

Влияние плазменной обработки поверхности карбида кремния на характеристики полевых транзисторов со скрытым $p-n$ -затвором

© П.А. Иванов, О.И. Коньков, В.Н. Пантелеев, Т.П. Самсонова

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

(Получена 11 апреля 1997 г. Принята к печати 16 апреля 1997 г.)

Для SiC полевых транзисторов со скрытым $p-n$ -затвором показана возможность стабилизации зарядового состояния поверхности канала, выступающей в таких транзисторах в роли дополнительного "плавающего" затвора, путем ее обработки в водородной плазме при комнатной температуре. Продемонстрировано, что необходимость такой стабилизации особенно актуальна для транзисторов с относительно низкой концентрацией доноров в канале (высоковольтных), в которых поверхностный заряд может сильно модулироваться напряжением стока из-за влияния короткоканальных эффектов.

1. Введение

Известно, что поверхностные свойства полупроводников оказывают сильное влияние на работу многих электронных приборов на их основе. Поэтому в приборной технологии применяют специальные приемы, направленные на модификацию поверхности с целью получения тех или иных поверхностных свойств. Что касается карбида кремния, то для развития приборов на его основе в настоящее время актуальна задача надежной пассивации (или стабилизации) поверхности SiC в местах выхода на нее активных областей приборов (в особенности, высоковольтных).

В SiC полевых транзисторах со скрытым $p-n$ -затвором, изготовленных разными группами в мире [1], каких-либо специальных мер по стабилизации поверхности канала, как правило, не предпринималось. В то же время следует иметь в виду, что в таких транзисторах канал отсекается областью пространственного заряда (ОПЗ) $p-n$ -затвора на поверхности (рис. 1), зарядовое состояние которой может в принципе изменяться. Это означает, что поверхность выступает в роли дополнительного "плавающего" затвора, так что необходимо предпринимать меры для стабилизации поверхностного заряда. В идеале плотность этого заряда должна быть либо много меньше, либо, напротив, много больше поверхностной плотности доноров в канале, Na (N — объемная плотность доноров, a — толщина канала). В первом случае на поверхности обеспечиваются условия "плоских зон" (так что приповерхностной ОПЗ просто нет), а во втором случае толщина приповерхностной ОПЗ оказывается стабилизированной большим поверхностным зарядом (пиннинг уровня Ферми на поверхности). Надо отметить, что в нескольких работах, посвященных SiC-транзисторам со скрытым $p-n$ -затвором, поверхность канала защищалась термическим окислом (главным образом с целью защиты транзисторов от влияния окружающей среды). Однако для стабилизации поверхностного заряда окисление, по-видимому, пока нельзя считать эффективным методом, поскольку интегральная плотность состояний на интерфейсе $\text{SiO}_2\text{-SiC}$ (порядка 10^{12} cm^{-2} [2]) сравнима с поверхностной плотностью

доноров в канале транзистора. Стабилизация поверхностного заряда особенно актуальна для транзисторов с низкой концентрацией доноров в канале (высоковольтных). Поскольку в таких транзисторах отношение длины канала к толщине обычно меньше, чем в транзисторах с высокой концентрацией доноров (низковольтных), в первых могут сильнее проявляться короткоканальные эффекты, способные влиять на поверхностный заряд.

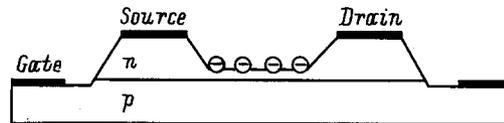


Рис. 1. Схематический вертикальный разрез полевого транзистора со скрытым $p-n$ -переходом в качестве затвора. Показан поверхностный заряд, выступающий в роли дополнительного плавающего затвора.

В наших предыдущих исследованиях было показано, что поверхностные свойства кристаллического карбида кремния могут быть существенно модифицированы обработкой в газоразрядной плазме водорода и гелия. В частности, такая обработка приводила к образованию приповерхностных высокоомных слоев за счет генерации электрически активных точечных дефектов с высокой плотностью [3]. В настоящей работе продемонстрировано, как на характеристики высоковольтных транзисторов со скрытым $p-n$ -затвором влияют: 1) реактивное ионное травление канала в газоразрядной плазме SF_6 и 2) последующая обработка поверхности в плазме водорода.

2. Объект и процедура исследований

Транзисторы изготавливались на основе $6H\text{-SiC}$ -эпитаксиальных структур p^+ (подложка)– n_0 – n^+ , выращенных методом химического осаждения из газовой фазы. Технология изготовления дискретных меза-изолированных транзисторов включала в себя стандартные процедуры формирования омических контактов к истоку, стоку и затвору на основе никеля и селективного

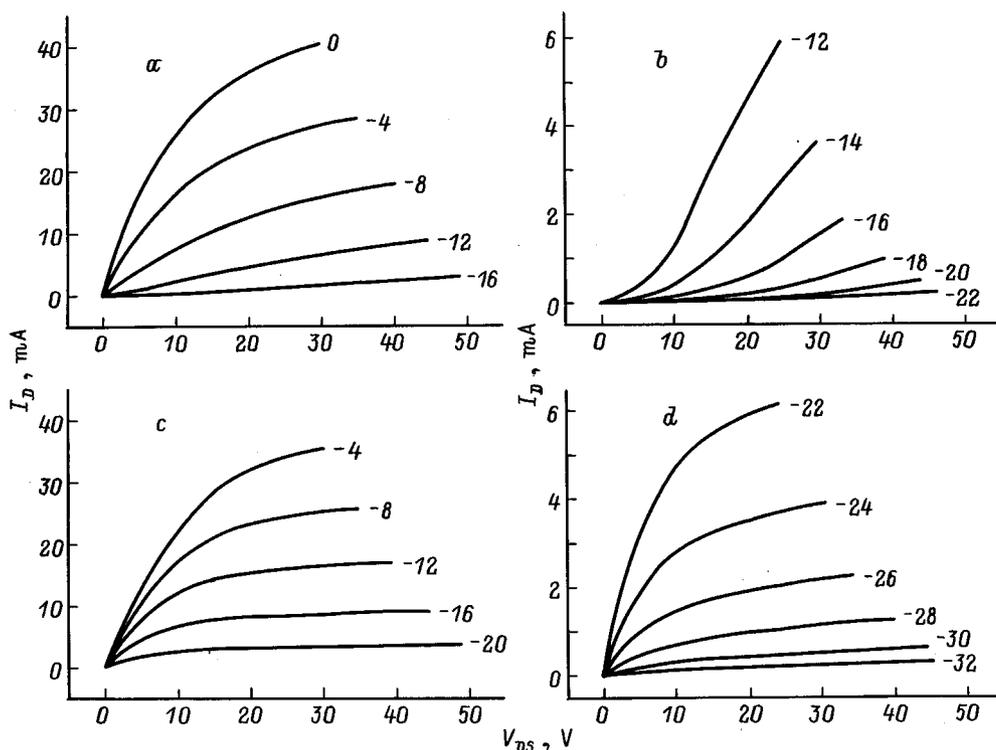


Рис. 2. Типичные выходные вольт-амперные характеристики транзисторов, измеренные после травления канала в SF_6 (*a, b*) и после последующей обработки в водородной плазме (*c, d*). Цифры у кривых — V_{GS} , В.

реактивно-ионного травления SiC в плазме SF_6 . Концентрация доноров в канале составляла $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (отметим, что для низковольтных транзисторов эту величину выбирают приблизительно на порядок большей), длина канала — 5 мкм.

После измерений характеристик транзисторов (измерялись выходные вольт-амперные характеристики и вольт-фарадные характеристики управляющего $p-n$ -перехода) образцы подвергались обработке в водородной плазме с целью модификации поверхностных свойств канала. Параметры этого процесса были следующими: давление водорода в реакционной камере с разрядом на постоянном токе — 2×10^{-3} мм рт.ст.; ускоряющее напряжение между анодом и катодом — 600 В (мощность разряда не превышала 1 Вт/см^2); температура комнатная; время обработки — 1 ч. После этой процедуры вновь проводились измерения характеристик транзисторов для сравнения их с характеристиками, измеренными до обработки в водороде.

Кроме того, для сравнительного анализа изменений поверхностных свойств SiC исследовались вольт-фарадные характеристики контрольных поверхностно-барьерных структур Au-SiC (с использованием пленок $6H\text{-SiC}$ n -типа проводимости, выращенных сублимационной эпитаксией), которые формировались на каждом кристалле до плазменных воздействий, затем после травления в SF_6 и, наконец, после последующей обработки в плазме водорода.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Типичные выходные характеристики изготовленных транзисторов показаны на рис. 2 (измерения проводились при комнатной температуре, с помощью характеристикографа Л2-56).

Характеристики, измеренные до обработки в водороде, имели ряд особенностей, отличающих их от низковольтных транзисторов. Во-первых, отсутствовало отчетливое насыщение тока стока в зависимости от напряжения стока (рис. 2, *a*). При этом вид кривых зависел от заданных параметров измерений, в частности от амплитуды и длительности развертки напряжения стока. Так, при увеличении амплитуды напряжения дифференциальный наклон характеристик на начальном участке заметно уменьшался, что приводило к еще менее выраженному их насыщению. Во-вторых, вблизи порога открывания зависимости тока стока от напряжения стока оказались суперлинейными (рис. 2, *b*), т.е. канал из запертого состояния открывался напряжением стока (в низковольтных $6H\text{-SiC}$ -транзисторах подпороговый ток стока не зависел от напряжения стока [4]).

Как мы считаем, причина такого поведения — влияние потенциала стока на поверхностный заряд, обусловленное эффектом короткого канала (см. Приложение): увеличение потенциала стока индуцирует на поверхности положительный заряд (за счет выбросов электронов с уровней поверхностных состояний), частично экраниру-

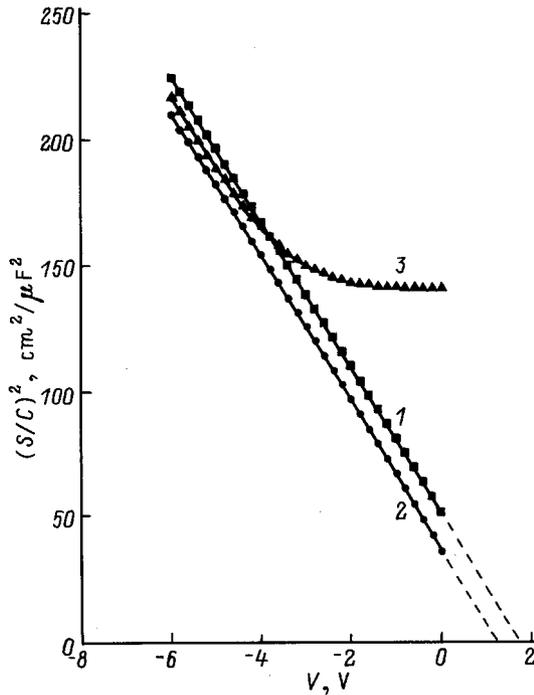


Рис. 3. Вольт-фарадные характеристики контрольных Au-6H-SiC-структур: 1 — до плазменных воздействий, 2 — после травления поверхности в SF₆, 3 — после обработки поверхности в водородной плазме.

ющий действие затвора, что и приводит к наблюдаемой суперлинейности характеристик вблизи порога.

Последующая обработка в водородной плазме привела к кардинальному изменению выходных вольт-амперных характеристик транзисторов. Во-первых, улучшилось насыщение тока стока в зависимости от напряжения стока (рис. 2, *c*; кроме того, вид кривых уже практически не зависел от амплитуды и длительности развертки). Во-вторых, характеристики вблизи порога открывания стали сублинейными с тенденцией к насыщению (рис. 2, *d*). В-третьих, напряжение отсечки канала увеличилось.

Такое изменение вольт-амперных характеристик транзисторов мы объясняем генерацией вблизи поверхности электрически активных (донорных) точечных дефектов с высокой плотностью. По нашим оценкам, объемная плотность генерированных дефектов находится на уровне $10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$, а толщина области генерации — порядка одной десятой микрометра [3]. В результате уровень Ферми в приповерхностном слое закрепляется на глубоких дефектах, так что между этим слоем и объемом канала возникает антизапорный барьер, в котором полностью обедненная область отсутствует. Этим обстоятельством объясняется увеличение напряжения отсечки канала в результате обработки. С другой стороны, поскольку поверхностная плотность генерированных дефектов превышает $10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (что на 1–2 порядка выше по сравнению с поверхностной плотностью доноров в канале, $N_a = 10^{12} \text{ см}^{-2}$), это приводит к пиннингу уровня Ферми на поверхности (т.е. к стабильности

поверхности как ”плавающего” затвора) и улучшению характеристик транзисторов.

Дополнительные свидетельства в пользу предлагаемого механизма стабилизации поверхности дали измерения вольт-фарадных характеристик контрольных структур Au-SiC, а также вольт-фарадных характеристик управляющего *p-n*-перехода. Как свидетельствуют *C-V*-измерения барьеров Шоттки, травление SiC в SF₆ приводит лишь к некоторому снижению высоты Au-барьера, а последующая обработка в водородной плазме приводит к образованию вблизи поверхности высокоомного слоя толщиной около 0.1 мкм (рис. 3). С другой стороны, показательными оказались результаты измерений вольт-фарадных характеристик управляющего *p-n*-перехода. После обработки в водороде емкость перехода при нулевом смещении значительно увеличилась, однако подача напряжения смещения возвращает ее к значениям, измеренным до обработки (рис. 4). На первый взгляд этот результат оказался довольно неожиданным, но все-таки объяснимым. Дело в том, что в силу конструктивных особенностей изготовленных транзисторов воздействию плазмы подвергается не только поверхность канала, но и *p*-материал за пределами меза-структуры (рис. 5). Как показано в наших предыдущих исследованиях [5], при обработке *p*-материала в водородной плазме возможно изменение типа проводимости в тонком слое вблизи поверхности, что, по-видимому, и происходит. Как следствие, емкость управляющего *p-n*-перехода увеличивается, с одной стороны, за счет увеличения его площади, а с другой — за счет большей (по сравнению с n_0) концентрации

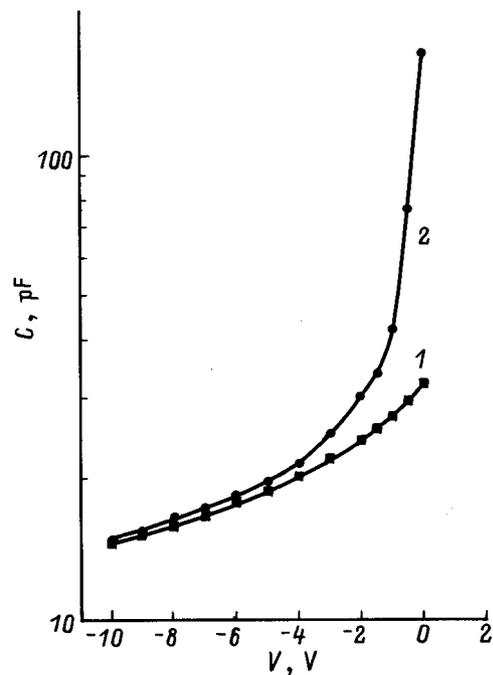


Рис. 4. Вольт-фарадные характеристики *p-n*-затвора: 1 — до обработки в водородной плазме (после травления канала в SF₆), 2 — после обработки в водородной плазме.

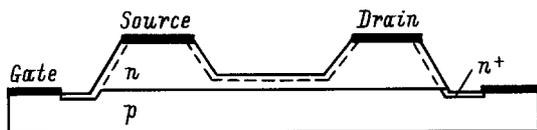


Рис. 5. См. пояснения в тексте.

доноров на краях p - n -перехода. При подаче же напряжения смещения ОПЗ p - n -перехода перекрывает на краях тонкий n^+ -слой, эта область "выключается" из измерений, и емкость снова определяется только параметрами p - n -перехода в пределах меза-структуры.

Таким образом, обработка поверхности канала транзисторов в водородной плазме приводит к существенному улучшению их характеристик, во всяком случае, при комнатной температуре. Конечно, для того, чтобы сделать окончательный вывод об эффективности данного метода, необходимо дополнительно исследовать термическую стабильность дефектов, поскольку одна из основных областей применения карбида кремния — это высокотемпературные приборы.

Авторы выражают благодарность А. Константинову, Н. Норделу, С. Карлсону и К. Харрису из Стокгольмского индустриального центра микроэлектроники за предоставленные для данной работы эпитаксиальные SiC-структуры.

Приложение

Влияние короткоканальных эффектов на подпороговую проводимость хорошо изучено для кремниевых транзисторов с изолированным затвором и объясняется тем, что на распределение потенциала в коротком канале действует, помимо напряжения смещения затвора, напряжение смещения стока. Для кремниевых инверсных МДП транзисторов выработан эмпирический критерий для минимальной длины канала, L_{\min} [мкм], при которой начинают проявляться короткоканальные эффекты [6]:

$$L_{\min} = 0.4 [r_j d (w_s + w_d)^2]^{1/3},$$

где r_j [мкм] — глубина стокового и истокового p - n -переходов, d [Å] — толщина диэлектрика, $w_s + w_d$ [мкм] — сумма толщин обедненных слоев истока и стока. В случае МДП транзистора толщина диэлектрика d характеризует степень "близкодействия" затвора на канал. В случае транзистора со скрытым p - n -переходом в качестве затвора эту же роль играет толщина канала a . По аналогии с последней формулой, для таких транзисторов можно ввести аналогичный критерий L_{\min} , заменяя d (а для грубых оценок ($w_s + w_d$) и r_j) на толщину канала a . Далее, с учетом соотношения $V_p = qNa^2/2\epsilon$, можно определить L_{\min} в зависимости от степени легирования канала N и заданного напряжения отсечки V_p . Как становится ясным, в случае высоковольтного транзистора, требующего низкой

концентрации доноров в канале, L_{\min} будет существенно большим, чем для низковольтного. В частности, в нашем случае (при легировании $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$) расчетная величина L_{\min} — около 9 мкм, в то время как $L = 5$ мкм.

Список литературы

- [1] П.А. Иванов, В.Е. Челноков. ФТП, **29**, 1921 (1995).
- [2] П.А. Иванов, В.Н. Пантелеев, Т.П. Самсонова, В.Е. Челноков. ФТП, **29**, 271 (1995).
- [3] А.О. Константинов, Н.С. Константинова, О.И. Коньков, Е.И. Теруков, П.А. Иванов. ФТП, **28**, 342 (1994).
- [4] P.A. Ivanov, N.S. Savkina, V.N. Panteleev, T.P. Samsonova, A.A. Maltsev. *Transactions of the 3-rd International HiTEC* (Albuquerque, NM, 1996) p. P-213.
- [5] A.O. Konstantinov, P.A. Ivanov, O.I. Konkov, E.I. Terukov. In: *Silicon Carbide and Related Materials*, ed. by M.G. Spencer, R.P. Devaty, J.A. Edmond, M. Asif Khan, R. Karlan, M. Rahman (Inst. Phys. Conf. Ser. No 137; Inst. Phys. Publishing, Bristol and Philadelphia, 1993) p. 275.
- [6] J.R. Brews, W. Fitchner, E.H. Nicolian, S.M. Sze. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, EDL-1, 2 (1980).

Редактор В.В. Чалдышев

The effect of SiC surface treatment in a hydrogen plasma on the performance of buried-gate field-effect transistors

P.A. Ivanov, O.I. Kon'kov, V.N. Panteleev, T.P. Samsonova

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.-Petersburg, Russia

Abstract For SiC buried-gate junction field-effect transistors, a treatment of the channel surface in hydrogen plasma was shown to be an effective method to stabilize the surface charge, which can act in such transistors as an additional "floating" gate. It has been demonstrated that the surface stabilization is particularly effective in transistors with a low donor density in the channel (high voltage ones) where the surface charge can be controlled by drain voltage due to the short-channel effects.