микрорельефа. При этом профиль травления, близок к вертикальному. Однако у основания стенки мезаструктуры образуется треугольная по форме канавка, имеющая ширину и глубину ~ 1.5 мкм.

Во втором эксперименте мы увеличили давление газа и соотношение потоков газов SF_6/O_2. При этом мощность генератора осталась неизменной, а скорость травления была сопоставима с достигнутой в первом эксперименте. Были выбраны следующие параметры процесса травления: давление газа – 3 Па, соотношение потоков SF_6/O_2 – 30, мощность генератора – 7 кВт. При указанных параметрах процесса скорость травления составила ~ 2.3 мкм/ч. На рис. 47(b) приведено изображение протравленной мезаструктуры высотой ~ 2 мкм. Видно, что в отличие от эксперимента 1 канавка у основания ступеньки не образуется, однако имеется явно выраженный подтрав под маску, что говорит об относительно невысокой анизотропии процесса. Все это свидетельствует в пользу того, что процесс смещается по своему

характеру к механизму плазмохимического травления (ПХТ). При ПХТ поверхность обрабатываемого материала подвергается воздействию всех видов частиц, образующихся в плазме. Вклад этих частиц в процесс травления различен: химически активные частицы реагируют с атомами стравливаемого материала и удаляют поверхностные слои путем образования летучих продуктов реакций. При этом электроны и ионы в плазме активируют эту реакцию, увеличивая скорость травления.

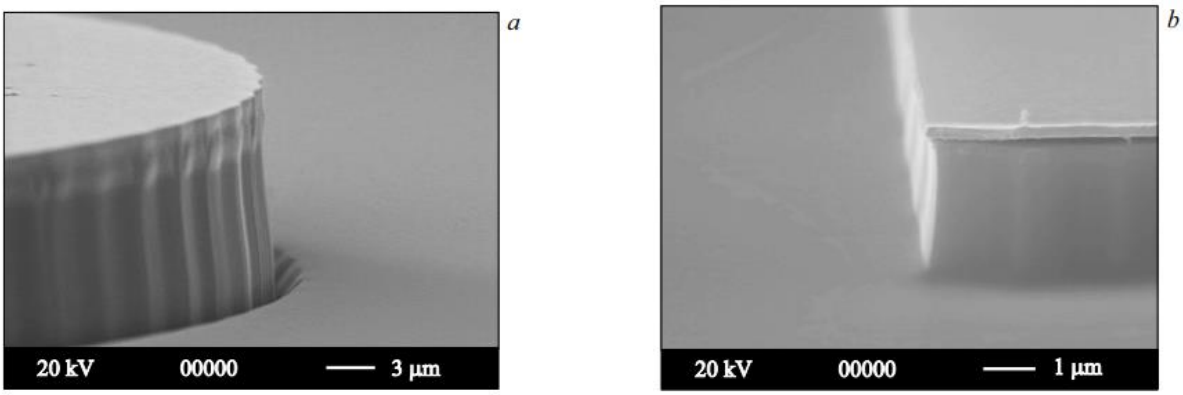


Рис. 47. Электронно-микроскопическое изображение края мезаструктуры, протравленной методом РИПТ через маску никеля: a — эксперимент 1, b — эксперимент 2.

Если в качестве маски использовать фоторезист, то в разработанных режимах травления РИПТ 4H-SiC в смеси гексафторида серы и кислорода можно получить гладкие наклонные стенки вытравленного рельефа (рис. 48) за счет того, что селективность по отношению к фоторезисту существенно меньше, чем селективность по отношению к никелевой маске. В этом случае наклон стенки будет зависеть от толщины фоторезиста.

Для создания такой маски были исследованы фоторезисты разной толщины, а также разные способы их термообработки. Наилучший результат был достигнут при использовании маски из толстого фоторезиста. В отличие от металлической маски (рис. 47, a), стенки получаются гладкими, их наклон $< 45°$ от вертикали. Глубина травления составляет ~ 0.6 мкм.

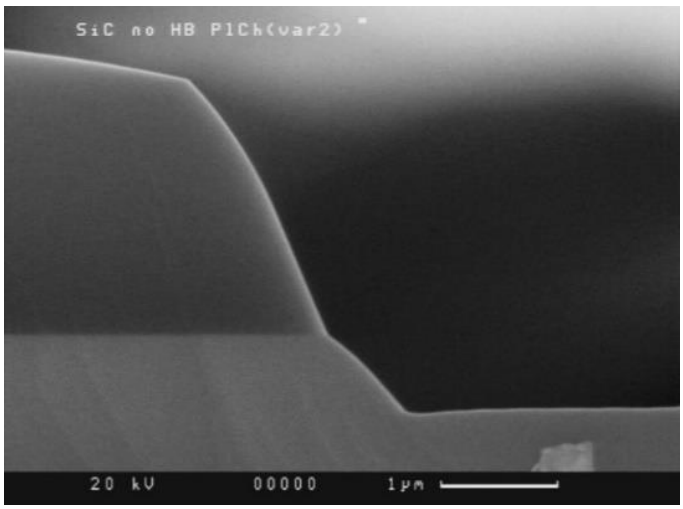


Рис. 48. Электронно-микроскопическое изображение профиля канала при использовании РИПТ через маску фоторезиста.

Готовая профилированная структура, полученная с использованием ИЛТ и РИПТ, а также готовый дискретный ПТШ на 4H-SiC представлены на рис. 49.

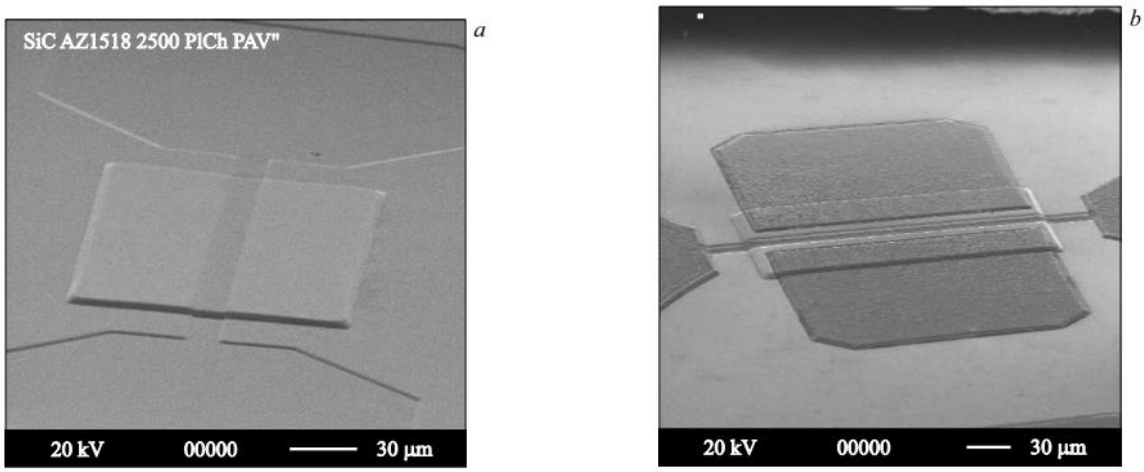


Рис. 49. Электронно-микроскопическое изображение профилированной структуры 4H-SiC (a) и готового 4H-SiC-ПТШ (b).

§ 5.4 Электрические характеристики полевого транзистора с затвором Шоттки, полученного с использованием методов сухого травления

Параметры эпитаксиальной структуры, на основе которой изготавливались транзисторные чипы, следующие: удельное сопротивление полуизолирующей подложки ~ 10^5 Ом·см; буферный эпитаксиальный *p*-слой

толщиной 0.5 мкм с уровнем легирования ~ 10^{15} см$^{-3}$; эпитаксиальный канальный *n*-слой толщиной 0.5 мкм с уровнем легирования ~ 10^{17} см$^{-3}$; подконтактный эпитаксиальный n^+-слой толщиной 0.5 мкм с уровнем легирования ~ 10^{19} см$^{-3}$.

На рис. 50 показана прямая вольт-амперная характеристика (ВАХ) затвор–исток диода, измеренная на постоянном токе при комнатной температуре.

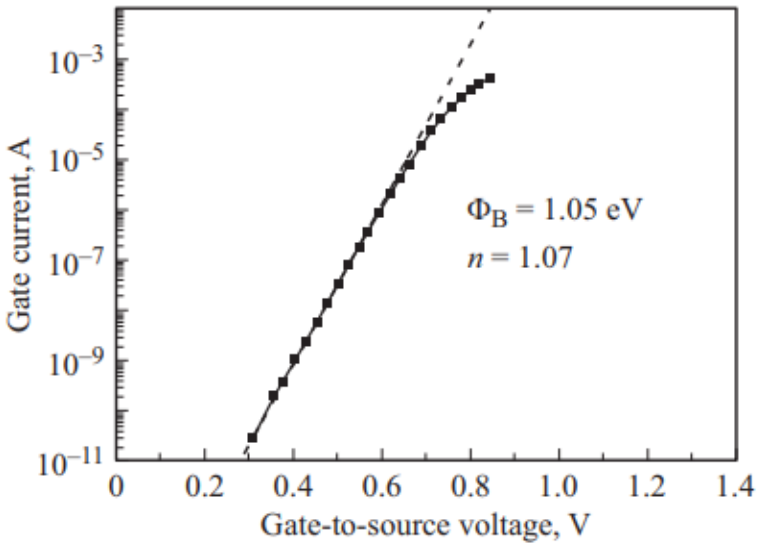


Рис. 50. Прямая вольт-амперная характеристика (ВАХ) затвор–исток диода.

На участке, предшествующем ограничению тока последовательным сопротивлением канала, измеренная ВАХ была аппроксимирована выражением, описывающим ток термоэлектронной эмиссии в барьерах Шоттки [11]:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right], \qquad (22)$$

где q – элементарный заряд, V – приложенное напряжение (положительное для прямого направления и отрицательное для обратного), T – абсолютная температура, k – постоянная Больцмана (ток насыщения I_0 и фактор идеальности n использовались в качестве подгоночных параметров).

Рассчитанный из прямой ВАХ фактор идеальности составляет n ≈ 1.07. В теории термоэлектронной эмиссии ток насыщения I_0 задается высотой барьера Шоттки (Φ_B):

$$I_0 = SA^*T^2\exp(-\frac{\Phi_B}{kT}) , \qquad (23)$$

где A^* – константа Ричардсона, S – площадь контакта Шоттки. Рассчитанная из прямой ВАХ высота барьера равна Φ_B = 1.05 эВ.

На рис. 51 показаны обратные ВАХ затвор–исток диода, измеренные при напряжениях до 300 В и температурах до 190 °С. Отметим, что при малых напряжениях заметный обратный ток появлялся лишь при температуре ~ 90 °С. При этом на всех характеристиках проявляется отчетливая тенденция к насыщению обратного тока в соответствии с формулой (22). Рост обратного тока начинался при напряжении ~ 250 В, при котором максимальное электрическое поле в промежутке сток–затвор достигало величины ~ $1.5\cdot10^6$ В/см. Важно заметить, что эта величина близка к критическому полю лавинного пробоя в 4H-SiC [130]. Таким образом можно утверждать, что полученные при использовании разработанной технологии сухого травления профиль структуры и качество травленой поверхности обеспечивают максимально возможную при данном уровне легирования величину напряжения пробоя. На рис. 52 точками показана зависимость обратного тока, измеренного при напряжении 50 В от обратной температуры (график Ричардсона). Определенная из наклона этой зависимости высота барьера Φ_B равняется 0.96 эВ, что вполне удовлетворительно согласуется с величиной Φ_B, полученной из анализа прямой ВАХ. Таким образом, прямые и обратные ВАХ барьера Шоттки оказались весьма близкими к идеальным, что свидетельствует о высоком качестве подготовки поверхности канала перед формированием контакта Шоттки.

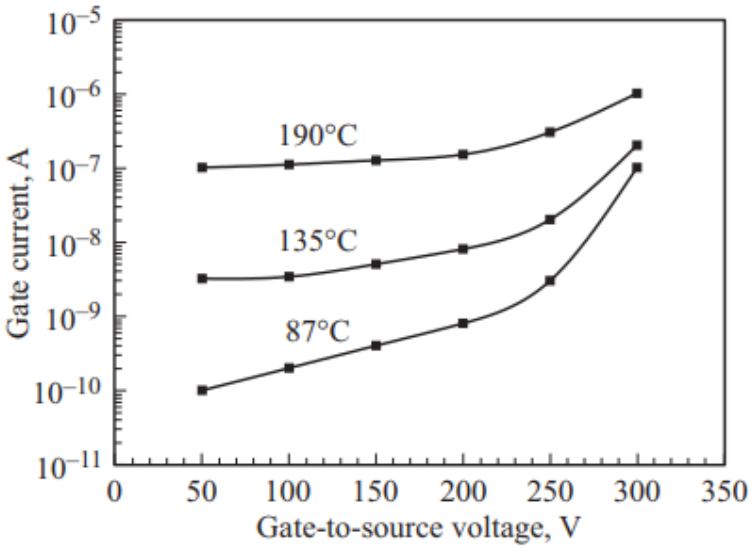


Рис. 51. Обратные ВАХ исток–затвор диода (сток оборван).

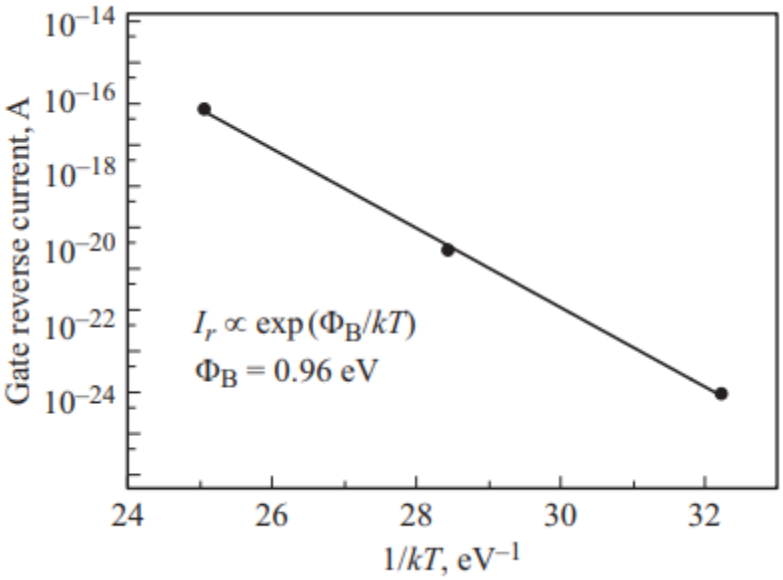


Рис. 52. Термоактивационная зависимость обратного тока I_r исток–затвор диода.

На рис. 53 показана вольт-фарадная характеристика (ВФХ) затвор–сток диода, измеренная на частоте 1 МГц. При нулевом напряжении емкость диода составляет 0.78 пФ, а соответствующая толщина области пространственного заряда (ОПЗ) – W_0 = 0.12 мкм. При увеличении обратного напряжения емкость монотонно падает, а при напряжении -14.5 В резко обрывается практически до нуля вследствие отсечки канала областью пространственного заряда (ожидается, что пороговое напряжение запирания

ПТШ составит при этом те же 14.5 В). Соответствующая толщина ОПЗ равна 0.41 мкм. Таким образом, при нулевом смещении на затворе толщина проводящей части канала под затвором составляет h_0 = 0.29 мкм.

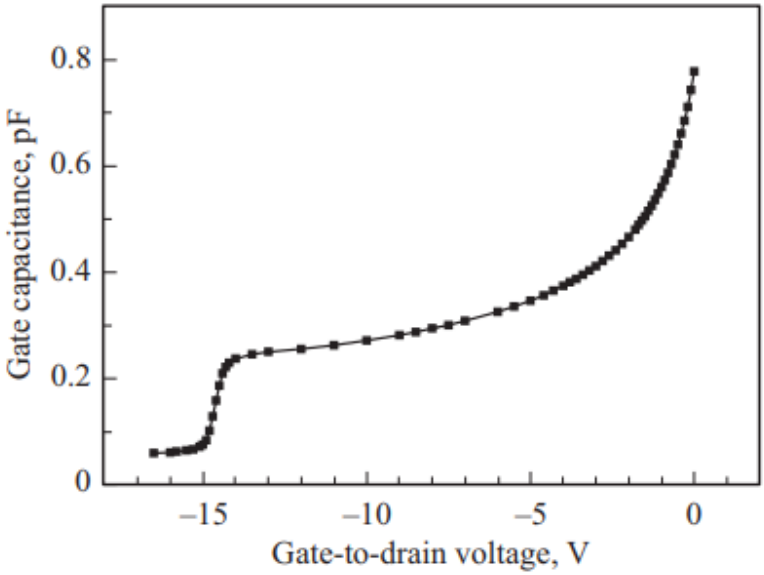


Рис. 53. ВФХ диода затвор−сток на частоте 1 МГц.

Выходные ВАХ транзисторов измерялись на коротких импульсах во избежание саморазогрева. К затвору прикладывалось постоянное отрицательное смещение V_{GS} (относительно заземленного истока), а на сток подавались (через резистивную нагрузку) импульсы положительного напряжения. Импульсные напряжения на стоке и на нагрузке измерялись с помощью цифрового осциллографа. Длительность импульсов составляла 2 мкс, а частота повторения – 1 Гц. Измеренные таким образом импульсные ВАХ одного из транзисторов показаны на рис. 54. Максимальный ток стока составил ~ 40 мА (150 мА/мм). Как и ожидалось, пороговое напряжение затвора составляет $V_{TH} \approx 14.5$ В. Как видно, ток стока стремится к насыщению при напряжениях на стоке $V_{DS} = -V_{GS} + V_{TH}$, что соответствует классической модели Шокли [131], описывающей ВАХ длинноканального полевого транзистора обедненного типа.

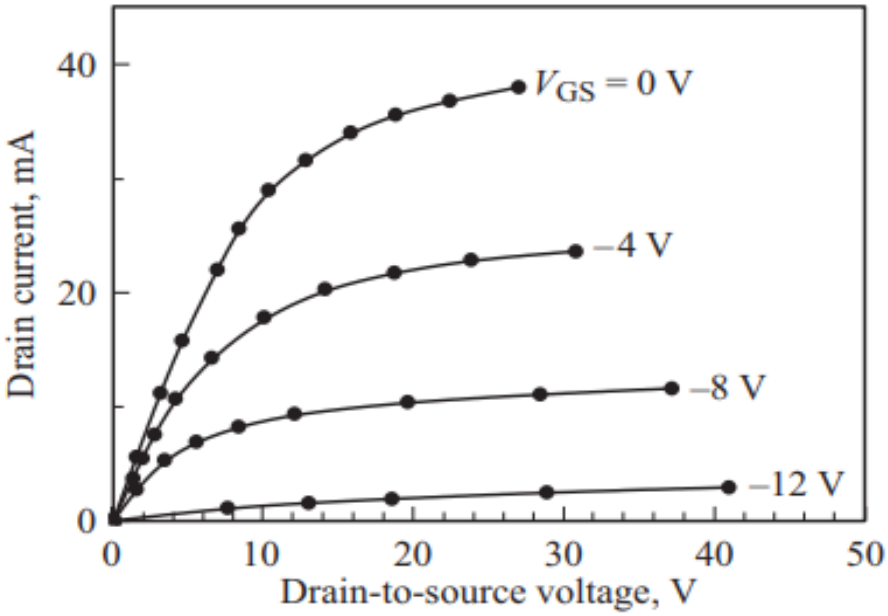


Рис. 54. Выходные ВАХ 4H-SiC-ПТШ.

Анализ электрических характеристик прибора, созданного с помощью разработанной технологии, показал, что разработанные в настоящей работе низкотемпературные способы микропрофилирования могут быть альтернативой высокотемпературному газовому травлению.

Разработанная технология микропрофилирования 4H-SiC структур методами сухого травления, сочетающая низкую температуру технологических операций, высокую чистоту обработки, требуемую селективность по отношению к различным маскирующим материалам и высокую разрешающую способность, может быть использована для создания высоковольтных карбид-кремниевых диодов и транзисторов. Созданный в рамках разработанной технологии полевой транзистор с затвором в виде барьера Шоттки характеризуется совпадающим с теоретически возможным напряжением пробоя, низкими уровнями токов утечки и неплохим для такого рода структур коэффициентом идеальности перехода затвор−исток $n \approx 1.07$.

Такая технология формирования мезаструктур с наклонными стенками может оказаться востребованной для создания высоковольтных вертикальных диодов и транзисторов с так называемой ”прямой“ фаской

[132], предотвращающей поверхностный пробой. Результаты этой работы представлены в статье [133].

Глава 6. Высоковольтные лавинные диоды с *p-n*-переходом и прямой фаской

При изготовлении высоковольтных лавинных диодов одной из основных задач является снижение напряженности электрического поля на поверхности структур с целью устранения поверхностного пробоя. Одним из первых методов снижения краевого поля в эпитаксиальных SiC приборах было реактивно-ионное травление (РИТ) меза-структур в плазме фторсодержащих молекулярных газов (см. 1.2.1). При высокоселективном травлении SiC методом РИТ (при использовании в качестве маски металла) стенка протравливаемой ступеньки получается вертикальной. В меза-структурных SiC диодах с вертикальными стенками электрическое поле на поверхности мезы удается понизить до величины поля в объеме, однако поверхностный пробой остается, как правило, доминирующим из-за наличия на поверхности различного рода структурных несовершенств, поверхностного заряда, загрязнений и т.п.

Для защиты высоковольтных 4H-SiC диодов от краевого пробоя эффективным может быть формирование меза-структур с наклонными стенками по аналогии с формированием прямой или обратной фаски в кремниевых силовых приборах [134]. На рис. 54 показаны два варианта конфигурации меза-структур, изготовленных на подложке *n*-типа (подчеркнем, что 4H-SiC приборы изготавливаются исключительно на подложках *n*-типа).

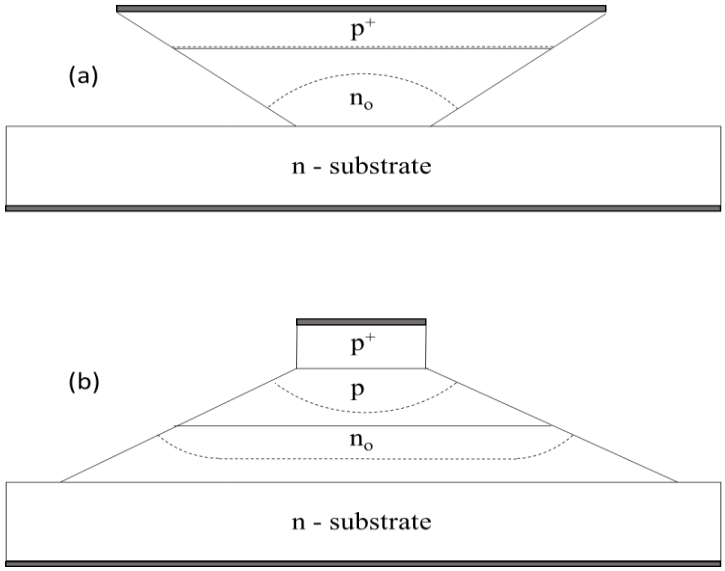


Рис. 55. Схематическое изображение диодных структур с обратной (a) и прямой (b) фасками. Пунктиром показаны границы обедненных областей блокирующих переходов.

Для структур с резким асимметричным p^+-n_o–переходом лучше всего подошла бы обратная фаска (рис. 55a). Здесь поверхностное поле уменьшено по сравнению с объемным за счет расширения обедненной области перехода у поверхности n_o-слоя). Однако на практике реализовать показанную на рис. 55a геометрическую конфигурацию применительно к 4H-SiC не представляется возможным, т.к. такие диоды имеют размер не более 1 мм и изготавливаются по групповой технологии, что исключает механическую обработку боковой поверхности дискретного диода, как это делают в приборах на Si [135]. Что касается прямой фаски, то ее применение может быть эффективным для таких приборов, в которых *p*-область блокирующего *p*-n_o-перехода умеренно легирована (рис. 55b). Здесь за уменьшение поверхностного поля отвечает расширение обедненной области перехода у поверхности *p*-слоя). Такие *p*-n_o-переходы с концентрацией акцепторов в *p*-области ~ 10^{17} см$^{-3}$ имеют, например, быстродействующие диодные размыкатели тока [136], биполярные *n*-*p*-*n*–транзисторы и МОП-транзисторы с инверсным *n*-каналом (рис. 56).

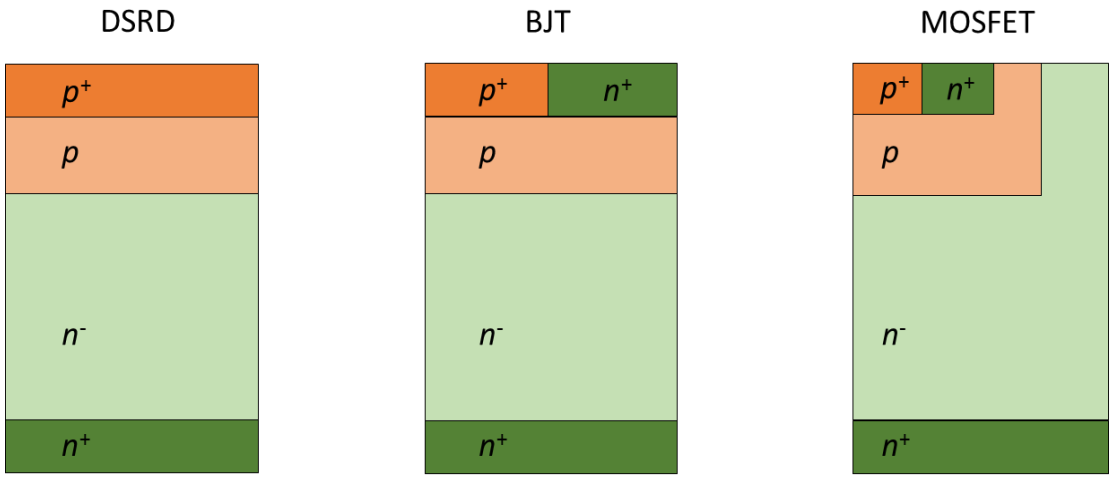


Рис. 56. Схематическое изображение сечений вертикальных силовых приборов, содержащих p^+-p-n_o-n^+–структуру: дрейфовый диод с резким восстановлением (DSRD), биполярный транзистор (BJT), МОП-транзистор (MOSFET).

Формирование прямой фаски может быть эффективным также для диодов Шоттки с n_o-базой. На периферии диода вначале может быть создана умеренно легированная p-область (например, с помощью имплантации и радиационно-стимулированной диффузии бора в n_o-базу [137]; тем самым на краю прибора создается p-n_o-n^+–структура), а уже потом формируется прямая фаска.

Проектирование оптимальной конструкции прямой фаски требует анализа, который может быть корректно проделан только в рамках численного моделирования.

§ 6.1 Моделирование

На рис. 57 показана аксиально симметричная модель меза-эпитаксиальной 4H-SiC p^+-p-n_o-n^+–структуры с прямой фаской.

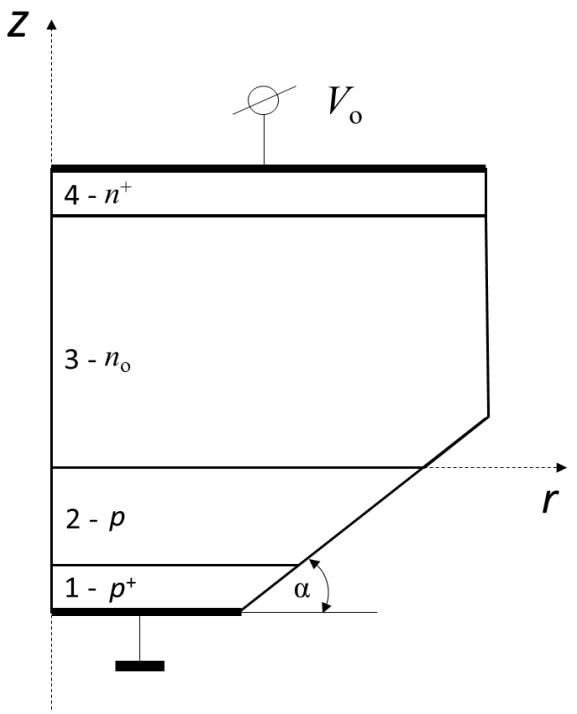


Рис. 57. Схематическое изображение структуры моделируемого меза-эпитаксиального 4H-SiC p^+-p-n_o-n^+–диода с прямой фаской.

Задача нахождения пространственного распределения электрического поля E(r,z) в обратносмещенном диоде решалась при следующих допущениях:

– легирующие примеси – доноры и акцепторы – однородно распределены в пределах *n*- и *p*-областей, соответственно;

– доноры и акцепторы полностью ионизованы;

– поверхностный заряд на боковой стенке диодной структуры равен нулю;

– внешняя граница p^+-области находится под нулевым потенциалом;

– внешняя граница n^+-области находится под положительным потенциалом V_o;

– обратный ток через диод равен нулю;

– концентрации электронов в p^+- и *p*-областях и дырок в n^+- и *n*-областях равны нулю;

– концентрации дырок (p_i) в p^+- и p-областях и электронов (n_j) в в n^+- и n_o-областях определяются, в соответствии со статистикой Больцмана, локальной величиной электрического потенциала:

$$p_i = N_{Ai} \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right); i = 1.2 \quad (24)$$

$$n_j = N_{Dj} \exp\left[-\frac{q(V_o - V)}{kT}\right]; j = 3.4 \quad , \quad (25)$$

где q – элементарный (положительный) заряд, N_{Ai} и N_{Dj} – концентрации акцепторов и доноров, kT – тепловая энергия.

С учетом принятых допущений задача нахождения E(r,z) сводится к решению уравнения Пуассона в полупроводнике (рассматриваемом как диэлектрик), локальная плотность объемного заряда в котором зависит от потенциала V(r,z):

– плотность отрицательного объемного заряда в p^+- и p-областях

$$\rho_{pi} = -q(N_{Ai} - p_i), \quad (26)$$

– плотность положительного объемного заряда в n^+- и n-областях

$$\rho_{nj} = q(N_{Dj} - n_j). \quad (27)$$

В расчетах параметры эпитаксиальной структуры диода выбирались полностью соответствующими параметрам коммерческой 4H-SiC пластины n-типа с выращенной методом CVD-эпитаксии p^+-p-n_o-n^+–структурой, использованной при анализе эффективности защиты от поверхностного пробоя с помощью охранной системы в виде краевой полуизолирущей области (Глава 3, таблица 2). Таким образом, напряжение пробоя идеального одномерного диода с такими параметрами должно составлять около полутора киловольт (Рис. 37).

Концентрации акцепторов в p^+- и p-областях: $N_{A1} = 1 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$ и $N_{A2} = 8 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$; концентрации доноров в n_o- и n^+-областях: $N_{D3} = 8 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$ и $N_{D4} = 1 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$. Потенциал V_o принимался равным 1200 В, угол фаски α варьировался в пределах от 3 до 11 градусов. Расчеты проводились с

помощью компьютерной программы, реализующей численное моделирование двумерных электростатических полей методом конечных элементов.

На рис. 58 в качестве примера показано рассчитанное двумерное распределение электрического поля в структуре с фаской, снятой под углом α = 5.7°.

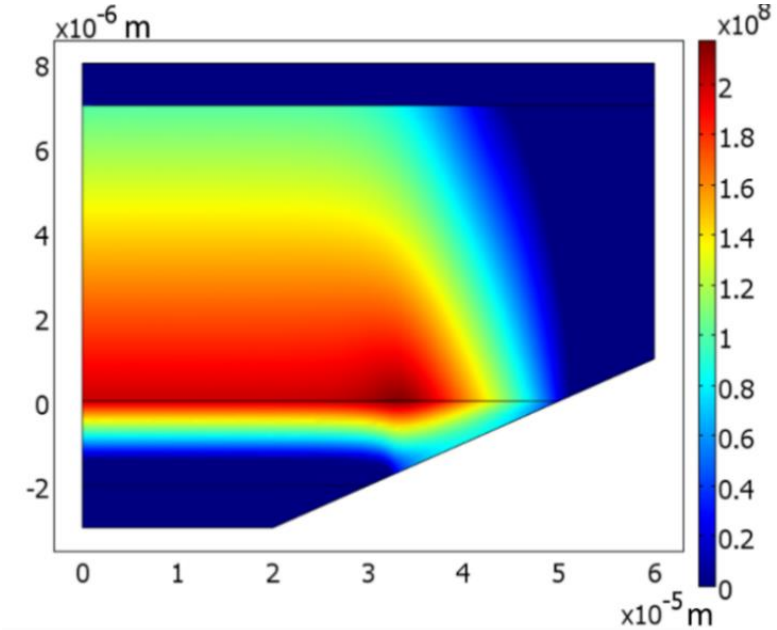


Рис. 58. Двумерное распределение электрического поля (α = 5.7°) (по оси абсцисс (r): от 0 до 20 мкм – меза, от 20 до 60 мкм – фаска; по оси ординат (z): от 0 до 7 мкм – n_0-слой, от 7 до 8 мкм – n^+-подложка, от -3 до -2 мкм – p^+-слой, от -2 до 0 мкм – p-слой). На правой вертикальной оси цветом показана величина напряженности поля.

Как видно, в объеме диода (при радиусах r в пределах от нуля до 20 мкм) поле имеет квазиодномерный характер распределения. Максимальная величина поля в плоскости p-n_o-перехода составляет около $2 \cdot 10^6$ В/см; ОПЗ проникает в n_o-слой на всю его толщину 7 мкм, а в p-слой – на глубину около 1 мкм. При r более 25 мкм поле приобретает двумерный характер распределения, которое характеризуется следующими особенностями:

– ОПЗ расширяется за пределы квазиодномерной области (в латеральном направлении) на расстояние около 30 мкм. Отметим, что на

этом расстоянии плоскость p-n_o–перехода уже выходит на поверхность фаски;

– пик поля смещен по нормали от поверхности фаски (но остается в плоскости p-n_o–перехода) на расстояние около 1.5 мкм;

– пиковое поле немного превышает максимальную величину поля в квазиодномерной части диода. В месте выхода плоскости p-n_o–перехода на поверхность фаски поле практически обращается в ноль (рис. 59);

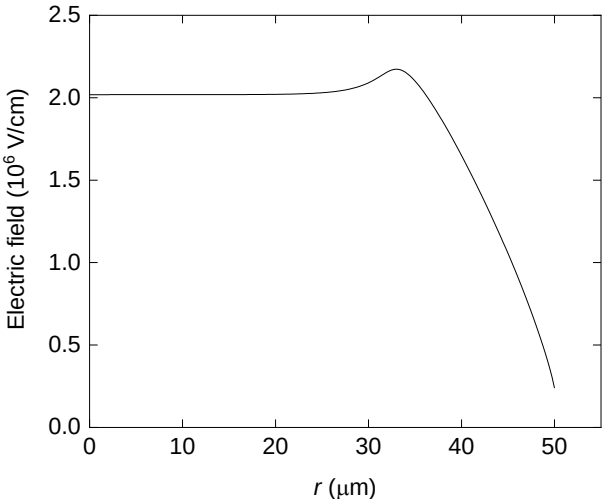


Рис. 59. Зависимость электрического поля в плоскости p-n_o–перехода (z = 0) от координаты r (α = 5.7°).

– максимальное поле на поверхности фаски меньше пикового поля в 2.6 раза (рис. 60);

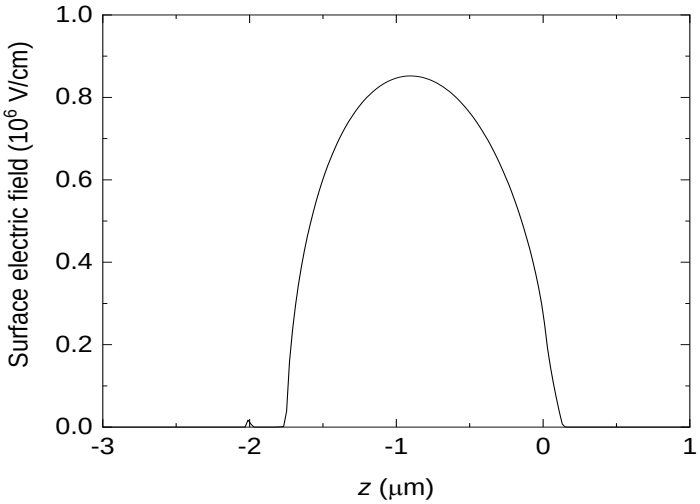


Рис. 60. Зависимость электрического поля на поверхности фаски от координаты z (α = 5.7°).

На рис. 61 показана зависимость максимального поля на поверхности фаски от угла α.

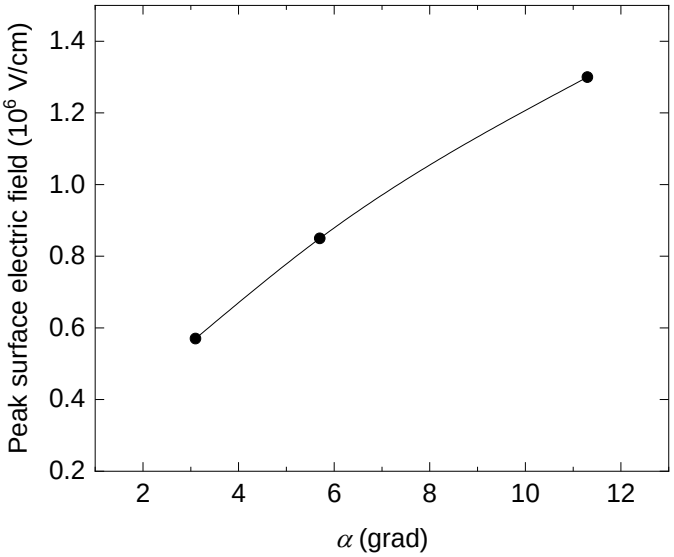


Рис. 61. Зависимость максимального электрического поля на поверхности фаски от угла α.

Как видно, поле монотонно уменьшается при уменьшении α. Фаска, снятая под углом около 3°, позволяет снизить максимальную величину поверхностного поля по сравнению с полем в объеме в 4 раза.

Таким образом, результаты моделирования показывают, что для меза-эпитаксиальных 4H-SiC p^+-p-n_o-n^+–диодов прямая фаска может быть эффективным конструктивным решением проблемы краевого пробоя за счет уменьшения поверхностного поля до величины, намного меньшей поля в объеме.

§ 6.2 Технология создания охранного контура в виде прямой фаски

В кремниевой технологии фаску снимают с помощью механической шлифовки: торец приборов круглой формы (диаметром не менее двух - трех сантиметров) обрабатывают на шар-шлифе [135]. 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. Для того, 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 должен иметь форму острого клина (очевидно, что имеющиеся технологические возможности создания маски с "острым" краем будут ограничивать снизу величину угла α). Наиболее технологичная маска – это маска из фоторезиста, а наиболее подходящий способ травления карбида кремния, обеспечивающий слабую селективность по отношению к фоторезисту, – это реактивно-ионное травление. Как следует из приведенных выше результатов моделирования (см. § 6.1), 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 полутора – двух микрометров).

Простая модель травления с маской из фоторезиста. На рис. 62 показана идеализированная геометрическая модель селективного сухого травления SiC с маской из фоторезиста.

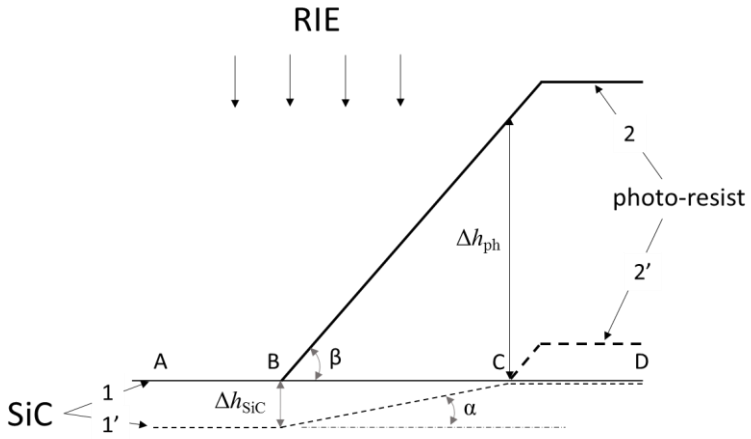


Рис. 62. Идеализированная модель селективного травления SiC с маской из фоторезиста.

Наклонный профиль формируется при одновременном травлении SiC и резистивной маски, край которой имеет форму клина. Исходная поверхность SiC – плоская (сплошная линия 1), поверхность фоторезиста наклонена под углом β к поверхности SiC (сплошная линия 2). В процессе травления открытая поверхность SiC (на участке AB) травится на глубину Δh_{SiC}. Фоторезист на участке CD травится на глубину Δh_{ph}. На участке BC фоторезист стравливается за время процесса полностью, так что после травления край фоторезиста сдвигается в латеральном направлении на расстояние BC (пунктирная линия 2'). В результате поверхность SiC после травления на участке BC оказывается наклоненной под углом α к исходной поверхности пластины SiC (пунктирная линия 1'). Легко убедиться, что

$$\mathrm{tg}(\alpha) = \mathrm{tg}(\beta)/(\Delta h_{ph}/\Delta h_{SiC}) \equiv \mathrm{tg}(\beta)/K, \qquad (28)$$

где K – отношение скоростей травления фоторезиста и SiC. Таким образом, из простых геометрических соображений следует, что результирующий угол наклона стенки протравленной меза-структуры (α) должен задаваться двумя параметрами – исходным углом резистивного клина (β) и селективностью травления SiC по отношению к фоторезисту (величиной K). При селективности травления 1 : 1 (K = 1) краевой профиль маски будет "копироваться" в карбиде кремния. Важно то, что в случае технологических проблем по созданию фоторезистивной маски с малыми углами ($\alpha < 10^{o}$) эти проблемы могут быть решены подбором таких режимов травления, при которых скорость травления фоторезиста будет выше скорости травления SiC ($K > 1$). Это проиллюстрировано на рис. 63, где показаны рассчитанные из соотношения (28) зависимости α (K) при разных значениях β. Например, при $\beta = 22°$ результирующий угол $\alpha = 8°$ получается при $K = 2.9$ (селективность травления SiC по отношению к фоторезисту 1 : 2.9).

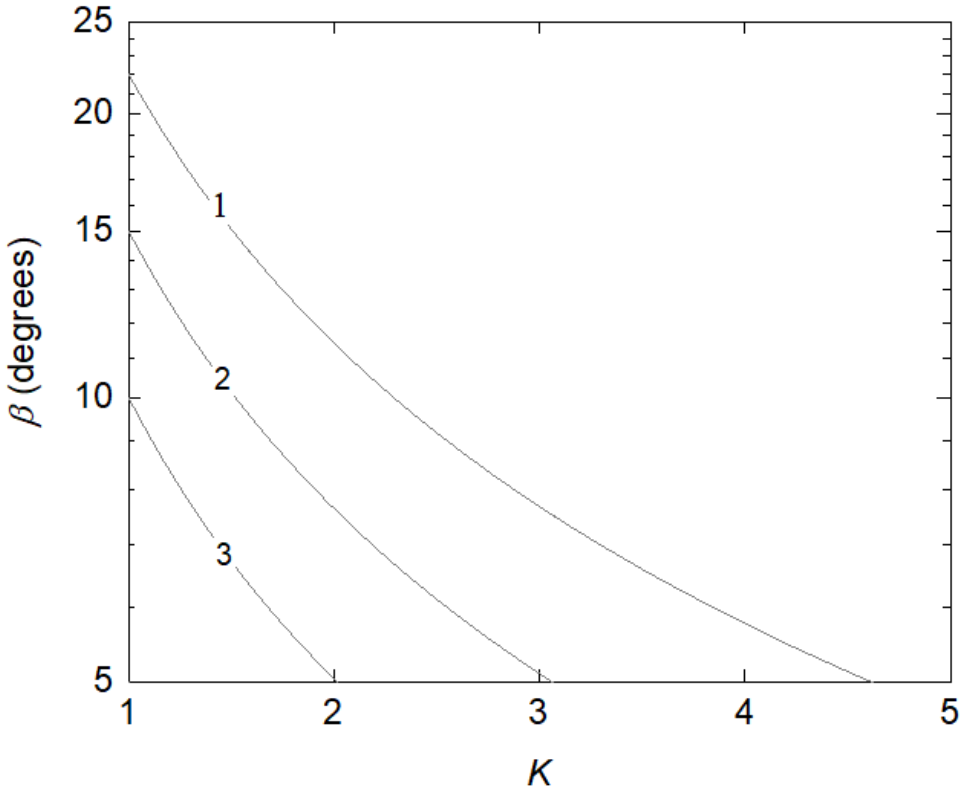


Рис. 63. Расчетные зависимости α(K) при разных значениях β: линия 1 – 22°, линия 2 – 15°, линия 3 – 10° (K – отношение скоростей травления фоторезиста и SiC; α – результирующий угол наклона стенки протравленной меза-структуры; β – исходный угол резистивного клина).

Исходные пластины SiC. Для изготовления SiC меза-структур с наклонными стенками использовались коммерческая (Cree) 4H-SiC подложка диаметром 76 мм с ориентацией (0001). Из подложки вырезались фрагменты размером 20×20 мм^2. Микропрофилирование проводилось на Si-стороне пластин. Перед нанесением фоторезиста обратная C-сторона пластин шлифовалась алмазной пастой с последующим напылением на шлифованную поверхность слоя никеля толщиной около 0.2 мкм для полной имитации диода.

Формирование маски из фоторезиста. Использовались позитивные фоторезисты, состоящие из новолачной смолы, смешанной с небольшим количеством диазонафтохиноновой фотоактивной добавки. Эти фоторезисты обладают хорошей плазмостокостью и легко удаляются в органических

растворителях. При термическом задубливании фоторезиста протекают сложные физико-химические процессы с участием смолы, чувствительного компонента, остаточного растворителя и воздуха [138]. Особенностью позитивных фоторезистов на основе новолачной смолы является их выраженное пластическое течение, которое наступает при температуре стеклования (ниже температуры задубливания) и зависит от конкретной марки фоторезиста. Задубливание приводит к оплавлению боковой стенки резиста. Условия задубливания должны подбираться так, чтобы при заданном размере элемента достигались требуемые параметры – толщина слоя резиста и краевой угол. В экспериментах фоторезист AZ4562 наносился в два слоя методом центрифугирования (суммарная толщина пленки составляла 15 - 20 мкм). Сушка проводилась в конвекционной печи при 90 ^{o}C в течение 30 минут. Затем путем экспонирования и проявления в 1%-ном растворе KOH в слое резиста создавался рисунок – квадратные площадки разного размера. Задубливание проводилось в конвекционной печи при температуре 150 °C в течение 60 минут. После изготовления элементов замерялись углы наклона их боковых стенок. Для этого снималось изображение сколов структур с помощью растрового электронного микроскопа CamScan S4-90FE. Оказалось, что угол наклона боковой стенки после задубливания зависит от толщины слоя резиста и от размеров 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° (рис. 64).

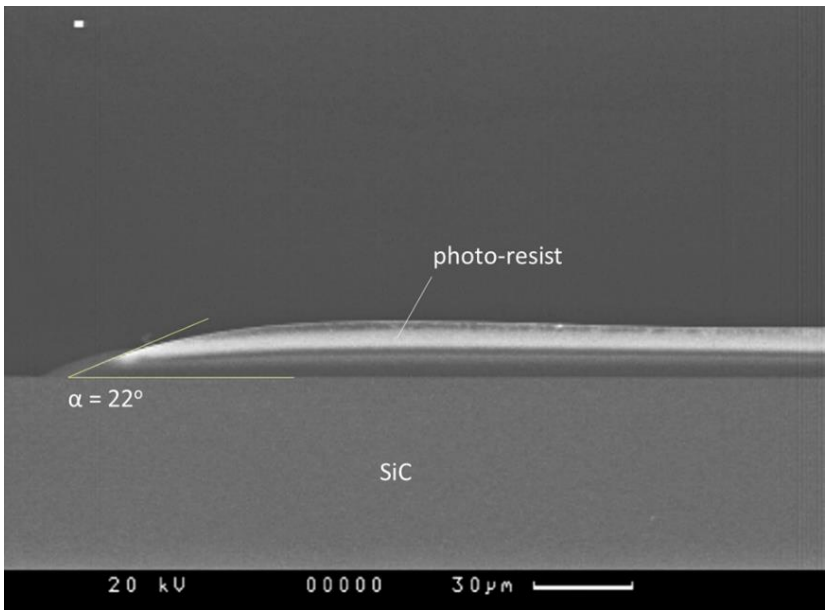


Рис. 64. Электронно-микроскопическое изображение профиля фоторезистивной маски. Толщина слоя фоторезиста 15 мкм, угол краевого клина 22°.

Реактивное ионно-плазменное травление SiC с резистивной маской. Задача формирования меза-структур с пологими стенками ориентирована на изготовление высоковольтных 4H-SiC p^+-p-n_o-n^+–диодов с прямой фаской. 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 (см. рис. 62);

– 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. 65a и 65b показаны микрорельефы, полученные при травлении SiC в данном режиме, а в табл. 3 сведены параметры травления.

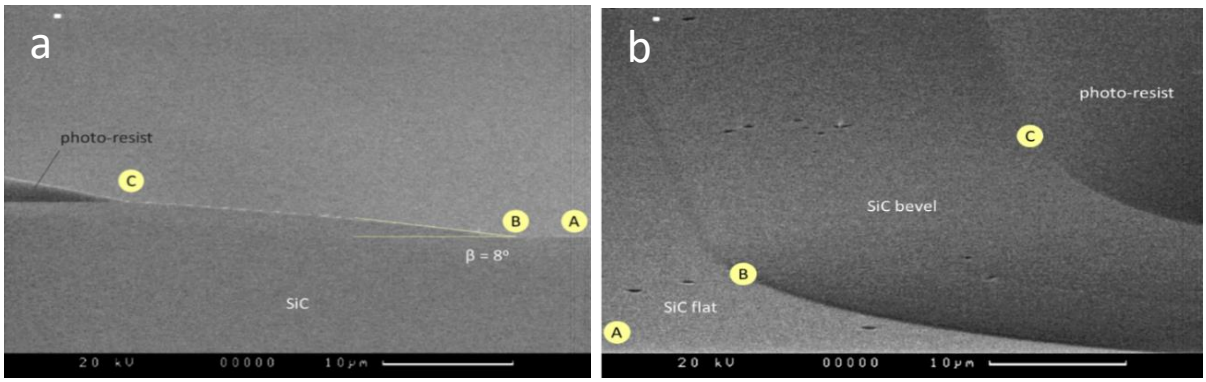


Рис. 65. Электронно-микроскопическое изображение a) скола протравленной SiC меза-структуры, b) поверхности, протравленной SiC меза-структуры в аксонометрической проекции. Участок AB – плоское дно SiC меза-структуры, участок BC – пологая боковая стенка SiC меза-структуры с углом наклона 8°.

Таблица 3. Параметры селективного травления SiC с маской из фоторезиста.

Глубина травления SiC, мкм	3.2
Скорость травления SiC, нм/мин	53
Скорость травления фоторезиста, нм/мин	160
Селективность травления SiC по отношению к фоторезисту	1 : 3
Результирующий угол наклона стенки меза-структуры (α), градусы	8

Отметим, что полученный экспериментально результат ($\alpha = 8°$ при K = 3) совпадает с результатом, который предсказывает рассмотренная выше простая модель. Как видно из рис. 64, и дно, и образующиеся стенки меза-структуры довольно гладкие. При этом на поверхности SiC можно видеть отдельные ямки травления, образование которых обусловлено, по-видимому, наличием в объеме SiC проникающих дислокаций (плотность дислокаций в использованных коммерческих 4H-SiC подложках составляет ~ 10^3 см$^{-2}$).

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-ти градусов чрезвычайно сложно, если вообще возможно. Однако, технологические проблемы по созданию фоторезистивной маски с малыми углами могут быть решены коррекцией селективности травления.

§ 6.3 Технология изготовления высоковольтных лавинных диодов

В § 6.1 с помощью двумерного численного моделирования показано, что в 4H-SiC p^+-p-n_o-n^+-диодах, рассчитанных на обратное напряжение ~ 1500 В, в качестве высокоэффективной охранной системы может работать прямая фаска. Рассмотренные в предыдущем параграфе технологические и конструктивные особенности получения прямой фаски, требуемые для создания высоковольтных лавинных диодов, позволили изготовить высоковольтные (1500 В) импульсные лавинные диоды с параметрами, близкими к теоретически предельным.

В данном параграфе представлена технология изготовления высоковольтных лавинных 4H-SiC p^+-p-n_o-n^+-диодов с прямой фаской, способных к работе в режиме мощного импульсного лавинного пробоя. Диоды изготавливались на структуре с теми же параметрами, что и диоды с охранной системой в виде полуизолирующей области (глава 3).

Технология изготовления диодов включала шлифовку тыльной стороны пластины, химическую очистку пластины на разных стадиях технологического процесса, нанесение и термический отжиг металлов, контактную фотолитографию, реактивно-ионное травление меза-структур, резку пластины чипы и их корпусирование. Последовательность основных технологических операций следующая:

1. *Формирование сплошного катодного омического контакта к шлифованной n-подложке*. Контактным металлом служил никель (толщина слоя около 0.3 мкм), нанесенный ионным распылением и отожженый в вакууме при температуре 950 °C в течение 15 минут; далее ионным распылением поверх вожженного контактного Ni-слоя наносился слой серебра толщиной 1 мкм.

2. *Формирование на поверхности p^+-слоя анодных омических контактов*. Анодные контактные площадки размером 960×960 мкм^2 формировались с помощью взрывной фотолитографии. Контактным слоем служила комбинация из титана и хрома (толщина слоев 50 и 50 нм, соответственно), 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 с помощью повторной взрывной фотолитографии.

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°. Маскирующие фоторезистивные площадки размером 1160×1160 мкм^2 формировались с помощью фотолитографии с совмещением (маскирующие элементы полностью закрывали анодные контакты). На рис. 66 показано микроскопическое изображение поверхности мезаструктуры и профиль ее поверхности, полученный с помощью профилометра DEKTAK 3030.

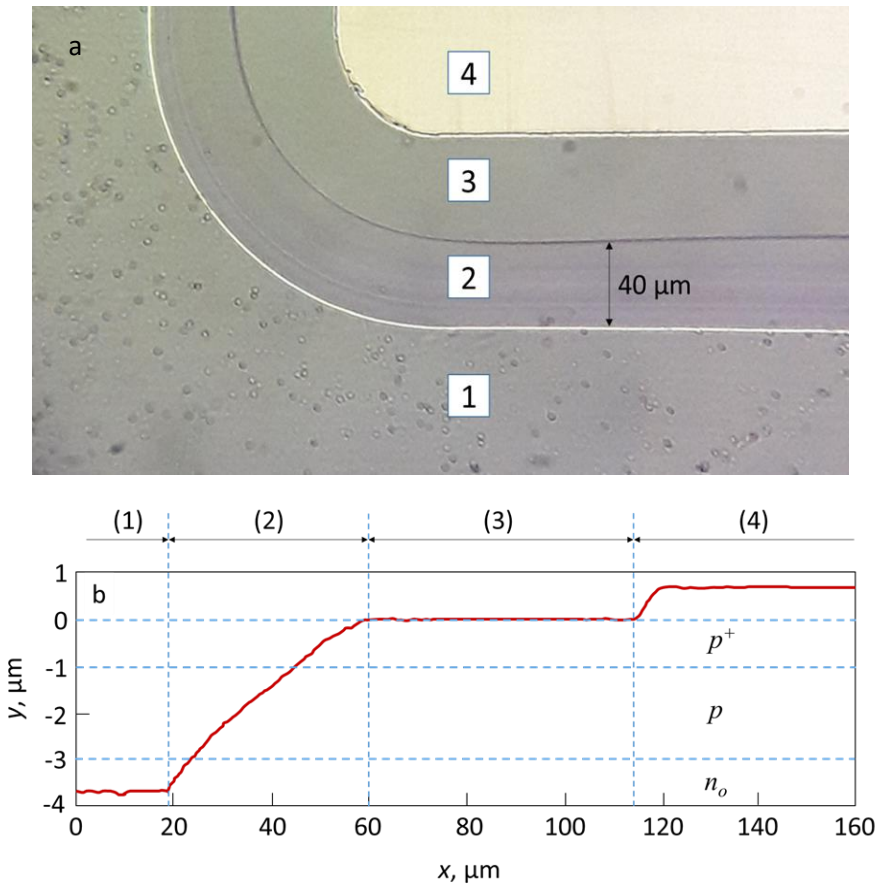


Рис. 66. (a) Микроскопическое изображение и (b) профиль поверхности, полученный с помощью профилометра DEKTAK 3030, p^+-p-n_o-n^+–диода с прямой фаской: (1) – n_o-база, (2) – фаска, (3) – p^+-эмиттер, (4) – анодный никелевый контакт.

Как видно, меза-структура имеет высоту 3.6 мкм, которая немного больше глубины залегания p-n_o–перехода (3 мкм), а угол наклона боковой стенки составляет 5° от плоскости p-n_o–перехода.

4. *Резка пластин на чипы*. Пластина с дискретными диодными структурами разрезалась алмазным диском на отдельные чипы размером 2×2 мм^2.

5. *Корпусирование чипов*. Изготовленные чипы монтировались в металлостеклянные корпуса с последующим присоединением анодных выводов. Поверхность чипов закрывалась электроизоляционным лаком.

Разработанная технология создания диодов с охранной системой в виде прямой фаски позволила получить приборы с характеристиками,

практически совпадающими с соответствующими характеристиками лавинных диодов, созданных на основе аналогичных структур с охранной системой в виде краевой полуизолирующей области (Глава 3) и близки к теоретически предельным.

§ 6.4 Экспериментальные результаты

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов измерялись с помощью цифрового характериографа Л2-100.

На вставке рис. 67 показана типичная ВАХ в прямом направлении, измеренная при токах до 10 А (плотность тока 10^3 А/см^2).

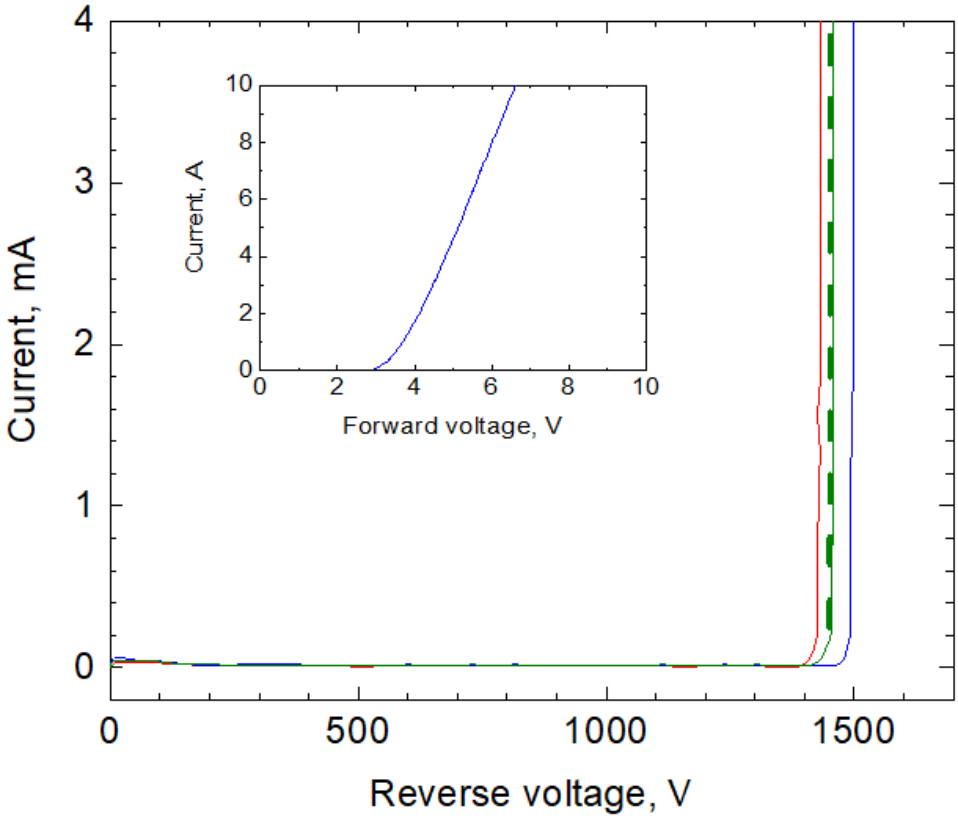


Рис. 67. Измеренные обратные ВАХ трех p^+-p-n_o-n^+–диодов (сплошные линии) и рассчитанная обратная ВАХ идеализированного одномерного p^+-p-n_o-n^+–диода (пунктирная линия). На вставке показана типичная ВАХ, измеренная в прямом направлении.

Напряжение отсечки диодов составляет около 3 В. Дифференциальное сопротивление в открытом состоянии равняется ~ 0.3 Ом. Как и следовало

ожидать, измеренная ВАХ практически полностью совпадает с вольт-амперной характеристикой, показанной на рис. 37 (глава 3). Значительно менее тривиальным является то обстоятельство, что обратные вольт-амперные характеристики также практически полностью совпадают с характеристиками, приведенными на рис. 37. Очевидно, что оба способа защиты диодов от поверхностного пробоя обеспечивают уровень защиты, позволяющий реализовать практически предельные теоретические значения напряжения пробоя.

В режиме пробоя дифференциальное сопротивление диода составляет около 3 Ом, (0.03 Ом·см^2 при размерах контакта 960×960 мкм^2). Столь малая величина сопротивления свидетельствует о том, что лавинный пробой однороден по площади (см. формулу (13) в главе 3).

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%.

Импульсные обратные ВАХ (режим мощного лавинного пробоя). Импульсные обратные ВАХ изготовленных диодов измерялись с помощью схемы разблокированного индуктивного переключения (Unclamped Inductive Switching, UIS), показанной на рис. 68. Результаты, полученные с использованием этой схемы, уже упоминались и анализировались в параграфе 3.3. Здесь мы проанализируем особенности использования этой схемы более подробно.

Схема UIS предназначена для пропускания через полупроводниковый диод импульсов лавинного тока треугольной формы с крутым фронтом нарастания (с длительностью не более 100 нс) и временем спада в микросекундном диапазоне.

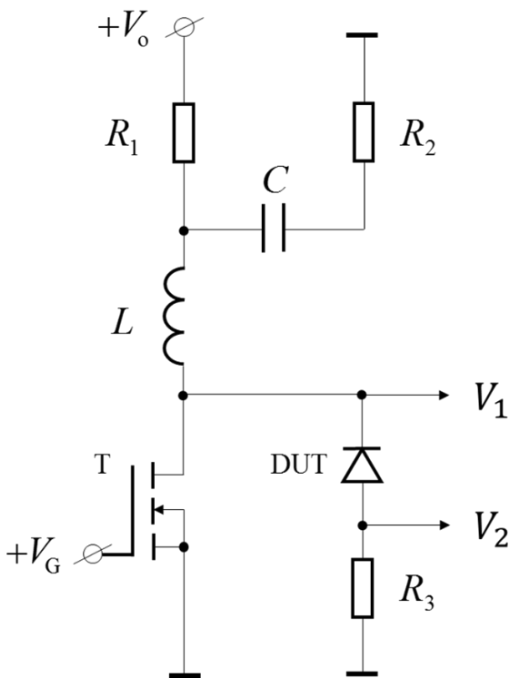


Рис. 68. Схема UIS (пояснения в тексте).

Схема работает следующим образом. Источником питания служит конденсатор C, заряженный до напряжения V_o; величина V_o выбирается намного меньше, чем напряжение пробоя диода. Исходно к диоду (DUT, Device Under Test) приложено обратное напряжение V_o, и это же напряжение приложено к стоку закрытого транзистора T. Когда транзистор T открывается импульсом напряжения V_G на затворе, конденсатор C разряжается через открытый транзистор, индуктивность L и сопротивление R_2. Максимальный ток в индуктивности L может варьироваться изменением длительности открытого состояния транзистора T. После закрывания транзистора T ток начинает протекать через диод и последовательно с ним включенный измерительный резистор R_3. При этом на диоде генерируется обратное напряжение, превышающее напряжение V_B. Далее по мере разряда индуктивности L ток падает, но напряжение остается выше V_B. И наконец, когда ток уменьшается практически до нуля, напряжение также снижается до исходной величины V_o.

Во время импульсных испытаний через диод пропускалась серия одиночных импульсов лавинного тока с нарастающей амплитудой. На

каждом шаге двухканальным цифровым осциллографом записывались временные диаграммы напряжения на диоде ($V = V_1 - V_2$) и тока через него ($I = V_2/R_3$). Обратная ВАХ строилась по пиковым значениям напряжения и тока на осциллограммах (проводились курсорные измерения амплитуды импульсов).

Изготовленные диоды выдерживали без деструкции одиночные импульсы лавинного тока с амплитудой, как минимум, 10 А и длительностью 1.2 мкс (рассеиваемая энергия 9 мДж).

На рис. 69 показаны соответствующие осциллограммы напряжения и тока, свидетельствующие об обратимом характере лавинного пробоя (кривыми 1 и 2 на рис. 36 показаны аналогичные осциллограммы, которые свидетельствуют, что диоды выдерживали без деградации импульсы тока амплитудой более 10 А и длительностью 4 мкс). Пиковая плотность тока составляет 10^3 А/см^2 при напряжении 1480 В.

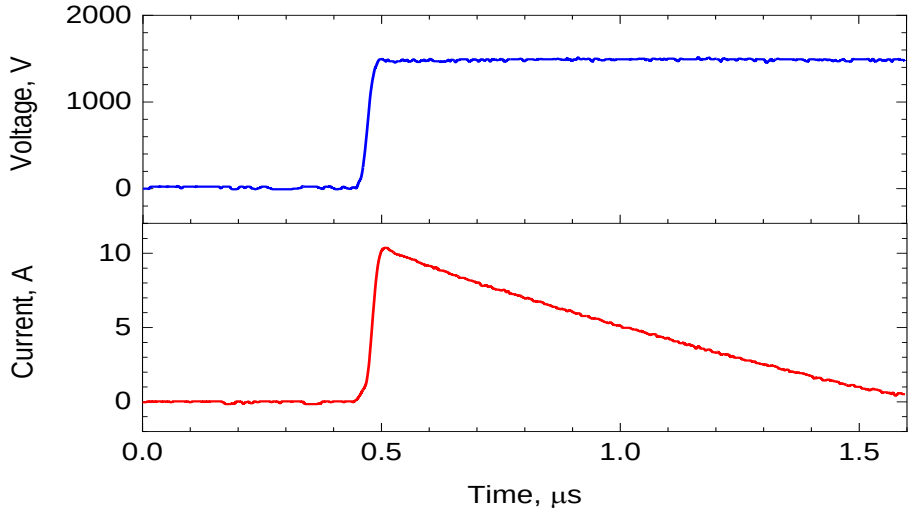


Рис. 69. Осциллограммы напряжения и тока, измеренные в схеме UIS.

На рис. 70 точками показана построенная обратная ВАХ; на этом же рисунке сплошной линией показана обратная ВАХ идеализированного одномерного диода, рассчитанная с помощью TCAD-моделирования.

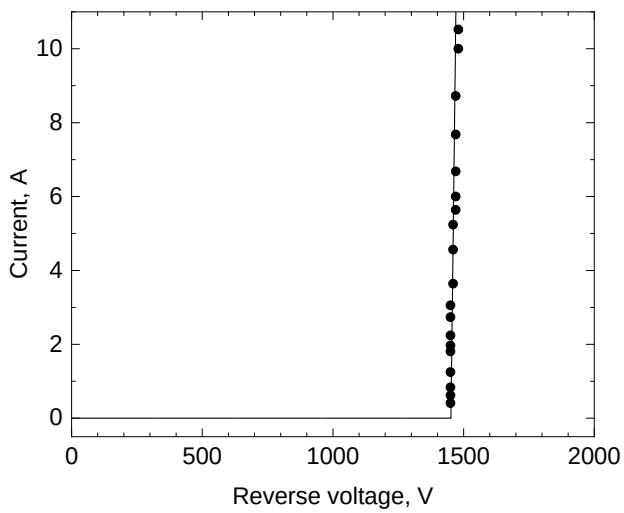


Рис. 70. Измеренная импульсная обратная ВАХ p^+-p-n_o-n^+–диода (точки) и рассчитанная обратная ВАХ идеализированного одномерного диода (сплошная линия).

В заключение данного раздела стоит подчеркнуть следующее. В рамках двумерного моделирования обратно смещенного высоковольтного 4H-SiC диода предсказана возможность использования в качестве высокоэффективного защитного краевого контура прямой фаски. Такой краевой контур способен обеспечить защиту от поверхностного пробоя, а также относительно прост в изготовлении: нет необходимости в литографии с высоким разрешением; не требуется проводить глубокого травления меза-структур на всю толщину блокирующей n_o-базы (достаточно травления на глубину, равную суммарной толщине слоев p-типа). 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 ~ 10^3 А/см^2. Результат этой работы опубликован в статьях [139, 140, 141]. 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 диоды Шоттки с n_o-базой.

Заключение: основные результаты и выводы

1. Выполнено двумерное численное моделирование высоковольтных 4H-SiC p^+-n_o-n^+–диодов с охранной 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 охранной *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 постепенно утрачивает функциональность вследствие теплового выброса захваченных ловушками электронов.

2. Изготовлены высоковольтные 4H-SiC p^+-*p*-n_o-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·см^2. В режиме одиночных импульсов диоды сохраняют функциональность при плотностях лавинного тока до ~ 10^3 А/см^2. При длительности импульсов лавинного тока 4 мкс энергия, рассеиваемая диодами без деградации, составляет ~ 5 Дж/см^2 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 полуизолирующую *i*-область, толщиной ~ 10 мкм, созданную с помощью облучения высокоэнергетичными (53 МэВ) ионами аргона, и полевую 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). Показано, что использование фоторезиста в качестве маски при ИЛТ пучком ионов аргона позволяет получать мезаструктуры с наклонными стенками (с углом отклонения около 45 градусов от вертикали). 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). В рамках разработанной технологии создан полевой транзистор с затвором в виде барьера Шоттки с блокирующим напряжением, соответствующим теоретическому пределу, низким уровнем токов утечки и близким к единице коэффициентом идеальности перехода затвор–исток. Полученный результат свидетельствует, 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 и транзисторов с так называемой «положительной» фаской, предотвращающей поверхностный пробой.

5. Проведено численное моделирование пространственного распределения электрического поля в высоковольтных (~ 1500 В) обратносмещенных мезаэпитаксиальных p^+-p-n_o-n^+–диодах с прямой фаской. Показано, что формирование прямой фаски под углами менее 10 градусов к плоскости p-n_o-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 РИПС, позволяющих получать заданное соотношение скоростей травления маски и структуры. На основе полученных результатов изготовлены высоковольтные (с блокирующим напряжением ~ 1500 В) лавинные p^+-p-n_o-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_o–перехода. Рассчитанная с помощью TCAD-моделирования обратная ВАХ идеализированного одномерного диода с параметрами, соответствующими экспериментально реализованным структурам, с хорошей точностью совпадает с измеренными. Таким образом, эффективность работы охранного контура в виде прямой фаски близка к 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/см^2) и длительностью 1.2 мкс (рассеиваемая энергия 9 мДж).

Список основных публикаций по теме

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 и труды конференций

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 литературы

[1]Cheung R. «Silicon Carbide Microelectromechanical Systems for Harsh Environments», World Scientific: Singapore 2006

[2]Gachovska T.K., Hudgins J.L. «SiC and GaN Power Semiconductor Devices. In Power Electronics Handbook», Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2018, pp. 95–155

[3]Wijesundara M., Azevedo R. «Silicon Carbide Microsystems for Harsh Environments», Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011; Volume 22

[4]Ueda T. «GaN power devices: current status and future challenges», Jpn. J. Appl. Phys. 58, 2019, SC0804

[5]Ishikawa R., Hara M., Kaneko M., Kimoto T. «Electron mobility along (0001 and (11¯00) directions in 4H-SiC over a wide range of donor concentration and temperature», Appl. Phys. Express 14, 2021, 061005

[6]Levinshtein M.E., Ivanov P.A., Boltovets M.S., Krivutsa V.A., Palmour J.W., Das M.K., Hull B.A. «High-temperature (up to 773 K) operation of 6-kV 4H-SiC junction diodes», Solid-State Electron. 49(7), 2005, 1228-1232

[7]Duzellier S. «Radiation effects on electronic devices in space», Aerospace Science and Technology, 2005, V.9, N.1. P.93-99

[8]Nakayama K., Mizushima T., Takenaka K., *et al*., «27.5 kV 4H-SiC PiN diode with space-modulated JTE and carrier injection control», 2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), Chicago, IL, USA, 2018, pp. 395-398

[9]Kimoto T. «High-voltage SiC power devices for improved energy efficiency», Proc Jpn Acad Ser B Phys Biol Sci. 2022, 98(4): 161–89

[10]Sze S.M. and Lee M.K. «Semiconductor Devices. Physics and Technology», 2012, John Wiley & Sons, Inc, ISBN 978-0470-53794-7

[11]Зи С., «Физика полупроводниковых приборов», 1-й том, М., Мир, 1984

[12]Hatakeyama T., Watanabe T., Shinohe T., Kojima K., Arai K., Sano N. «Impact ionization coefficients of 4H silicon carbide», Appl. Phys. Lett., 2004, 85, 1380

[13]Иванов П.А.; Потапов А.С.; Лебедева Н.М.; Грехов И.В. «Лавинный пробой в 4H-SiC диодах Шоттки: вопросы надежности», ЖТФ, 2020, т. 90, с. 2133-2138

[14]Иванов П.А., Потапов А.С., Самсонова Т.П., Грехов И.В. «Вольт-амперные характеристики высоковольтных 4H-SiC p+-no-n+-диодов в режиме лавинного пробоя», ФТП, т. 51, 3, 2017, с. 390 - 394

[15]Yih P.H., Saxena V., and Steckl A.J. «A review of SiC reactive ion etching in fluorinated plasmas», Phys. Status Solidi B, 1997, 202, 605

[16]Pearton S.J. «Process Technology for Silicon Carbide Devices», Chapter 4, ed. C.M. Zetterling, INSPEC, 2002, 85–92

[17]Dohmae S., Shibahara K., Nishino S., and Matsunami H. «Plasma etching of CVD grown cubic SiC single crystals», Jpn. J. Appl. Phys., 1985, 24, L873

[18]Palmour J.W., Davis R.F., Wallett T.W. and Bhasin K.B. «Dry etching of β-SiC in CF4 and CF4+O2 mixtures», J. Vac. Sci. Technol. A, 1986, 4, 590

[19]Palmour J.W., Davis R.F., Astell-Burt P. and Blackborow P. «Surface characteristics of monocrystalline ß-SiC dry etched in fluorinated gases», Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 1987, 76, 185

[20]Kelner G., Binari S.C. and Klein P.H. «Plasma etching of β-SiC», J. Electrochem. Soc., 1987, 134, 253

[21]Yih P.H. and Steckl A.J. «Effects of hydrogen additive on obtaining residue-free reactive ion etching of β-SiC in fluorinated plasmas», J. Electrochem. Soc., 1993, 140, 1813

[22]Wu J., Parsons J.D. and Evans D.R. «Sulfur hexafluoride reactive ion etching of (111) beta-SiC epitaxia layers grown on (111) TiC substrates», J. Electrochem. Soc., 1995, 142, 669

[23]Yih P.H. and Steckl A.J. «Residue-free reactive ion etching of silicon carbide in fluorinated plasmas: II 6H SiC», J. Electrochem. Soc., 1995, 142, 312
[24]Casady J., Luckowski E.D., Bozack M. et al. «Etching of 6H-SiC and 4H-SiC using NF3 in a reactive ion etching system», J. Electrochem. Soc., 1996, 143, 1750
[25]Cao L.H., Li B.H. and Zhao J.H. «Etching of SiC using inductively coupled plasma», J. Electrochem. Soc., 1998, 145, 3609
[26]Wang J.J., Lambers E.S., Pearton S.J. et al. «Inductively coupled plasma etching of bulk 6H-SiC and thin-film SiCN in NF3 chemistries», J. Vac. Sci. Technol., B, 1998, 16, 2204
[27]Khan F.A. and Adesida I. «High rate etching of SiC using inductively coupled plasma reactive ion etching in SF6-based gas mixtures», Appl. Phys. Lett., 1999, 75, 2268
[28]Jiang L.D., Cheung R., Brown R. and Mount A. «Inductively coupled plasma etching of SiC in SF6/O2 and etch-induced surface chemical bonding modifications», J. Appl. Phys., 2003, 93, 1376
[29]Mikami H., Hatayama T., Yano H. et al. «Role of hydrogen in dry etching of silicon carbide using inductively and capacitively coupled plasma», Jpn. J. Appl. Phys., 2005, 44, 3817
[30]Flemish J.R., Xie K. and Zhao J.H. «Smooth etching of single crystal 6H-SiC in an electron cyclotron resonance plasma reactor», Appl. Phys. Lett., 1994, 64, 2315
[31]Flemish J.R. and Xie K. «Profile and morphology control during etching of SiC using electron cyclotron resonant plasmas», J. Electrochem. Soc., 1996, 143, 2620
[32]Lanois F., Lassagne P., Planson D. and Locatelli M.L. «Angle etch control for silicon carbide power devices», Appl. Phys. Lett., 1996, 69, 236
[33]Wang J.J., Lambers E.S., Pearton S.J. et al. «High rate etching of SiC and SiCN in NF3 inductively coupled plasmas», Solid State Electron., 1998, 42, 743
[34]Manos D.M. and Flamm D.J. «Plasma Etching», Academic Press, 1989

[35]Kimoto T., Cooper J.A. «Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, devices and applications», John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, (2014)
[36]Kawahara K., Krieger M., Suda J. and Kimoto T. «Deep levels induced by reactive ion etching in n- and p-type 4H–SiC», J. Appl. Phys., 2010, 108, 023706
[37]Kawada Y., Tawara T., Nakamura S. et al. «Shape control and roughness reduction of SiC trenches by high-temperature annealing», Jpn. J. Appl. Phys., 2009, 48, 116508
[38]Hiyoshi T., Hori T., Suda J. and Kimoto T. «Simulation and experimental study on the junction termination structure for high-voltage 4H-SiC PiN diodes», IEEE Trans. Electron Devices, 2008, 55, 1841
[39]Yan F., Qin C., Zhao J.H. and Weiner M. «A novel technology for the formation of a very small bevel angle for edge termination», Mater. Sci. Forum, 2002, 389–393, 1305
[40]Crofton J., McMullin P.G., Williams J.R. and Bozack M.J. «High-temperature ohmic contact to n-type 6H-SiC using nickel», J. Appl. Phys., 1995, 77, 1317
[41]Porter L.M. and Davis R.F. «A critical review of ohmic and rectifying contacts for silicon carbide», Mater. Sci. Eng.: B, 1995, 34, 83
[42]Crofton J., Porter L.M. and Williams J.R. «The physics of ohmic contacts to SiC», Phys. Status Solidi (B), 1997, 202, 581
[43]Cole M.W. and Joshi P.C. «The physics of ohmic contacts to SiC», Silicon Carbide, Materials, Processing, and Devices (eds Z.C. Feng and J.H. Zhao), Taylor & Francis Group, 2004, p. 203
[44]Tanimoto S., Okushi H. and Arai K. «Ohmic Contacts for Power Devices on SiC», Silicon Carbide – Recent Major Advances (eds W.J. Choyke, H. Matsunami and G. Pensl), Springer, 2004, p. 651
[45]Roccaforte F., La Via F. and Raineri V. «Ohmic contacts for power devices on SiC», Int. J. High Speed Electron. Syst., 2005, 15, 781

[46]Tanimoto S. and Ohashi H. «Reliability issues of SiC power MOSFETs toward high junction temperature operation», Phys. Status Solidi A, 2009, 206, 2417
[47]Kelner G., Binari S., Shur M. and Palmour J.W. «High temperature operation of alpha-silicon carbide buried-gate junction field-effect transistors», Electron. Lett., 1991, 27, 1038
[48]Uemoto T. «Reduction of ohmic contact resistance on n-type 6H-SiC by heavy doping», Jpn. J. Appl. Phys., 1995, 34, L7
[49]Roccaforte F., La Via F., Raineri V. et al. «Improvement of high temperature stability of nickel contacts on n-type 6H-SiC», Appl. Surf. Sci., 2001, 184, 295
[50]Han S.Y., Kim K.H., Kim J.K. et al. «Ohmic contact formation mechanism of Ni on n-type 4H-SiC», Appl. Phys. Lett., 2001, 79, 1816
[51]Tanimoto S., Kiritani N., Hoshi M. and Okushi H. «Ohmic contact structure and fabrication process applicable to practical SiC devices», Mater. Sci. Forum, 2002, 389–393, 879
[52]Kiritani N., Hoshi M., Tanimoto S. et al. «Single material ohmic contacts simultaneously formed on the source/p-well/gate of 4H-SiC vertical MOSFETs», Mater. Sci. Forum, 2003, 433–436, 669
[53]Reshanov S.A., Emtsev K.V., Konstantin V. et al. «Effect of an intermediate graphite layer on the electronic properties of metal/SiC contacts», Phys. Status Solidi B, 2008, 245, 1369
[54]Козловский В.В., Иванов П.А., Румянцев Д.С., Ломасов В.Н., Самсонова Т.П. «Стимулирование металлургических реакций на интерфейсе Ni-SiC протонным облучением», ФТП, т.38, в.7, 2004, с. 778-783
[55]Luckowski E.D., Williams J.R., Bozack M.J. et al. «Improved nickel silicide ohmic contacts to n-type 4H and 6H-SiC using nichrome», Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 1996, 423, 119
[56]Moki A., Shenoy P., Alok D. et al. «Low resistivity as-deposited ohmic contacts to 3C-SiC», J. Electron. Mater., 1995, 24, 315

[57]Lee S.K., Zetterling C.M. and Östling M. «Low resistivity ohmic titanium carbide contacts to n- and p-type 4H-silicon carbide», Solid State Electron., 2000, 44, 1179
[58]Jang T., Porter L.M., Rutsch G.W.M. and Odekirk B. «Tantalum carbide ohmic contacts to n-type silicon carbide», Appl. Phys. Lett., 1999, 75, 3956
[59]Baud L., Billon T., Lassagne P. et al. «Low contact resistivity W ohmic contacts to n-type 6H-SiC», Inst. Phys. Conf. Ser., 1996, 142, 597
[60]Kriz J., Scholz T., Gottfried K. et al. «Metal disilicide contacts to 6H-SiC», Mater. Sci. Forum, 1998, 264–268, 775
[61]Nakatsuka O., Koide Y. and Murakami M. «CoAl ohmic contact materials with improved surface morphology for p-type 4H-SiC», Mater. Sci. Forum, 2002, 389–393, 885
[62]Nakata T., Koga K., Matsushita Y. et al. «Single crystal growth of 6H-SiC by a vacuum sublimation method, and blue LEDs», Amorphous and Crystalline Silicon Carbide and Related Materials II, Springer, 1988, p. 26
[63]Suzuki A., Fujii Y., Saito H. et al. «Effect of the junction interface properties on blue emission of SiC blue LEDs grown by step-controlled CVD», J. Cryst. Growth, 1991, 115, 623
[64]Crofton J., Barnes P.A., Williams J.R. and Edmond J.A. «Contact resistance measurements on p-type 6H-SiC», Appl. Phys. Lett., 1993, 62, 384
[65]Tsukimoto S., Sakai T. and Murakami M. «Electrical properties and microstructure of ternary Ge/Ti/Al ohmic contacts to p-type 4H–SiC», J. Appl. Phys., 2004, 96, 4976
[66]Tsukimoto S., Ito K., Wang Z. et al. «Growth and microstructure of epitaxial Ti3SiC2 contact layers on SiC», Mater. Trans., 2009, 50, 1071
[67]Ewing D.J., Porter L.M., Wahab Q. et al. «Inhomogeneities in Ni/4H-SiC Schottky barriers: Localized Fermi-level pinning by defect states», J. Appl. Phys., 2007, 101, 114514

[68]Bahng W., Cheong H.J., Kang I.H., Kim S.J., Kim S.C., Joo S.-J., and Kim N.-K., «Modification of Surface Layer during High Temperature Annealing and its Effects on the SiC Diode Characteristics», Mater. Sci. Forum, 2007, 556 - 557, 595
[69]Negoro Y., Katsumoto K., Kimoto T. and Matsunami H. «Flat Surface after High-Temperature Annealing for Phosphorus-Ion Implanted 4H-SiC(0001) using Graphite Cap», Mater. Sci. Forum, 2004, 457–460, 933
[70]Ma X., Sadagopan P. and Sudarshan T.S. «Investigation on barrier inhomogeneities in 4H-SiC Schottky rectifiers» Phys. stat. sol. (a), 2006, 203 (3), 643
[71]Wahab Q., Kimoto T., Ellison A., Hallin C., Tuominen M., Yakimova R., Henry A., Bergman J.P. and Janzen E. «A 3 kV Schottky barrier diode in 4H-SiC» Appl. Phys. Lett., 1998, 72 (4), 445
[72]Иванов П.А., Потапов А.С., Самсонова Т.П. «Анализ прямых вольт-амперных характеристик неидеальных барьеров Шоттки Ti/4H-SiC», ФТП, 2009, 43, 197
[73]Roccaforte F., La Via F., Raineri V., Musumeci P., Calcagno L. and Condorelli G.G. «Highly reproducible ideal SiC Schottky rectifiers: Effects of surface preparation and thermal annealing on the Ni/6H-SiC barrier height», Appl. Phys. A, 2003, 77, 827
[74]Vassilevski K., Nikitina I., Bhatnagar P., Horsfall A., Wright N., O'Neill A.G., Uren M., Hilton K., Munday A., Hydes A. and Johnson C.M. «High Temperature Operation of Silicon Carbide Schottky Diodes with Recoverable Avalanche Breakdown», Mater. Sci. Forum, 2006, 527-529, 931
[75]Zhang Q. and Sudarshan T.S. «The influence of high-temperature annealing on SiC schottky diode characteristics», J. Elec. Mat., 2001, 30 (11), 1466
[76]Roccaforte F., La Via F., Baeri A., Raineri V., Calcagno L., Mangano F., «Structural and electrical properties of Ni⁄Ti Schottky contacts on silicon carbide upon thermal annealing», Journ. of Appl. Phys., 2004, 96, 4313

[77]Vassilevski K.V., Horsfall A.B., Johnson C.M., Wright N.G., O'Neil A.G., «4H-SiC rectifiers with dual metal planar Schottky contacts», IEEE Trans. on Electron Devices, 2002, 49, 947
[78]Perrone D., Naretto M., Ferrero S., Scaltrito L., Pirri C.F. «4H-SiC Schottky Barrier Diodes Using Mo-, Ti- and Ni-Based Contacts», Materials Science Forum, 2009, 615 - 617, 647
[79]Потапов А.С., Иванов П.А., Самсонова Т.П. «Влияние отжига на эффективную высоту барьера и фактор неидеальности никелевых контактов Шоттки к 4H-SiC», ФТП, 2009, 43, 640
[80]Иванов П.А., Ильинская Н.Д., Потапов А.С., Самсонова Т.П., Афанасьев А.В., Ильин В.А. «Влияние быстрой термообработки на вольт-амперные характеристики 4H-SiC-диодов с барьером Шоттки», ФТП, 2013, 47, 83
[81]Hiyoshi T. and Kimoto T. «Reduction of deep levels and improvement of carrier lifetime in n-type 4H-SiC by thermal oxidation», Appl. Phys. Express, 2009, 2, 041101
[82]Song Y., Dhar S., Feldman L.C. et al., «Modified Deal-Grove model for the thermal oxidation of silicon carbide», J. Appl. Phys., 2004, 95, 4953
[83]Von Münch W. and Pfaffeneder I. «Thermal oxidation and electrolytic etching of silicon carbide», J. Electrochem. Soc., 1975, 122, 642
[84]Deal B.E. and Grove A.S. «General relationship for the thermal oxidation of silicon», J. Appl. Phys., 1965, 36, 3770
[85]Nicollian E.H. and Brews J.R. «MOS Physics and Technology», John Wiley & Sons, Inc., New York, 1982
[86]Powell J.A., Petit J.B., Edgar J.H. et al. «Application of oxidation to the structural characterization of SiC epitaxial films», Appl. Phys. Lett., 1991, 59, 183
[87]Nakano Y., Nakamura T., Kamisawa A. and Takasu H. «Investigation of pits formed at oxidation on 4H-SiC», Mater. Sci. Forum, 2009, 600–603, 377
[88]Troffer T., Schadt M., Frank T. et al. «Doping of SiC by implantation of boron and aluminum», Phys. Status Solidi A, 1997, 162, 277

[89]Kumar R., Kojima J. and Yamamoto T. «Novel diffusion resistant p-base region implantation for accumulation mode 4H–SiC epi-channel field effect transistor», Jpn. J. Appl. Phys., 2000, 39, 2001
[90]Kimoto T., Takemura O., Matsunami H. et al. «Al+ and B+ implantations into 6H-SiC epilayers and application to pn junction diodes», J. Electron. Mater., 1998, 27, 358
[91]Hölzlein K., Mitlehner H., Rupp R. et al. «Annealing behavior and electrical properties of boron implanted 4H-SiC-layers», Inst. Phys. Conf. Ser., 1996, 142, 561
[92]Peters D., Schörner R., Hölzlein K.H. and Friedrichs P. «Planar aluminum-implanted 1400V 4H-SiC p-n diodes with low on resistance», Appl. Phys. Lett., 1997, 71, 2996
[93]Kimoto T., Miyamoto N., Saitoh A. and Matsunami H. «High-energy (MeV) Al and B ion implantations into 4H-SiC and fabrication of pin diodes», J. Appl. Phys., 2002, 91, 4242
[94]Negoro Y., Kimoto T., Matsunami H. et al. «Electrical activation of high-concentration aluminum implanted in 4H-SiC», J. Appl. Phys., 2004, 96, 4916
[95]Capano M.A., Ryu S.-H., Melloch M.R. et al. «Dopant activation and surface morphology of ion implanted 4H- and 6H-silicon carbide», J. Electron. Mater., 1998, 27, 370
[96]Alok D. and Baliga B.J. «A Planar, Nearly Ideal, Sic Device Edge Termination», Proceedings of 1995 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, Yokohama, 1995
[97]Alok D. and Baliga B.J. «SiC Device Edge Termination Using Finite Area Argon Implantation», IEEE transaction on electron devices, v. 44, n. 6, june 1997
[98]Temple V.A.K. «Junction termination extension (JTE): a new technique for increasing avalanche breakdown voltage and controlling surface electric fields in p-n junctions», International Electron Devices Meeting Technical Digest, 1977, pp. 423–426

[99]Wang X. and Cooper J.A. «Optimization of JTE edge termination for 10 kV power devices in 4H-SiC», Mater. Sci. Forum, 2004, 457–460, 1257–1262
[100]Sung W., Van Brunt E., Baliga B.J. and Huang A.Q. «A new edge termination technique for high-voltage devices in 4H-SiC-multiple-floating-zone junction termination extension», IEEE Electron. Device Lett., 2011, 32 (7), 880–882
[101]Feng G., Suda J. and Kimoto T. «Space-modulated junction termination extension for ultra-high voltage p-i-n diodes in 4H-SiC», IEEE Trans. Electron. Devices, 2012, 59 (2), 414–418
[102]Козлов В.А., Козловский В.В. «Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и alpha-частицами. Обзор», ФТП, 2001, 35, 769
[103]Kaneko H., Kimoto T. «Formation of a semi-insulating layer in n-type 4H-SiC by electron irradiation», Appl. Phys. Lett., 2011, 98, 262106
[104]Kozlovski V.V., Lebedev A.A., Bogdanova E.V. «Model for conductivity compensation of moderately doped n- and p-4H-SiC by high-energy electron bombardment», Journal of Appl. Phys., 2015, 117, 155702
[105]Лебедев А.А., Вейнгер А.И., Давыдов Д.В., Козловский В.В., Савкина Н.С., Стрельчук А.М. «Радиационные дефекты в n-4H-SiC, облученном протонами с энергией 8 МэВ», ФТП, 2000, 34, 1058
[106]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, 2016, 50, 937
[107]Ламперт М., Марк П. «Инжекционные токи в и твердых телах», М., Мир, 1973, стр. 416
[108]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», ФТП, 2021, т.55, 2 стр. 188-194

[109]Иванов П.А., Потапов А.С., Кудояров М.Ф., Козловский М.А., Самсонова Т.П. «Влияние термообработки на электрические характеристики полуизолирующих слоев, полученных с помощью облучения n-SiC высокоэнергетическими ионами аргона», Письма в ЖТФ, 2018, 44, вып. 6, стр.11
[110]http://www.silvaco.com
[111]Caughey D.M., Thomas R.E. «Generalizations of random store and forward communication networks», Proc. IEEE, 1967, 55, 2192
[112]Мнацаканов Т.Т., Левинштейн М.Е., Поморцева Л.И., Юрков С.Н. «Универсальный метод аналитической аппроксимации подвижности основных носителей заряда в полупроводниках в широком диапазоне температур и уровней легирования», ФТП, 2004, 38, 56
[113]Ivanov P.A., Potapov A.S., Samsonova T.P., Grekhov I.V. « Electric-field dependence of electron drift velocity in 4H–SiC», Solid-State Electron., 2016, 123, 15
[114]Selberherr S. «Analysis and Simulation of Semiconductor Devices», Springer-Verlag, 1984
[115]Иванов П.А., Лебедева Н.М. «TCAD-моделирование высоковольтных 4H-SiC диодов с охранной полуизолирующей областью», ФТП, 2021, т.55, 2 стр. 201-206
[116]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, 2018, vol. 148, pp. 51-57
[117]Wei R., Song S., Yang K. et al. «Thermal conductivity of 4H-SiC single crystals», J. Appl. Phys, 2013, V. 113, 053503
[118]Иванов П.А., Кудояров М.Ф., Лебедева Н.М., Ильинская Н.Д., Самсонова Т.П. «Высоковольтные лавинные 4H-SiC-диоды с охранной полуизолирующей областью», Письма ЖТФ, 2021, т.47, 6 стр: 48-50

[119]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
[120]Иванов П.А., Ильинская Н.Д., Потапов А.С., Самсонова Т.П., Афанасьев А.В., Ильин В.А. «Влияние быстрой термообработки на вольт-амперные характеристики 4H-SiC-диодов с барьером Шоттки», ФТП, 2013, том 47, вып. 1, стр. 83-86
[121]Иванов П.А., Потапов А.С., Кудояров М.Ф., Козловский М.А., Самсонова Т.П. «Влияние термообработки на электрические характеристики полуизолирующих слоев, полученных с помощью облучения n-SiC высокоэнергетическими ионами аргона», Письма в ЖТФ, 2018, том 44, вып. 6, стр. 11-16
[122]Родерик Э.Х. «Контакты металл – полупроводник», Радио и связь, М., 1982
[123]Иванов П.А., Грехов И.В., Коньков О.И., Потапов А.С., Самсонова Т.П., Семенов Т.В. «Вольт-амперные характеристики высоковольтных 4H-SiC-диодов с барьером Шоттки высотой 1.1 эВ», ФТП, 2011, том 45, вып. 10, стр. 1427-1430
[124]Baliga B.J. «Analysis of a high-voltage merged p-i-n/Schottky (MPS) rectifier», IEEE Electron Dev. Lett., 1987, 8, 407
[125]Сыркин А.Л., Попов И.В., Челноков В.Е. «Реактивное ионно-плазменное травление карбида кремния», Письма ЖТФ, 1986, 12, 240
[126]Palmour J.W., Davis R.F., Wallett T.M., Bhasin K.B., Vac J. «Dry etching of β-SiC in CF4 and CF4+O2 mixtures», Sci. Technol. A, 1986, 4, 590
[127]Pan W.S., Steckl A.J., SPP «Amorphous and Crystalline Silicon Carbide», ed. by M.M. Rahman, C.Y.-W. Yang and G.L. Harris, Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 1989, v. 43, p. 217
[128]Ивановский Г.Ф., Петров В.И. «Ионно-плазменная обработка материалов», Радио и связь, М., 1986

[129]Иванов П.А., Челноков В.Е. «Полупроводниковый карбид кремния: технология и приборы. Обзор», ФТП, 1995, 29, 1921
[130]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
[131]Shockley W. «A Unipolar "Field-Effect" Transistor», Proc. IRE, 1952, 40, 1365
[132]Блихер А. «Физика силовых биполярных и полевых транзисторов», Энергоатомиздат, Л., 1986
[133]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
[134]Евсеев Ю.А., Дерменжи П.Г. «Силовые полупроводниковые приборы», М.: Энергоатомиздат, 1981, стр. 472
[135]Орлов А.М., Костишко Б.М., Скворцов А.А. «Физические основы технологии полупроводниковых приборов и интегральных микросхем», учебное пособие, 2-е изд., Ульяновск: УлГУ, 2014, стр. 423
[136]Иванов П.А., Коньков О.И., Самсонова Т.П., Потапов А.С. «Высоковольтные (1600 V) размыкатели тока с субнаносекундным (150 ps) быстродействием на основе 4H-SiC», Письма в ЖТФ, 2018, 44, 3
[137]Грехов И.В., Иванов П.А., Ильинская Н.Д., Коньков О.И., Потапов А.С., Самсонова Т.П. «Высоковольтные (900 В) 4H-SiC диоды Шоттки с охранным p-n-переходом, изготовленным имплантацией бора», ФТП, 2008, 42, стр. 211
[138]Моро У. «Микролитография: Принципы, методы, материалы», М: Мир, 1990, стр. 1237
[139]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

[140]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

[141]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