

## *SiC*-6H ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР С РЕКОРДНОЙ ДЛЯ КАРБИДКРЕМНИЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ КРУТИЗНОЙ

М.М. Аникин, П.А. Иванов, А.Л. Сыркин,  
Б.В. Царенков, В.Е. Челноков

В работе сообщается о *SiC*-6H полевом транзисторе ( $n$ -канальном, с  $p$ - $n$ -затвором) с рекордной для полевых транзисторов на основе карбида кремния крутизной, равной 7 мСм/мм при комнатной температуре.

1. К настоящему времени на карбиде кремния реализованы все основные типы полевых транзисторов (*FET*). К ним относятся: 1) каналные обедненного типа с  $p$ - $n$ -затвором (*JFET*) [1-3], с Шотки-затвором (*MESFET*) [2, 4-6] и с затвором в виде металла на изолирующей окисной пленке (*IGFET*) [7, 8, 10]; 2) МОП-транзисторы с инверсным каналом (*MOSFET*) [9, 10]. В последние годы главное внимание уделяется использованию в структурах *SiC FET* кубического политаипа ( $\beta$ -*SiC*) [2, 5-10] из-за большей, чем в гексагональных политаипах ( $\alpha$ -*SiC*), подвижности электронов и возможности гетероэпитаксиального выращивания слоев  $\beta$ -*SiC* на кремниевых подложках.

Параметры лучших *SiC FET* по каждому из перечисленных выше каналных транзисторов обедненного типа сведены в таблице (МОП-транзисторы инверсного типа пока значительно уступают по параметрам транзисторам с обеднением и поэтому в таблице не представлены).

2. Усиительные свойства полевых транзисторов в схеме с общим истоком характеризуются крутизной  $g = (\partial I_D / \partial V_{GS})_{V_{DS} = \text{const}}$ , где  $I_D$  - ток стока,  $V_{GS}$  и  $V_{DS}$  - напряжение затвор-исток и сток-исток. Крутизна  $g$   $n$ -канального *FET* Шокли, как функция  $V_{DS}$ , достигает своего максимального значения  $g_m = G_0 \left\{ 1 - [(|V_{GS}| + V_{bi}) / V_p]^{1/2} \right\}$ , где  $G_0 = q \mu n \alpha Z / L$  - проводимость открытого канала, на участке насыщения тока стока характеристики  $I_D - V_{DS}$  ( $V_{bi}$  - контактная разность потенциалов на затворе,  $V_p$  - напряжение отсечки канала,  $q$  - заряд электрона,  $\mu$  и  $n$  - подвижность и концентрация электронов в открытой части канала;  $\alpha$ ,  $Z$  и  $L$  - толщина, ширина и длина канала). Отметим, что  $n = A(T)N$ , где  $N = N_D - N_A$  - концентрация нескомпенсированных доноров в канале;  $A(T)$  - фактор, определяющий температурную зависимость  $n$ . В *SiC* при комнатной температуре  $A(T) < 1$ .

Насыщение тока стока в *FET* Шокли вызывается отсечкой канала вблизи стока областью пространственного заряда под затвором при приложении к стоку напряжения, большего

# Параметры SiC FET

Толщина канала $a$ , мкм	Длина канала $L$ , мкм	Концентрация доноров $N_D - N_A$ , см <sup>-3</sup>	Пороговое напряжение $V_T$ , В	Максимальное напряжение $V_{DG max}$ , В	Величина $E_p = Q_p / \epsilon$ , В/см	Приведенная крутизна $g/Z$ , мСм/мм
0.6	3.5	$5 \cdot 10^{16}$	1.6	7.5	*	0.6
0.3	5 ÷ 8	$(0.8 \div 3) \cdot 10^{16}$	4	9	$1.6 \cdot 10^5$	2.4
1.2	7.2	$(1 \div 3) \cdot 10^{15}$	13	45	$0.7 \cdot 10^5$	5.3
1.2	10	$10^{16}$	20	65	$2.2 \cdot 10^5$	1.7
0.2	10	$5 \cdot 10^{17}$	18	85	$1.8 \cdot 10^6$	7.0

$\beta$ -SiC { MESFET [6]  
 YFET [2]  
 IGFFET [10]  
 MESFET [4] }  
 SiC-6H { [Настоящее сообщение] }

\* Значение  $E_p$  не указано, потому что приведенные параметры  $a$  и  $N$  не представляются достоверными, поскольку им не соответствует низкое пороговое значение  $V_T = -1.6$  В.

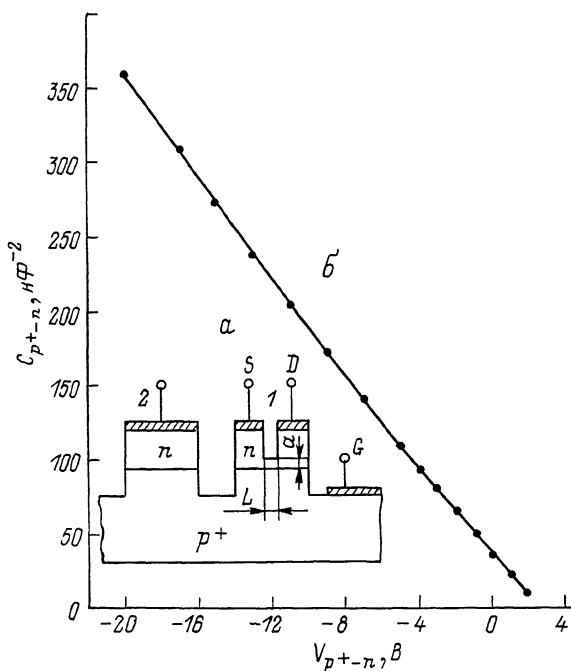


Рис. 1. а) Схематический вертикальный разрез меза-эпитаксиального SiC-6H JFET (1);  $L=10$  мкм,  $\alpha \approx 0.2$  мкм. б) C-V характеристика тестового  $p^+-n$ -диода (2);  $f=1$  кГц,  $T=298$  К.

$V_{DS}^{sat} = |V_T - V_{GS}|$ , где пороговое напряжение  $V_T = (V_{GS})_{I_D=0} = V_{bi} - V_p$ . В этом случае в области канала под затвором вблизи стока возникает пространственный заряд, величина которого, отнесенная к единице площади,  $Q_{\square} = qN\alpha$ . Связанное с этим зарядом уравнением Пуассона электрическое поле, перпендикулярное направлению протекания тока, имеет максимальную напряженность в плоскости затвора  $E_p = Q_{\square} / \epsilon$ , где  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость полупроводника. Соответствующая разность потенциалов между затвором и открытой частью канала  $qN\alpha^2 / 2\epsilon$  и есть напряжение отсечки канала  $V_p$ .

Комбинируя выражения для  $G_0$ ,  $n$ ,  $Q_{\square}$  и  $E_p$ , получаем, что приведенная к единичной ширине канала крутизна  $g_m / Z = \mu A(T) \{1 - [(|V_{GS}| + V_{bi}) / V_p]^{1/2}\} Q_{\square} / L = \mu \epsilon A(T) \{1 - [(|V_{GS}| + V_{bi}) / V_p]^{1/2}\} E_p / L$

Чем больше заряд  $Q_{\square}$  в канале, тем выше крутизна транзистора  $g_m$ . Однако, чтобы  $I_D - V_{DS}$  характеристики имели участок насыщения, необходимо, чтобы при  $V_{DS} \leq V_{DS}^{sat}$  в под-

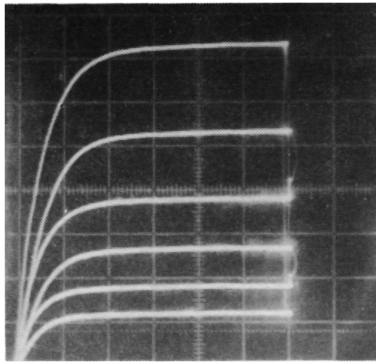


Рис. 2. Выходные характеристики  $I_D - V_{DS}$   $SiC-6H$  JFET .  
 $V_{GS}$ : 0, -2В, -4В, -6В, -8В, -10В (сверху вниз),  $T=298$  К.  
 Чувствительность по вертикали 2 мА/дел, по горизонтали - 10/В дел.

затворной области не возникал пробой. Это означает, что заряд  $Q_D$  не должен превышать величины, при которой вызываемое им поле  $E_p$  достигает значения, соответствующего критическому полю лавинного пробоя полупроводника  $E_B$  ( $E_B = (2-6) \times 10^6$  В/см для  $SiC$  разных политипов и уровней легирования). Таким образом, оптимальный заряд на единицу площади канала, необходимый для достижения предельно высокой крутизны FET Шокли,  $Q_D^{opt} \lesssim \epsilon E_B$  ( $Q_D^{opt} \approx 2 \cdot 10^{-6}$  Кл/см<sup>2</sup> для  $SiC$ ).

3. Представленный в данной работе  $SiC-6H$  JFET (рис. 1, а) сформирован на основе высокопланарной эпитаксиальной  $p^+-n$ -структуры. Слои  $p^+$  и  $n$  выращивались методом вакуумной сублимационной эпитаксии [11] на (0001)Si грани  $n-SiC-6H$  подложки с концентрацией нескомпенсированных доноров  $N = N_D - N_A \approx 3 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Слой  $p^+$  легирован алюминием до концентрации  $N_A - N_D \geq 5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, его толщина 20 мкм. Слой  $n$  толщиной  $\approx 1.5$  мкм специально не легирован, остаточная концентрация нескомпенсированных доноров в нем  $N \approx 5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>; значение  $N$  получено из  $C-V$  характеристики тестового  $p^+-n$ -диода, измеренной на частоте 1 кГц (рис. 1, б). Из  $C-V$  характеристики были оценены контактная разность потенциалов на  $p^+-n$ -переходе ( $\approx 2.6$  В) и ширина слоя объемного заряда  $p^+-n$ -перехода при нулевом смещении ( $\approx 0.09$  мкм).

Для формирования омических контактов к истоку  $S$ , стоку  $D$  и затвору  $G$  использовалась двухслойная металлизация из вольфрама и алюминия. Контактный  $W$ -слой напылялся методом электронно-лучевого испарения в вакууме с последующим вжиганием при 1600 °С. Термически напыленный в вакууме защитный  $Al$ -слой использовался и как маскирующее покрытие при формировании меза-структуры транзистора методом реактивного

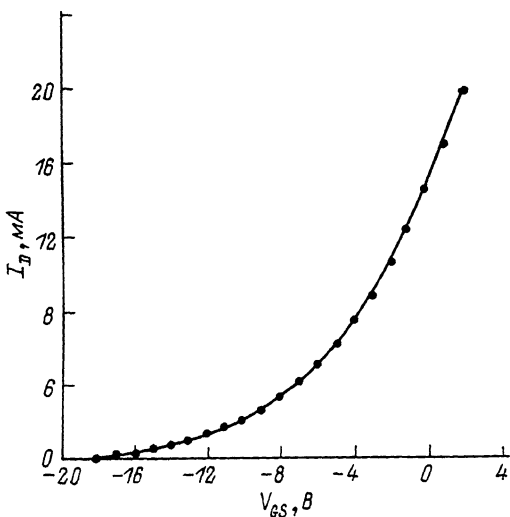


Рис. 3. Входная характеристика  $I_D - V_{GS}$  SiC-6HJFET.  $V_{DS}=40$  В,  $T=298$  К.

ионно-плазменного травления [12]. Каналом транзистора является вытравленный между истоком и стоком  $n$ -слой длиной  $L=10$  мкм и шириной  $Z=0.4$  мм. Достижение заданной его толщины  $\alpha \approx 0.2$  мкм контролировалось измерением сопротивления сток-исток в процессе травления. Затвором служит  $p^+-n$ -переход. В режиме отсечки область пространственного заряда  $p^+-n$ -перехода перекрывает канал у поверхности эпитаксиальной структуры.

4. Выходные характеристики  $I_D - V_{DS}$  при разных  $V_{GS}$ , измеренные при комнатной температуре характеристиком Л2-56, показаны на рис. 2. Эти характеристики соответствуют модели длинноканальных ( $L \gg \alpha$ ) транзисторов Шокли: они идеально насыщаются при напряжениях  $V_{DS}^{sat} \approx |V_T - V_{GS}|$ ; пороговое напряжение  $V_T \approx -18$  В определено из входной характеристики  $I_D - V_{GS}$  при  $V_{DS}=40$  В (рис. 3).

Транзистор обладает следующими электрическими параметрами при комнатной температуре: ток стока  $I_D=20$  мА при  $V_{GS}=+2$  В и  $V_{DS}=40$  В; напряжение пробоя сток-затвор  $V_{DGB} \approx \approx 90$  В; ток утечки затвора  $I_G=5 \cdot 10^{-9}$  А при  $V_{DS}=0$  и  $V_{GS}=-85$  В; крутизна  $g=2.8$  мА/В (7.0 мСм/мм) при  $V_{GS}=+2$  В и  $V_{DS}=40$  В. Лучший из известных нам результатов по крутизне - это 5.3 мСм/мм при длине затвора  $L=7.2$  мкм ( $\beta$ -SiC IGFET на  $\alpha$ -SiC подложке) [10].

Выше было показано, что оптимальный для достижения высокой крутизны заряд в канале *FET* имеет значение, при котором вызываемое им электрическое поле в подзатворной области  $E_p = Q_{\text{opt}} / \epsilon \lesssim E_B$ . В нашем случае величина  $E_p \approx 1.8 \times 10^6$  В/см, что близко к значению  $E_B$  для карбида кремния и на порядок выше тех значений  $E_p$ , которые получаются расчетом по данным, ранее опубликованным для *SiC FET* [2, 4, 6, 10] (см. таблицу). В этих структурах при полях выше  $\sim 10^5$  В/см возникают избыточные токи как стока, так и затвора, не связанные с лавинным пробоем. Это, по-видимому, не позволило увеличить заряд  $Q_{\text{opt}}$  выше  $\sim 10^{-7}$  Кл/см<sup>2</sup> (в нашем случае  $Q_{\text{opt}} \approx 2 \cdot 10^{-6}$  Кл/см<sup>2</sup>), поэтому крутизна *SiC FET* [2, 4, 6, 10] оказалась меньшей по сравнению с нашим транзистором даже для *FET* на основе  $\beta$ -*SiC*, имеющего большую, чем в *SiC-6H*, подвижность электронов.

В заключение авторы выражают благодарность Г.С. Затицкой, Н.Д. Ильинской за помощь при изготовлении образцов.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Campbell R.B., Chang H.C. // Jn: Semiconductors and Semimetals, 1970. V. 7B. P. 663-671.
- [2] Kellner G., Binari S., Slegger K., Kong H. // IEEE Electron Device Letters. 1987. V. EDL-8. N 9. P. 429-431.
- [3] 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. В. 4. С. 289-293.
- [4] Von Muench W., Hoess R., Pettenraul E. Jn: Proceedings of the International Electronic Device Meeting, Washington, 1977, p. 337.
- [5] Yoshida S., Daimon H., Yamanaoka M., Sakuma E., Misawa S., Endo K. // J. Appl. Phys. 1986. V. 60. N 8. P. 2989-2991.
- [6] Kong H.C., Palmour J.W., Glass J.T., Davis R.F. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. N 6. P. 442-444.
- [7] Kondo Y., Takahashi T., Ishii K., Hayashi Y., Sakuma E., Misawa S., Daimon H., Yamanaoka M., Yoshida S. // Jap. J. of Appl. Phys. 1987. V. 26. N 3. P. 310-311.
- [8] Kondo H., Takahashi T., Ishii K., Hayashi Y., Sakuma E., Misawa S., Daimon H., Yamanaoka M., Yoshida S. // IEEE Electron Device Letters. 1986. V. EDL-7. N 7. P. 404-406.

- [9] Shiba h a r a K., S a i t o T., N i s h i n o S., M a t s u n a m i H. Jn. E t e n d e d A b s t r a c t s o f t h e 18-t h I n t e r n a t i o n a l c o n f e r e n c e o n S o l i d S t a t e D e v i c e s a n d M a t e r i a l s , T o k y o , 1986, P. 717-718.
- [10] P a l m o u r J.W., K o n g H.C., D a v i s R.F. // J. A p p . P h y s . 1988. V. 64. N 4. P. 2168-2177.
- [11] А н и к и н М.М., Г у с е в а Н.Б., Д м и т р и е в В.А., С ы р к и н А.Л. // Изв. АН СССР. Сер. Неорг. матер. 1984. № 10. С. 1768-1770.
- [12] П о п о в И.В., С ы р к и н А.Л., Ч е л н о к о в В.Е. / П и с ь м а в Ж Т Ф . 1986. Т. 12. В. 4. С. 240-244.

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

Поступило в Редакцию  
4 апреля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 16 26 августа 1989 г.  
05.4

## АТОМНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ ВАКАНСИЙ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ

В.В. К и р с а н о в , Н.Н. М у с и н

Открытые в 1986 году высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) [1] привлекли внимание возможностью широкого применения в энергетике, промышленности, науке.

При этом встает вопрос о радиационной стойкости ВТСП. Как показывают первые эксперименты по облучению ВТСП нейтронами [2] и ионами [3, 4], эти материалы очень чувствительны к радиационным дефектам. Пока неясно, какой тип дефектов является главным в ВТСП. С целью выяснения природы радиационных дефектов планируется провести ряд вычислительных экспериментов по моделированию точечных дефектов в ВТСП. Первые результаты описаны в данном письме. Методом молекулярной динамики была определена атомная конфигурация вакансии меди в  $La_{1.85}Ba_{0.15}CuO_4$ .

Вычислительный эксперимент проводился на модельном кристаллите, имеющем форму прямоугольного параллелепипеда и содержащем 635 атомов. Для описания взаимодействия между атомами использовался парный потенциал, предложенный в работе [5]. Модельный кристаллит окружался упругим континуумом. Взаимодействие поверхностных атомов с упругим континуумом моделировалось введением постоянных поверхностных и упругих сил. Избыток энергии отводился посредством искусственной диссипации энергии. Для адекватного решения задачи о