

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ ПОЛИТИПА 4Н

М. М. Аникин, П. А. Иванов, В. П. Растегаев, Н. С. Савкина,
А. Л. Сыркин, В. Е. Челноков

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

(Получена 15.05.1992. Принята к печати 26.06.1992)

Впервые изготовлен и исследован полевой транзистор на основе карбида кремния политипа 4Н. Транзистор — n -канальный, с затвором в виде p^+ — n -перехода. Выходные характеристики хорошо соответствуют модели «главного» канала, разработанной Шокли для полевого транзистора обедненного типа. Проведено сопоставление электрических параметров с параметрами аналогичного транзистора на основе карбида кремния политипа 6Н: при сравнимых величинах управляющего поля затвора транзистор на SiC-4Н превосходит по крутизне транзистор на SiC-6Н за счет большей удельной электропроводности канала.

Введение. Карбид кремния как широкозонный полупроводник, обладающий высокими значениями напряженности поля лавинного пробоя ($E_b = 2\text{—}6$ МВ/см), насыщенной скорости дрейфа электронов ($v_s = 2 \cdot 10^7$ см/с) и теплопроводности ($\kappa = 2\text{—}5$ Вт/см·град), представляет большой интерес для создания на его основе мощных дрейфовых СВЧ приборов и, в частности, полевых транзисторов [1].

Из множества отличающихся по свойствам политипных форм SiC до недавнего времени наиболее воспроизводимую технологию имел гексагональный политип 6Н. На основе этого политипа к настоящему времени созданы высокотемпературные полевые транзисторы (ПТ) разных модификаций [2]. Если рассматривать перспективы ПТ с легированным n -каналом на основе других политипов SiC, то, как видно из табл. 1, более предпочтительными могут оказаться формы 3С и 4Н, обладающие изотропной электропроводностью, большими величинами низкополевой подвижности электронов и меньшими значениями энергии ионизации легирующих донорных примесей. Однако для кубического карбида кремния 3С до сих пор не разработана технология выращивания монокристаллов достаточно больших размеров, а те гетероэпитаксиальные пленки, которые выращивают газотранспортным методом (CVD-эпитаксия) на кремнии и карбиде кремния политипа 6Н, содержат много дефектов. SiC-4Н находится в более выгодном положении, поскольку для этого гексагонального политипа существует способ выращивания объемных монокристаллов [3], из которых можно вырезать пластины площадью до 2 см².

В настоящей работе представлен изготовленный на такой подложке первый полевой транзистор на SiC-4Н.

1. Технология и структура транзистора

Технология изготовления, а также структура эпитаксиальных слоев и меза-конструкция транзистора с p^+ — n -затвором и n -каналом (рис. 1) в принципе не отличаются от разработанных для аналогичного ПТ на SiC-

Свойства 3С-, 6Н- и 4Н-политипов карбида кремния [7]

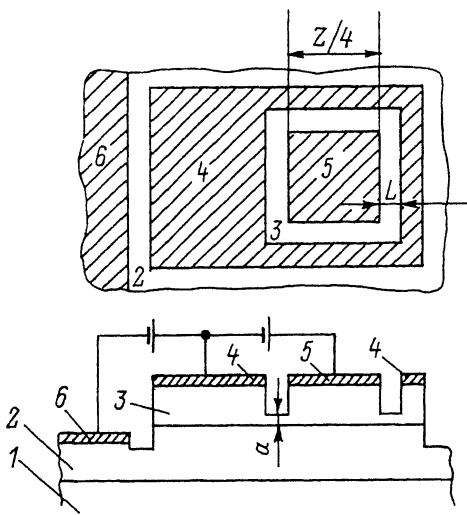
Политип	3С	6Н	4Н
Ширина запрещенной зоны E_g , эВ	2.4	3.0	3.2
Эффективная масса электрона в долине m_{de}/m_e	0.4	0.45	0.21
Наиболее вероятное число долин M	3	3	6
Энергия ионизации мелких до- норов (азота) E_D , мэВ	53	100	35
Коэффициент анизотропии электропроводности	1	3.7	0.9
Подвижность электронов в чистых образцах μ , см ² /В·с	1000	300	800

6Н [4]. Гомоэпитаксиальные p^+ - и n -слой последовательно выращивались методом вакуумной сублимационной эпитаксии [5] на подложке SiC-4Н с плоскостью, параллельной гексагональной оси кристалла. p^+ -Слой легировался алюминием из металлического источника до концентрации не менее $3 \cdot 10^{18}$ см⁻³; толщина этого слоя составляет 10—15 мкм. n -Слой толщиной 1.5—2 мкм специально не легировался: концентрация нескомпенсированных доноров в нем порядка 10^{17} см⁻³ достигалась за счет остаточного азота в реакционной камере. Для изготовления омических контактов к истоку S , стоку D и затвору G проводилась двухступенчатая вакуумная металлизация: тонкий контактный слой молибдена наносился электронно-лучевым испарением (с последующим вжиганием при температуре 1600 °С), защитный слой алюминия — магнетронным распылением. Изготовленные фотолитографией и химическим травлением контактные площадки служили маской при формировании меза-структуры ПТ реактивным ионным травлением в плазме SF₆ — методом, который обеспечивает высокую селективность травления SiC по отношению к алюминию [6]. В показанной на рис. 1 структуре ПТ каналом служит n -слой, вытравленный на необходимую глубину между истоком и стоком, затвором — p^+ — n -переход, слой пространственного заряда которого может отсекал канал у его поверхности. Исследованный транзистор имеет длину канала (расстояние исток—сток) $L = 21$ мкм, общую площадь p^+ — n -перехода $s = 0.55 \cdot 0.28$ мм², ширину канала (периметр стоковой площадки) $Z = 0.7$ мм.

2. Проводимость канала при малых напряжениях сток—исток

В линейном режиме ПТ с p^+ — n -затвором представляет собой управляемый резистор: проводимость n -канала модулируется напряжением V_{GS} , приложенным к затвору относительно истока. Принцип модуляции — геометрический: приращение напряжения dV_{GS} вызывает распространение слоя объемного заряда (СОЗ) резкого асимметричного p^+ — n -перехода в глубь канала, так что изменение толщины его проводящей части на dh приводит к соответствующему изменению проводимости на величину $dG_{DS} = -\sigma (Z/L) dh$, где G_{DS} — проводимость канала при малых напряжениях сток—исток V_{DS} ; h — толщина СОЗ; σ — удельная проводимость канала, которая может зависеть от h . Непосредственную информацию о толщине СОЗ как области, обедненной подвижными электронами, дает изменение дифференциальной емкости p^+ — n -перехода C : $h = \epsilon s / C$, где ϵ —

Рис. 1. Схематическое изображение структуры ПТ на SiC-4H. 1 — подложка SiC-4H, 2 — p^+ -слой, 3 — n -слой, 4 — исток, 5 — сток, 6 — затвор.



диэлектрическая проницаемость полупроводника. Таким образом, характер изменения проводимости канала в зависимости от толщины SiO_2 можно получить так называемым $G-C$ -методом, измеряя $C-V_{GS}$ - и $G_{DS}-V_{GS}$ -характеристики.

Вольт-фарадная характеристика p^+-n -перехода, измеренная мостовым методом на частоте 1 кГц и построенная в координатах $C^{-2}-V$, линейна (рис. 2). Наклон этой зависимости позволяет определить концентрацию нескомпенсированных доноров в n -слое: $N_D - N_A = 1.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Заметим, что экстраполированное к $C^{-2} = 0$ напряжение

отсечки V_0 близко по величине к диффузионной разности потенциалов $p-n$ -перехода на основе SiC-4H, легированного алюминием и азотом ($V_{bi} = 2.9 \text{ В}$).

Для исследованного транзистора проводимость канала G_{DS} , измеренная на постоянном токе при $V_{DS} = 50 \text{ мВ}$, оказалась линейной в зависимости от толщины SiO_2 h . Из полученной зависимости (рис. 3) можно заключить следующее:

- величины сопротивлений омических контактов истока и стока, а также толщи n -слоя под истоковым и стоковым выступами пренебрежимо малы по сравнению с сопротивлением открытого канала;
- удельная проводимость равномерна по толщине канала: $\sigma = 5.3 \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}$;
- при пороговой толщине SiO_2 $h_T = a = 0.43 \text{ мкм}$ (a — толщина канала) наступает отсечка канала, так что его проводимость становится близкой к нулю; соответствующее пороговое напряжение затвор—исток V_T составляет $\approx -19 \text{ В}$.

По измеренным величинам концентрации доноров $N_D - N_A$ и удельной проводимости σ можно оценить нижний предел дрейфовой подвижности электронов в канале изготовленного ПТ, предполагая отсутствие компенсации доноров ($N_A = 0$). Для расчета концентрации электронов n воспользуемся следующими данными работы [7]: энергия ионизации донорных атомов азота $E_D = 35 \text{ мэВ}$, плотность состояний в зоне проводимости $N_c = 1.3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (эффективная масса электрона в долине $m_{de} = 0.2m_e$, число долин $M = 6$). Из статистики электронов для невырожденного некомпенсированного полупроводника получим: $n = 1.1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ($T = 293 \text{ К}$), что дает для дрейфовой подвижности значение $\mu = 300 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

3. Выходные характеристики

Первой аналитической моделью полевого транзистора была модель Шокли [8], предназначенная для длинноканальных ПТ ($L \gg a$). Количественный критерий отношения L/a , достаточный для применимости этой модели, оценивается как $L/a > 0.7 \mu E_p / v_s$ [1], где $E_p = q(N_D - N_A)a/\epsilon$ — максимальная величина напряженности поля, которое возникает в SiO_2 p^+-n -перехода при отсечке канала. Для исследуемого ПТ указанный критерий выполняется: $L/a = 50$, а $0.7 \mu E_p / v_s = 11$ ($\mu = 300 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $E_p = 1 \text{ МВ/см}$, $v_s = 2 \cdot 10^7 \text{ см/с}$).

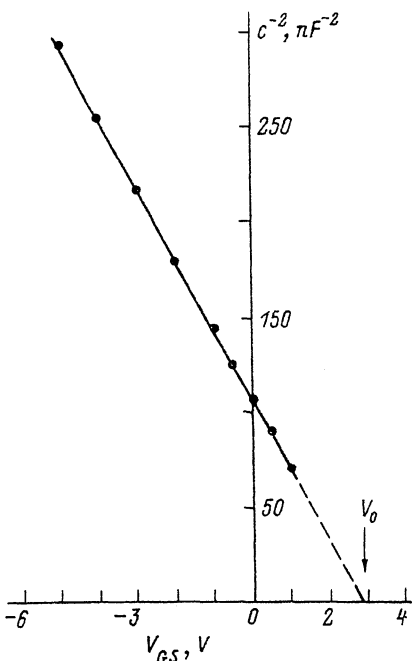


Рис. 2. Вольт-фарадная характеристика управляющего $p-n$ -перехода. Частота измерительного сигнала 1 кГц, исток и сток закорочен.

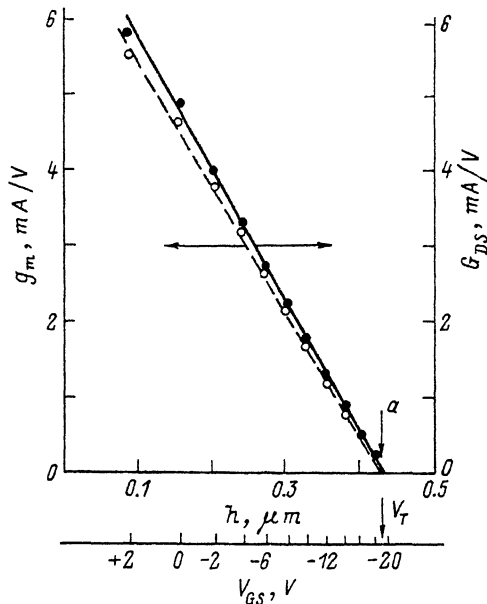


Рис. 3. Зависимости проводимости канала G_{DS} (при малом напряжении сток—исток) и крутизны характеристики передачи g_m (на участке насыщения тока стока) от напряжения затвор—исток V_{GS} и толщины CO_2 h в истоковой области.

Семейство выходных характеристик транзистора, снятых с экрана характеристикиографа Л2-56, показано на рис. 4. Характер зависимостей $I_D—V_{DS}$ (при фиксированных V_{GS}) и $I_D—V_{GS}$ (на участке насыщения I_D) соответствует главным выводам теории Шокли:

— во-первых, ток стока стремится к насыщению при напряжениях сток—исток, близких к разности величин порогового напряжения и напряжения, приложенного к затвору;

во-вторых, крутизна характеристики передачи (g_m), измеренная на участке насыщения тока стока, близка по величине к проводимости канала, измеренной при малых напряжениях сток—исток (рис. 3).

Таблица 2

Сравнение электрических параметров ПТ на основе карбида кремния политипов 6H [4] и 4H

Политип	6H	4H
Максимальный ток стока, мА ($V_{DS} = 60$ В, $V_{GS} = +2$ В)	20	50
Максимальная крутизна, мА/В ($V_{DS} = 60$ В, $V_{GS} = +2$ В)	2.8	5.5
Максимальное напряжение сток—затвор, В	90	100
Пороговое напряжение, В	-14.5	-19.2
Концентрация некомпенсированных доноров в канале, 10^{17} см $^{-3}$	4.0	1.3
Максимальное управляющее поле в CO_2 затвора, МВ/см	1.6	1.0
Длина канала, мкм	10	21
Ширина канала, мм	0.4	0.7
Максимальная крутизна, приведенная к длине канала 10 мкм и ширине канала 1 мм, мА/В	7.0	16.5

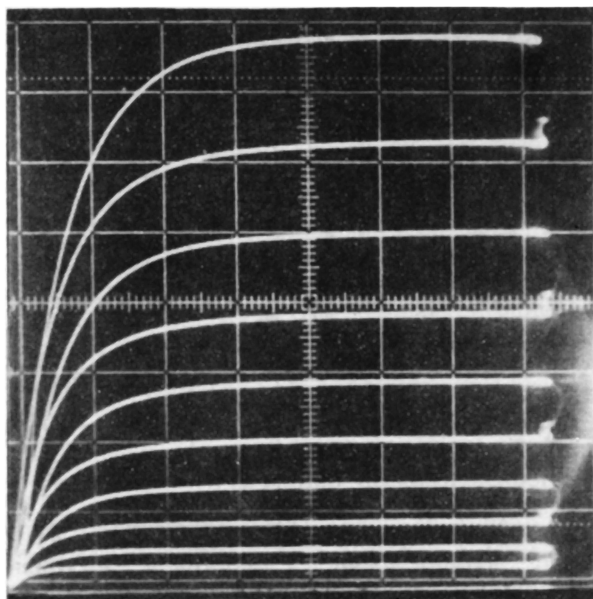


Рис. 4. Выходные характеристики ПТ на SiC-4H. Цена деления по вертикали (ток стока) — 5 мА, по горизонтали (напряжение сток—исток) — 10 В. Напряжение к затвору приложено ступенями через — 2 В (верхняя кривая соответствует нулевому напряжению).

Представляет интерес сравнить параметры ПТ, изготовленного на SiC-4H, с параметрами аналогичного транзистора на SiC-6H (табл. 2). Для сравнения выберем максимальную крутизну, нормированную на отношение ширины канала к его длине: $g^* = g_m L / Z$. При этом нетрудно убедиться, что для ПТ Шокли крутизна g^* прямо пропорциональна степени ионизации доноров в канале $k = n / (N_D - N_A)$, дрейфовой подвижности электронов μ и, что очень важно, величине управляющего поля затвора E_p : $g^* = q \mu n a = k e \mu E_p$. Отметим, что, поскольку возможность увеличения поля E_p [путем увеличения числа доноров на единицу площади канала $(N_D - N_A) a$] ограничена напряженностью поля пробоя E_b , важным критерием качества полупроводника для ПТ является параметр μE_b , имеющий размерность скорости. В частности, высокая подвижность электронов в SiC-3C в определенном смысле теряет свое значение, поскольку для SiC-3C следует ожидать меньшей, чем для гексагональных политипов, величины поля пробоя (по причине более простой зонной структуры). Представленный на ПТ SiC-4H, немного уступая на ПТ SiC-6H по величине поля E_p , превосходит его по параметру g^* за счет большей подвижности электронов и большей степени ионизации доноров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] П. А. Иванов, Б. В. Царенков. ФТП, 25, 1913 (1991).
- [2] P. A. Ivanov, V. E. Chelnokov. Semicond. Sci. Technol., 7, 1 (1992).
- [3] Н. А. Городецкая, М. Х. Ким, В. П. Растегаев, Ю. М. Таиров, В. Ф. Цветков. В кн.: Расширенные тезисы VIII Всес. конф. по росту кристаллов, 23. Харьков (1992).
- [4] М. М. Аникин, П. А. Иванов, А. Л. Сыркин, Б. В. Царенков, В. Е. Челноков. Письма ЖТФ, 15, 36 (1989).
- [5] М. М. Аникин, Н. В. Гусева, В. А. Дмитриев, А. Д. Сыркин. Изв. АН СССР, Сер. Неорг. Матер., 20, 1768 (1984).
- [6] И. В. Попов, А. Л. Сыркин, В. Е. Челноков. Письма ЖТФ, 12, 240 (1986).

[7] Ю. А. Водаков, Г. А. Ломакина, Е. Н. Мохов, В. Г. Одинг, В. В. Семенов, В. И. Соколов. В кн.: Матер. II Всес. совещ. «Проблемы физики и технологии широкозонных полупроводников», 164. Л. (1979).

[8] С. Зи. Физика полупроводниковых приборов, т. 1, 455. М. (1984).

Редактор Л. В. Шаронова
