

06.2

© 1991

НОРМАЛЬНО ЗАКРЫТЫЙ SiC (6H)
ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР С р-п-ЗАТВОРОМВ.А. Дмитриев, П.А. Иванов,
В.Е. Челноков, А.Е. Черенков

1. Для создания полупроводниковых интегральных схем (ИС), стойких к действию высоких температур и ионизирующих излучений, необходимо развитие элементной базы ИС на основе широкозонных полупроводников. В настоящее время исследуются возможности создания функциональных элементов ИС на основе карбида кремния полупроводника с шириной запрещенной зоны, изменяющейся от 2.4 эВ для кубического поли типа 3С до 3.4 эВ для гексагонального поли типа 2Н.

Для реализации базовых схем логических элементов цифровых ИС необходимы нормально закрытые транзисторы: полевые, работающие с обогащением канала носителями тока, или биполярные. По таким приборам на основе SiC существуют единичные публикации — это SiC (3С) МОП-транзисторы с индуцированным п-каналом [1, 2] и SiC (6H) биполярный п-р-п транзистор [3]. Электрические параметры приборов этого типа определяются свойствами неосновных носителей заряда.

В настоящей работе сообщается о создании нормально закрытого SiC (6H) транзистора, который работает на основных носителях; это п-канальный полевой транзистор с затвором в виде р-п-перехода.

2. В нормально закрытом полевом транзисторе с управляющим р-п-переходом проводящий канал толщиной α должен быть перекрыт областью пространственного заряда (ОПЗ) перехода при его нулевом смещении h_0 , т.е. $\alpha \leq h_0$. В этом случае пороговое напряжение затвора $V_T \cong V_{GS}(\alpha = h_0)$ имеет небольшую положительную

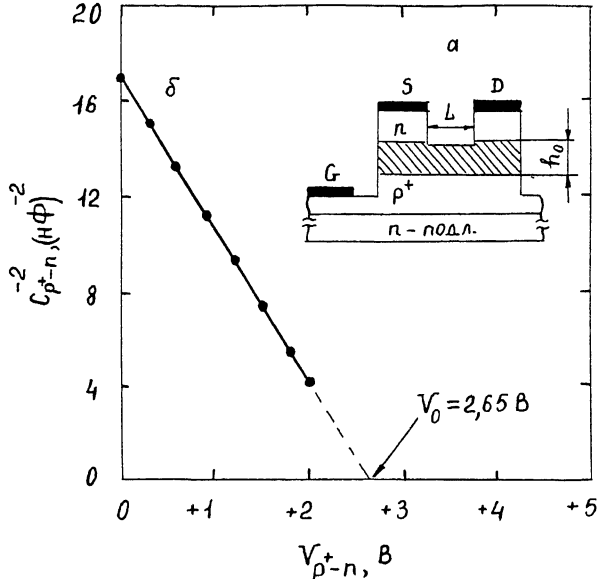


Рис. 1. а) Схематическое сечение структуры транзистора: заштрихована ОПЗ p^+ - n -перехода при нулевом смещении затвора и стока. б) Вольт-фарадная характеристика p^+ - n -перехода, частота измерений 1 КГц.

величину. Если $V_{GS} > V_T$, то канал открывается для протекания тока от истока к стоку за счет уменьшения толщины ОПЗ p - n -перехода h :

$$\frac{h}{h_0} = \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{\delta i}}\right)^{1/2},$$

где $V_{\delta i}$ - диффузионная разность потенциалов p - n -перехода. Максимальное положительное напряжение V_{GS}^m , которое можно приложить к затвору, меньше, чем $V_{\delta i}$. Его величина ограничена некоторым допустимым значением прямого тока p - n -перехода, который протекает по цепи затвора.

Характеристика передачи такого транзистора - зависимость насыщенного тока стока I_D^{sat} от напряжения V_{GS} - в приближении „плавного“ канала Шокли описывается выражением [4]:

$$I_D^{sat} = \frac{\mu \epsilon Z}{2\alpha L} (V_{GS} - V_T)^2, \quad (1)$$

где μ - дрейфовая подвижность электронов; ϵ - диэлектрическая проницаемость полупроводника; Z , α , L - ширина, толщина и длина канала.

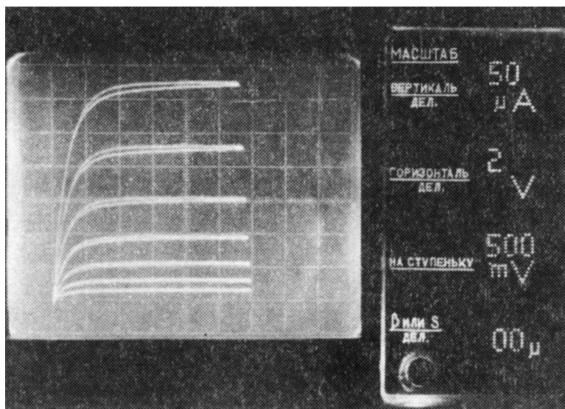


Рис. 2. Выходные характеристики транзистора при комнатной температуре: нижняя кривая - $V_{GS} = 0$ В, верхняя кривая - $V_{GS} = +3$ В.

Анализируя выражение (1), следует отметить, что подвижность электронов в карбиде кремния невысока (например, для SiC (6H) она составляет $\mu = 100-300$ см²/В с). Исходя из этого, для увеличения тока стока I_D^{sat} следует сокращать толщину α , т.е. увеличивать концентрацию доноров N в канале:

$$\alpha \approx h_0 = \left(\frac{2\epsilon V_{Bi}}{qN} \right)^{1/2},$$

где q - заряд электрона. За счет большой величины критического поля лавинного пробоя E_B (например, для SiC (6H) $E_B = (3-6) \cdot 10^6$ В/см) концентрацию доноров в канале SiC транзистора можно увеличивать до значений $N \sim 10^{18}$ см⁻³. Для сравнения: нормально закрытые $GaAs$ ПТШ имеют, как правило, $N \sim 10^{17}$ см⁻³. Кроме того, достоинством SiC для нормально закрытого полевого транзистора является большая величина диффузионной разности потенциалов р-р-перехода (для SiC (6H) $V_{Bi} \approx \approx 2.7$ В).

3. Технология и структура изготовленного нами транзистора подобны технологии и структуре нормально открытого транзистора, который описан в работе [5] (рис. 1, а). Эпитаксиальные слои р⁺- и п-типа выращивались методом бесконтейнерной жидкостной эпитаксии из расплава кремния на промышленных п- SiC (6H) подложках, ориентированных по плоскости (0001) [6]. Меза-структура транзистора изготовлена путем реактивного ионно-плазменного травления SiC [7], маскированного алюминиевыми контактами истока, стока и затвора.

Для определения электростатических параметров р⁺-п-структуры (N , V_{Bi} , h_0) проводились вольт-фарадные измерения р⁺-п-диода до операции вытравливания канала между истоком и стоком на

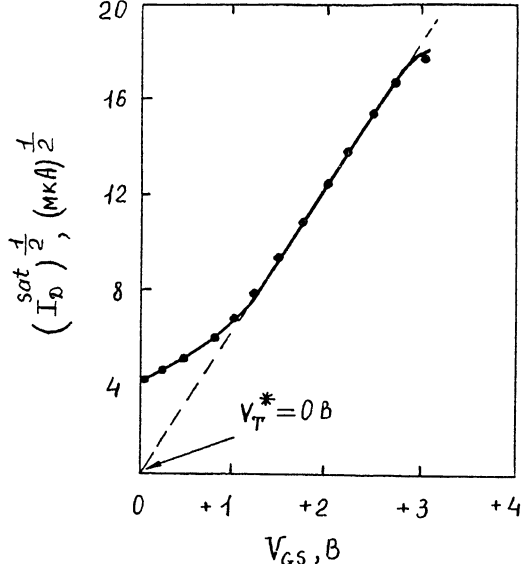


Рис. 3. Характеристика передачи насыщенного тока стока, $V_{DS} = 12$ В.

требуемую глубину. Концентрация нескомпенсированных доноров в p -области вблизи перехода была определена из наклона $C_{p^+-n}^{-2} - V_{p^+-n}$ характеристики (рис. 1, б). Она распределена равномерно и составляет $N = 8,0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Напряжение отсечки $C_{p^+-n}^{-2} - V_{p^+-n}$ характеристики, экстраполированное к $C_{p^+-n}^{-2} = 0$, составляет $V_0 = 2,65$ В, что близко к диффузионной разности потенциалов p - p -перехода. Толщина ОПЗ перехода при нулевом смещении, соответствующая этим значениям N и V_0 , равна $h_0 \approx 61$ нм.

4. Выходные характеристики транзистора, имеющего ширину канала $Z = 800$ мкм и длину $L = 10$ мкм, показаны на рис. 2. Ток стока насыщается при значениях напряжения между стоком и истоком, близких по величине к положительному потенциалу, приложенному к затвору. Характеристика передачи $I_D^{sat} - V_{GS}$ хорошо описывается квадратичной зависимостью тока от напряжения при $V_{GS} > 1$ В (рис. 3). Пороговое напряжение V_T^* , определенное экстраполяцией линейной части характеристики $(I_D^{sat})^{1/2} - V_{GS}$ к $I_D^{sat} = 0$, близко к нулю. Однако при нулевом смещении затвора по каналу протекает ток около 15 мкА, что составляет менее 5% от тока транзистора в открытом состоянии. Это обусловлено, скорее всего, некоторой неоднородностью толщины канала в промежутке между истоком и стоком.

Из рис. 2 видно, что транзистор удовлетворительно работает до напряжения $V_{GS}^m = +3$ В. Насыщенный ток стока составляет при этом $I_D^{sat} = 0,32$ мА, а крутизна характеристики передачи

$$g_m = \frac{dI_D^{sat}}{dV_{GS}} = \frac{2I_D^{sat}}{V_{GS}} = 0.21 \frac{mA}{B}.$$

То, что $V_{GS}^m > V_{bi}$, объясняется большим последовательным сопротивлением нейтральной p^+ -области затвора, так что часть напряжения, приложенного к электроду затвора, падает на этой области.

Значение тока стока I_D^{sat} , рассчитанное для данной структуры по соотношению (1) при $\mu = 100 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, приблизительно в 30 раз больше экспериментально наблюдаемого значения. Причина этого в том, что выражение (1) получено в предположении о полной ионизации доноров в квазинейтральной части канала, т.е. при $n = N$. Доноры (азот) в p -SiC (6H) имеют энергию ионизации $\Delta E_D \approx 0.1 \text{ эВ}$. В результате в условиях компенсации при комнатной температуре концентрация свободных электронов в проводящей части канала значительно меньше концентрации доноров. Это подтверждается тем, что ток стока растет при нагревании за счет тепловой ионизации доноров, несмотря на уменьшение подвижности электронов.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Palmour J.W., Kong H.C., Davis R.F. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 4. P. 2168-2177.
- [2] Shibahara K., Saito T., Nishino S., Matsunami H. // Extend. Abstr. of the 18th ICSSDM. Tokyo, 1986. P. 717-718.
- [3] Muench W. // Sol. St. Electr. 1978. V. 21. N 3. P. 479-480.
- [4] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир. 1984. 908 С.
- [5] Дмитриев В.А., Иванов П.А., Ильинская Н.Д., Сыркин А.Л., Царенков Б.В., Челноков В.Е., Черенков А.Е. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 4. С. 289-293.
- [6] Дмитриев В.А., Иванов П.А., Коркин И.В., Морозенко Я.В., Попов И.В., Сидорова Т.А., Стрельчук А.М., Челноков В.Е. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. № 4. С. 238-241.
- [7] Попов И.В., Сыркин А.Л., Челноков В.Е. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. № 4. С. 240-244.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
13 декабря 1990 г.