

Микропрофилирование 4H-SiC сухим травлением в технологии формирования структуры полевого транзистора с затвором Шоттки

© Н.Д. Ильинская, Н.М. Лебедева, Ю.М. Задиранов, П.А. Иванов, Т.П. Самсонова,
О.И. Коньков, А.С. Потапов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Natali_lebedeva@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 23 июля 2019 г.

В окончательной редакции 29 июля 2019 г.

Принята к публикации 29 июля 2019 г.

Описаны способы микропрофилирования эпитаксиальных структур 4H-SiC: формирование мезаструктур с наклонными стенками (угол наклона стенки от вертикали $> 45^\circ$) с помощью реактивного ионно-плазменного травления; травление мезаструктур с плоским дном и наклонными стенками (угол наклона стенки от вертикали $< 45^\circ$) методами ионно-лучевого и реактивного ионно-плазменного травления. Показано применение разработанных методов в технологии изготовления меза-эпитаксиальных полевых транзисторов с затвором Шоттки на основе 4H-SiC.

Ключевые слова: травление SiC, полевые СВЧ транзисторы, мезаструктуры.

DOI: 10.21883/FTP.2020.01.48783.9223

1. Введение

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 [1]. Важно, что для создания целого ряда силовых, импульсных и СВЧ приборов альтернативы карбиду кремния среди других широкозонных полупроводниковых материалов (таких как III-нитриды, алмаз и др.) в настоящее время нет. Однако 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 — совершенно непригоден в приборной технологии. 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 CF₄, SF₆ и др. [2,3]. Травление SiC во фторсодержащих газах происходит по механизму реактивного ионно-плазменного травления

(РИПТ), который сочетает в себе химические реакции и прямое физическое распыление [4]. Атомы Si удаляются с поверхности за счет химической реакции ионов F⁺ с SiC и образованием летучих молекул SiF₄, а атомы C — за счет их преимущественного физического распыления ионами F⁺.

Травление SiC методом РИПТ имеет характерные особенности, которые необходимо учитывать в технологии формирования приборов некоторых типов на основе 4H-SiC.

При селективном травлении разных материалов методом РИПТ (в том числе карбида кремния), как правило, образуются канавки у основания протравливаемой ступеньки [5]. Данный эффект провоцируется мощным потоком ионов 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. Однако при травлении канала 4H-SiC полевого транзистора с затвором Шоттки (ПТШ) образование подобных канавок недопустимо, поскольку толщина канала 4H-SiC полевого транзистора обедненного типа (в том числе ПТШ) обычно составляет 0.2–0.3 мкм [6], в то время как глубина канавок у истокового и стокового выступов может достигать единиц микрометров.

Другая особенность селективного травления SiC методом РИПТ состоит в том, что стенка протравливаемой ступеньки получается строго вертикальной (при травлении через маску 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). В то же время при формировании структуры меза-

эпитаксиального ПТШ на основе $4H$ -SiC боковые стенки протравленных структур должна быть наклонными.

Способы формирования ступенек с наклонными стенками с помощью сухого травления карбида кремния в литературе не представлены. Цель настоящей работы состояла в том, чтобы разработать технологию микропрофилирования $4H$ -SiC (с заданным геометрическим профилем) методами сухого травления и представить результаты на примере $4H$ -SiC-ПТШ.

2. Структура полевого транзистора с затвором Шоттки на основе $4H$ -SiC

На рис. 1 показана типовая конструкция меза-эпитаксиального ПТШ.

Эпитаксиальная структура состоит из полуизолирующей подложки $4H$ -SiC, слабо легированного буферного слоя p -типа проводимости, умеренно легированного канального слоя n -типа проводимости и сильно легированного подконтактного n^+ -слоя. Активный канал локализован в n -слое, в котором с помощью сухого травления вытравлена канавка на определенную глубину. На дне канавки формируется металлический затвор Шоттки, управляющий проводимостью канала. Омические контакты истока и стока изготавливаются на n^+ -слое. Буферный p -слой служит в качестве изолирующего слоя между канальным слоем и подложкой. Изоляция дискретных транзисторных структур осуществляется травлением мезаструктур до полуизолирующей подложки. Стенки протравленных структур делают наклонными (с углом как более, так и менее 45° от вертикали), для того чтобы с помощью напыления вывести на полуизолятор металлические контактные площадки электродов истока, стока и затвора.

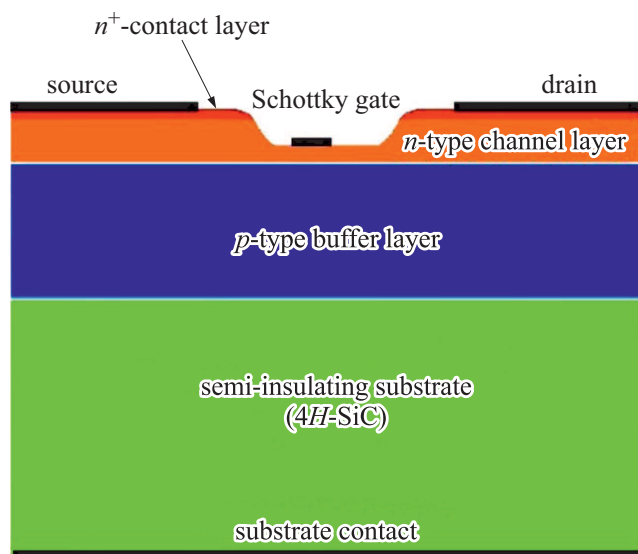


Рис. 1. Схематический поперечный разрез ПТШ на основе $4H$ -SiC.

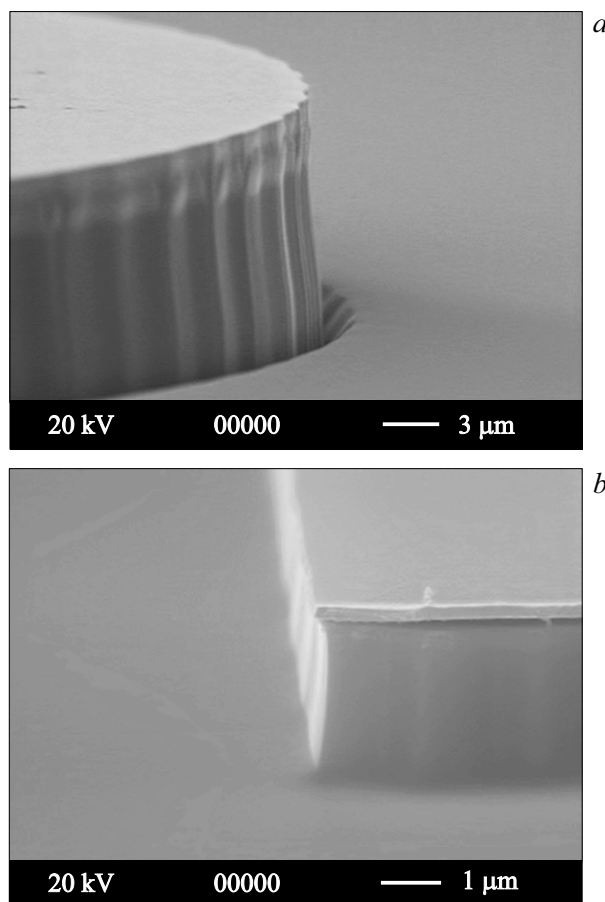


Рис. 2. Изображение края мезаструктуры, протравленной методом РИПТ: *a* — эксперимент 1, *b* — эксперимент 2.

3. Травление мезаструктур методами реактивного ионно-плазменного и ионно-лучевого травления

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.

В эксперименте 1 были выбраны следующие параметры РИПТ: давление газа — 0.2 Па, соотношение потоков SF_6/O_2 — 3, мощность генератора — 7 кВт, маскирующий материал — пленка никеля толщиной 300 нм. При указанных параметрах процесса была достигнута скорость травления ~ 2.2 мкм/ч при селективности травления по отношению к никелю приблизительно 1 : 80. На рис. 2, *a* приведено изображение протравленной мезы 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, как видно, близок к верти-

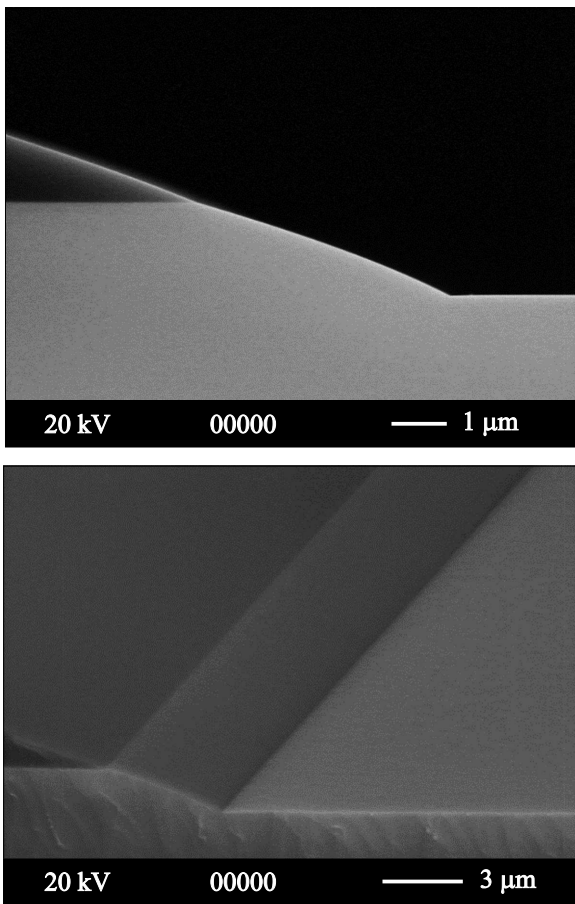


Рис. 3. Профили ионно-лучевого травления мезоструктур.

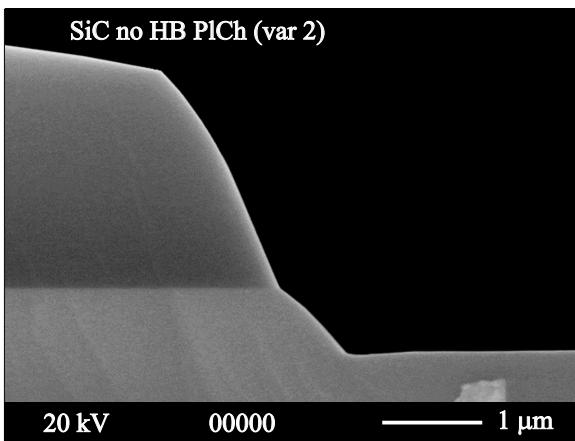


Рис. 4. Профиль канала при использовании РИПТ.

кальному. Однако у основания стенки мезоструктуры образуется треугольная по форме канавка, имеющая ширину и глубину ~ 1.5 мкм. В эксперименте 2 были выбраны такие параметры процесса травления: давление газа — 3 Па, соотношение потоков SF_6/O_2 — 30, мощность генератора — 7 кВт. При указанных параметрах процесса была достигнута скорость травления ~ 2.3 мкм/ч. На

рис. 2, *b* приведено изображение протравленной мезы высотой ~ 2 мкм, полученное с помощью растрового электронного микроскопа CamScan. Видно, что в отличие от эксперимента 1 канавка у основания ступеньки не образуется, однако имеется явно выраженный подтрав под маску. 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. Следует отметить, что

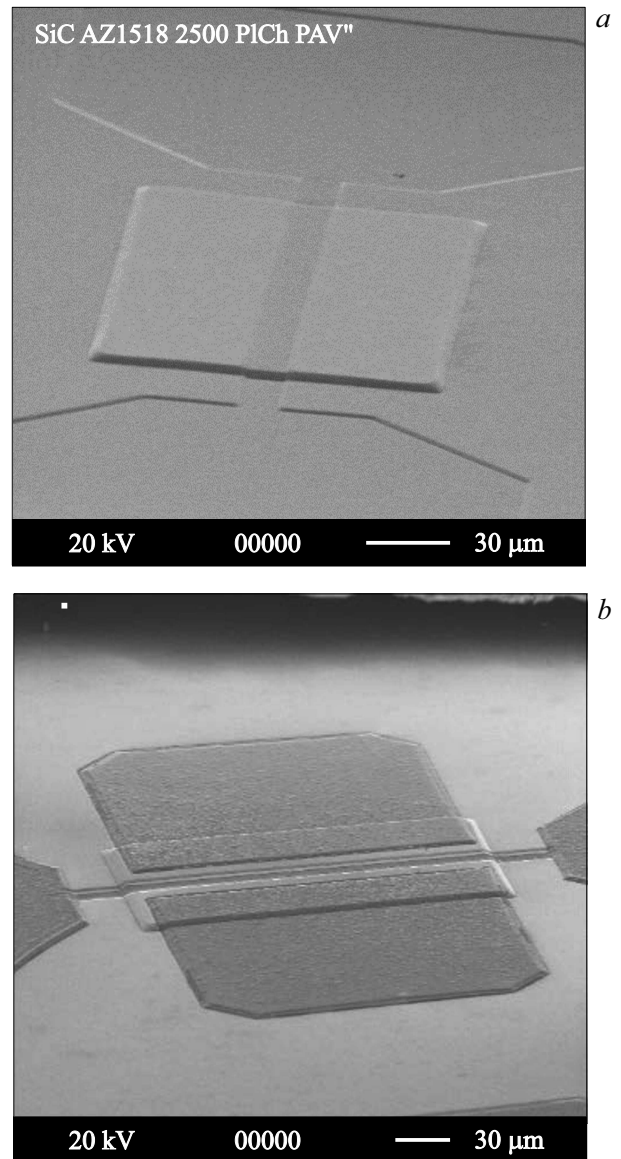


Рис. 5. Изображения профилированной структуры 4H-SiC (*a*) и готового 4H-SiC-ПТШ (*b*).

особенностью ПХТ является относительно невысокая анизотропия процесса.

Для травления мезаструктур с наклонными стенками были проведены эксперименты по ионно-лучевому травлению (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. В этом случае 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. 3.

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

Как вариант в случае РИПТ $4H$ -SiC в смеси гексафторида серы и кислорода в качестве маски использовался слой фоторезиста (рис. 4). В отличие от металлической маски (рис. 2, а), стенки получаются гладкими, их наклон $< 45^\circ$ от вертикали. Глубина травления составляет ~ 0.6 мкм.

На рис. 5, а показана готовая профилированная структура, а на рис. 5, б — готовый дискретный ПТШ на основе $4H$ -SiC.

4. Электрические характеристики полевого транзистора с затвором Шоттки на основе $4H$ -SiC

Параметры эпитаксиальной структуры, на основе которой изготавливались транзисторные чипы, следующие: удельное сопротивление полуизолирующей подложки $\sim 10^5$ Ом·см; буферный эпитаксиальный p -слой, легирование $\sim 10^{15}$ см $^{-3}$, толщина 0.5 мкм; канальный эпитаксиальный n -слой, легирование $\sim 10^{17}$ см $^{-3}$, толщина 0.5 мкм; подконтактный эпитаксиальный n^+ -слой, легирование $\sim 10^{19}$ см $^{-3}$, толщина 0.5 мкм.

На рис. 6 показана прямая вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода затвор–исток, измеренная на постоянном токе при комнатной температуре.

На участке, предшествующем ограничению тока последовательным сопротивлением канала, измеренная ВАХ была аппроксимирована по формуле, описывающей ток термоэлектронной эмиссии в барьерах Шоттки [7]:

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

где q — элементарный заряд, V — приложенное напряжение (положительное для прямого направления и отрицательное для обратного), T — абсолютная температура, k — константа Больцмана (ток насыщения I_0 и

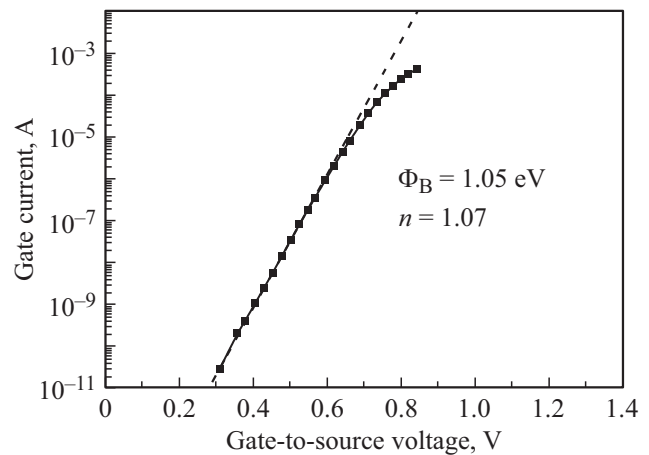


Рис. 6. Прямая ВАХ диода затвор–исток.

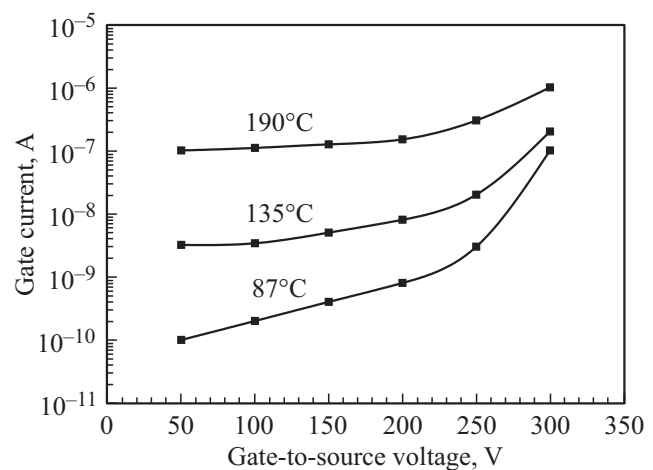


Рис. 7. Обратные ВАХ диода исток–затвор (сток оборван).

фактор идеальности n выступали в качестве подгоночных параметров). Рассчитанный из прямой ВАХ фактор идеальности составляет $n \approx 1.07$. В теории термоэлектронной эмиссии ток насыщения I_0 задается высотой барьера Шоттки (Φ_B):

$$I_0 = SA^* T^2 \exp \left(- \frac{\Phi_B}{kT} \right), \quad (2)$$

где A^* — константа Ричардсона, S — площадь контакта Шоттки. Рассчитанная из прямой ВАХ высота барьера равна $\Phi_B \approx 1$ эВ.

На рис. 7 показаны обратные ВАХ диода затвор–исток, измеренные при напряжениях до 300 В и температурах до 190°C. Отметим, что при малых напряжениях заметный обратный ток появлялся лишь при температуре $\sim 90^\circ\text{C}$, при этом на всех характеристиках проявляется отчетливая тенденция к насыщению обратного тока в соответствии с формулой (1). Рост обратного тока начинался при напряжении ~ 250 В, при котором максимальное электрическое поле в промежутке сток–затвор достигало величины $\sim 1.5 \cdot 10^6$ В/см (эта

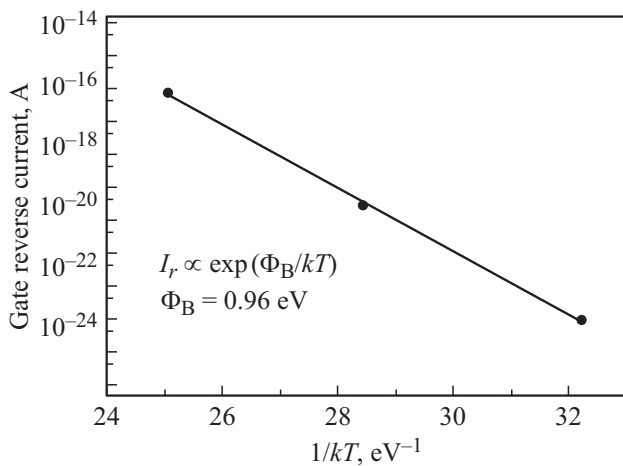


Рис. 8. Термоактивационная зависимость обратного тока I_r диода исток–затвор.

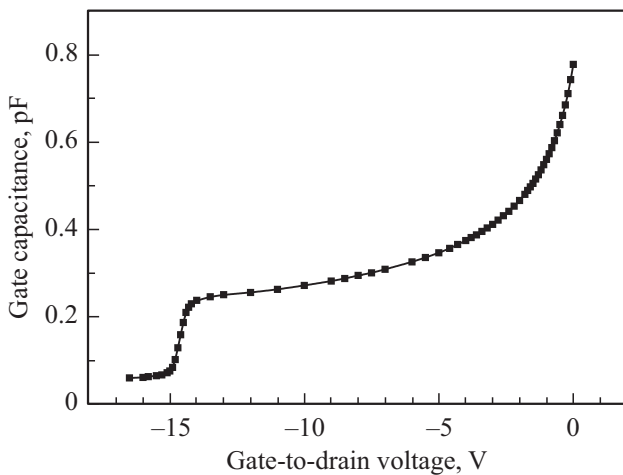


Рис. 9. ВФХ диода затвор–исток на частоте 1 МГц.

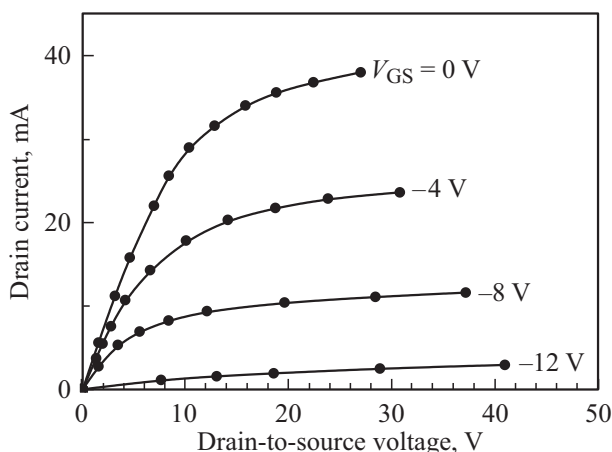


Рис. 10. Выходные ВАХ 4H-SiC-ПТТШ.

величина близка к критическому полю лавинного пробоя в 4H-SiC [8]). На рис. 8 точками показана зависимость обратного тока, измеренного при напряжении 50 В, от

обратной температуры (график Ричардсона). По наклону этой зависимости можно определить высоту барьера: $\Phi_B = 0.96$ эВ, что совпадает с величиной Φ_B , полученной из анализа прямой ВАХ. Таким образом, прямые и обратные ВАХ барьера Шоттки оказались близкими к идеальным, что свидетельствует о высоком качестве подготовки поверхности канала перед формированием контакта Шоттки.

На рис. 9 показана вольт-фарадная характеристика (ВФХ) диода затвор–сток, 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 запираения 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.

Выходные ВАХ транзисторов измерялись на коротких импульсах во избежание их 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 их повторения — 1 Гц. Измеренные таким образом импульсные ВАХ одного из транзисторов показаны на рис. 10. 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 выходит на насыщение при напряжениях на стоке $V_{DS} = -V_{GS} + V_T$, что соответствует классической модели Шокли [9], описывающей ВАХ длинноканального полевого транзистора обедненного типа.

5. Заключение

В заключение можно отметить следующее. В настоящее время в мире большое внимание уделяется созданию полевых СВЧ транзисторов на основе гетероструктур AlGaIn/GaN. Однако при всех достоинствах „нитридных“ транзисторов карбидкремниевые 4H-SiC-ПТШ могут быть конкурентоспособными в тех областях техники, где необходимы мощные, высокотемпературные, радиационно стойкие высокочастотные транзисторы.

Разработанные технологические способы микропрофилирования карбида кремния потенциально пригодны и для других приборов. В частности, формирование конусообразных мезаструктур с наклонными стенками может оказаться востребованным для создания высоковольтных вертикальных диодов и транзисторов с так

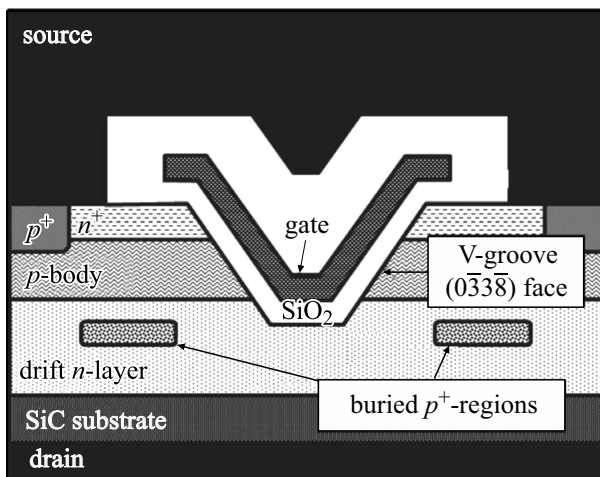


Рис. 11. МОП транзистор с V-образной канавкой, формируемой газовым травлением при высокой температуре [11].

называемой „положительной“ фаской [10], предотвращающей поверхностный пробой. Известна конструкция МОП-транзистора на основе 4H-SiC с V-образной канавкой (рис. 11, [11]), которая формируется с помощью газового (хлорного) химического травления при высокой температуре. Процесс травления самоорганизованный, стенки канавки при таком травлении получаются гладкими и наклонными, с ориентацией $(0\bar{3}3\bar{8})$. Плотность состояний на интерфейсе SiO_2/SiC оказывается меньше по сравнению с вертикальными стенками, а подвижность электронов соответственно выше. Очевидно, что разработанные в настоящей работе низкотемпературные способы микропрофилирования могут быть альтернативой высокотемпературному газовому травлению.

Наконец, формирование микроструктур с наклонными стенками позволяет проводить исследовательские работы, например, электронно-зондовые исследования эпитаксиальных $p-n$ -структур.

Благодарности

Авторы выражают благодарность О.Ю. Серебренниковой за помощь при изготовлении образцов и С.И. Трошкову за получение электронно-микроскопических изображений протравленных структур.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T. Kimoto, J.A. Cooper. *Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices, and applications*, 1st edn (Wiley-IEEE Press, 1 2014).
- [2] А.Л. Сыркин, И.В. Попов, В.Е. Челноков. Письма ЖТФ, **12**, 240 (1986).

- [3] J.W. Palmour, R.F. Davis, T.M. Walleit, K.B. Bhasin. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **4**, 590 (1986).
- [4] W.S. Pan, A.J. Steckl. *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.
- [5] Г.Ф. Ивановский, В.И. Петров. *Ионно-плазменная обработка материалов* (М., Радио и связь, 1986).
- [6] П.А. Иванов, В.Е. Челноков. ФТП, **29**, 1921 (1995).
- [7] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов*. Т. 1. (М., 1984).
- [8] A.O. Konstantinov, Q. Wahab, N. Nordell, U. Linderfelt. *Mater. Sci. Forum*, **264-268**, 513 (1998).
- [9] W. Shockley. *Proc. IRE*, **40**, 1365 (1952).
- [10] А. Блихер. *Физика силовых биполярных и полевых транзисторов* (Л., Энергоатомиздат, 1986).
- [11] H. Yano, T. Hirao, T. Kimoto, H. Matsunami, H. Shiomi. *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 4772 (2002).

Редактор Л.В. Шаронова

Micro-profiling of 4H-SiC by dry etching for formation of a Schottky barrier diode

N.D. Il'inskaya, N.M. Lebedeva, Yu.M. Zadiranov, P.A. Ivanov, T.P. Samsonova, O.I. Kon'kov, A.S. Potapov

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The methods of micro-profiling of 4H-SiC are described including: formation of mesa structures with inclined walls (the angle being $> 45^\circ$ from the vertical) by the reactive ion etching; etching of mesa structures possessing flat bottom and inclined wall (the angle being $< 45^\circ$ from the vertical) by the ion beam and reactive ion etching. The application of the etching methods developed has been demonstrated in fabrication of 4H-SiC based MESFETs.