Характеристика систем Me/a-C

Показатели	V	Ta
Температура начала диффузии атомов углерода в пленку металла, С	400	800
Температура завершения карбидообразования по объему пленки металла, С	1000	—
Средняя толщина пленки металла, нм	120	150
Образующаяся фаза:	VC	Ta_2C
тип решетки	гцк	гексагональная
параметры решетки, нм	a=0,416	a=0,310; c=0,494

По результатам выполненных исследований установлены следующие особенности процесса межфазного взаимодействия на границе Me/a-C:

— каждая система имеет пороговую температуру начала процесса диффузии атомов углерода в пленку металла с образованием включений карбидной фазы. Причем эта температура возрастает в группе с увеличением порядкового номера элемента;

— возрастание температуры отжига сверх этой граничной температуры сопровождается нарастанием процессов диффузии атомов углерода от границы Me/a-C в направлении к поверхности металлической пленки и характеризуется образованием прослойки карбидной фазы;

— после часового отжига при температуре 1000 °С для системы V/a-C произошло полное превращение металлической пленки ванадия в монокарбид ванадия, а для системы Ta/a-C процесс карбидообразования по объему пленки тантала не завершен.

Поскольку исследованные системы обладают высокой термической стабильностью, то существует реальная возможность использования ванадия и тантала для создания омических контактов с алмазом и алмазоподобными пленками.

1. Huong P. V., Verma A. L., Chaminade J. P., Nganga L. and Erison J. C. // Mater. Sci. Eng. V. B5. 1990. P. 255.
2. Huong P. V. // Diamond Relat. Mater. V. 1. 1991. P. 33.

Поступила в редакцию 08.09.95.

УДК 621.382.311.33:546

А. Д. АНДРЕЕВ, А. М. БЕЛЬСКИЙ, А. А. ВАЛИЕВ

ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ ЛЕГИРОВАНИЯ НА НАСЫЩЕНИЕ ТОКА В n-КАНАЛЬНОМ МОП-ПТ

Saturation currents in n-channal MOS FET were measured. It is shown that the saturation drain-sourse voltage decreases with increasing of dopant level. This voltage is smoller than the effective gate voltage. The explanation of the current saturation can be based on drift velocity saturation.

В высоколегированных МОП-структурах концентрацию примесных атомов на границе раздела кремния и диоксида кремния определяют путем измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) полевого транзистора с изолированным затвором [1—3]. В таких приборах переход от резистивного участка зависимости тока от напряжения на стоке к насыщению осуществляется при напряжениях на стоке, значительно меньших разности напряжений затвора и порогового. Напряжение насыщения используется для расчета электропроводности [4], определения напряженности

электрического поля, энергии электронов в канале [5—7], оценки теплового дрейфа тока транзистора [8] и в ряде других задач, поэтому изучение этого параметра представляется необходимым.

С учетом переменного заряда обедненной области и наличия инверсионного слоя по всей длине канала ток стока при нулевых значениях напряжения истока и подложки равен [4]:

$$I_d = \mu \frac{W}{L} C_0 \left\{ \left(V_g - V_{FB} - 2\varphi_f - \frac{V_D}{2} \right) V_D - \right.$$

$$\left. - \frac{2}{3} \left(\frac{2\varepsilon_s e N_A}{C_0^2} \right)^{1/2} [(2\varphi_f + V_D)^{3/2} - (2\varphi_f)^{3/2}] \right\}, \qquad (1)$$

где μ — подвижность электронов, W, L — ширина и длина канала соответственно, V_g, V_D, V_{FB} — напряжения на затворе и стоке, напряжение плоских зон, C_0 — емкость окисла, N_A — концентрация акцепторных атомов в подложке, $\varphi_f = (kT/e)\ln(N_A/n_i)$ — потенциал в нейтральном объеме кремния, n_i — собственная концентрация носителей заряда. Вводя для упрощения вычислений в (1) пороговое напряжение $V_т$ подстановкой $V_{FB} = V_т - 2\varphi_f - \sqrt{4\varepsilon_s e N_A \varphi_f / C_0^2}$, после преобразования получим:

$$I_D = \mu \frac{W}{L} C_0 (V_g - V_т) V_D \left\{ \left[1 + \frac{\sqrt{4\varepsilon_s e N_A \varphi_f}}{C_0 (V_g - V_т)} - \frac{V_D}{2(V_g - V_т)} \right] - \right.$$

$$\left. - \frac{2\sqrt{2\varepsilon_s e N_A}}{V_D 3 C_0 (V_g - V_т)} [(2\varphi_f + V_D)^{3/2} - (2\varphi_f)^{3/2}] \right\}. \qquad (2)$$

В высоколегированных подложках, $N_A \sim 10^{24}$ м$^{-3}$, $\varphi_f \sim 0{,}5$ В, $V_D = V_{DS} \sim 1$В — напряжение начала насыщения тока стока, на омическом участке ВАХ $V_D < 2\varphi_f$ множитель $(2\varphi_f + V_D)^{3/2} - (2\varphi_f)^{3/2} \cong 3V_D\sqrt{2\varphi_f} / 2$ и (2) можно представить в виде:

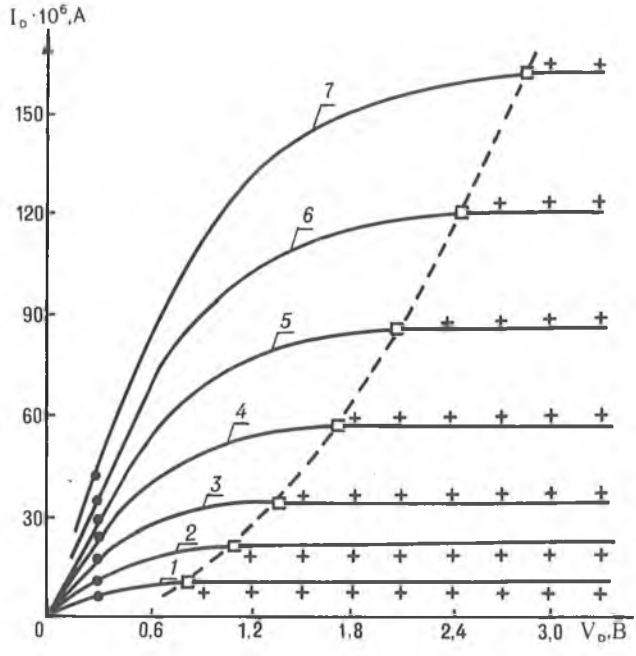
$$I_D \cong \mu \frac{W}{L} C_0 (V_g - V_T) V_D \left[1 - \frac{V_D}{2(V_g - V_T)} \right]. \qquad (3)$$

Для измерений применялись МОП-ПТ, изготовленные путем стандартных технологических операций, используемых в производстве кремниевых интегральных схем. Концентрация примесных атомов бора в подложке $N_A = 3 \cdot 10^{21}$, 10^{22}, 10^{23}, $7 \cdot 10^{23}$, $2 \cdot 10^{24}$ м$^{-3}$, толщина окисла кремния под затвором x_{0x}=1000 Å, L=4 мкм, W=12 мкм; для последних двух значений N_A x_{0x}=4000 Å, L=10 мкм, W=30 мкм, чтобы предотвратить пробой структуры при высоких напряжениях V_g [1]; глубина перехода стока ~0,8 мкм, затвор из алюминия. Величина N_A определялась по смещению ВАХ [1—3].

На рисунке даны измеренные зависимости (сплошные линии) I_D от V_D при различных V_g транзистора с $N_A = 7 \cdot 10^{23}$ м$^{-3}$. Знаком (•) показаны значения I_D, полученные по формуле (3): $\mu = 6 \cdot 10^{-3}$, $C_0 = 10^{-4}$ ф/м^2, W/L=3. Пунктирная кривая построена по формуле $I_{DS} = 20 \cdot 10^{-6} V_{DS}^2$, V_{DS} выбиралось в начале горизонтального участка насыщения тока. Знаком (+) показаны значения тока, рассчитанные по формуле $I_{DS} = 3 \cdot 10^{-8}(V_g - V_T)^2$. Обозначив $V_{DS}/(V_g - V_T) = a$ и подставляя в (3), запишем

$$I_{DS} = \frac{1}{2}\mu C_0 \frac{W}{L}(V_g - V_T)^2 a(2-a). \qquad (4)$$

В соответствии с (4), при $N_A = 10^{21} \div 10^{22}$ м$^{-3}$ $a \to 1$, в точке канала, ближайшей к стоку, не происходит инверсия типа электропроводности, и канал сокращается при увеличении V_D. Из сравнения расчетных и экспериментальных данных $a \cong 0{,}038$.



Зависимость тока стока от напряжения, приложенного к стоку: *1—7* соответствуют значения V_g=160, 150, 140, 130, 120, 110, 100 В; V_T = 85 В; $N_A = 7 \cdot 10^{23}$ м$^{-3}$

Зависимости $I_D = f(V_D)_{V_g}$ были получены для транзисторов с указанными ранее N_A, для которых a=0,97; 0,94; 0,65; 0,04; 0,025 при V_g и V_T соответственно 5—3; 7—4,5; 40—25; 120—85; 145—130 В; $a << 1$ для высоких N_A, и расчет V_{DS} по известным формулам [4, 6, 10] дает завышенные результаты. С увеличением V_g до 160 В, V_T = 85В поверхностная плотность неосновных носителей заряда $Q_n = C_0 (V_g - V_T) = 6{,}6 \cdot 10^{-3}$ Кл/м^2. В этом случае не требуется учитывать вырождение при расчете тока [9].

Для приближенной оценки величины V_{DS} рассчитаны сопротивление участка обедненного слоя обратносмещенного перехода стока $d / \mu C_0 (V_g - V_T) W$ [11] в режиме, когда электроны движутся вдоль непрерывного проводящего пути от истока до стока с дрейфовой скоростью $v_d = \mu E$ [12], размер обедненного слоя р-области $d = \left[2\varepsilon_s (V_1 + V_2) / eN_A\right]^{1/2}$, где $V_1 = (kT/e)\ln\left(N_A N_D / n_i^2\right)$ — встроенный потенциал, V_2 — падение напряжения на стоковом $n^+ - p$ переходе, и средняя напряженность электрического поля $E = \left[eN_A (V_1 + V_2) / 2\varepsilon_s\right]^{1/2}$ [4]. В предельном случае насыщения дрейфовой скорости

$$v_d = v_{ds}, V_1 >> V_2 = \gamma V_D, V_D \to V_{DS},$$

$$V_{DS} \cong \frac{I_{DS} V_1}{\gamma C_0 (V_g - v_T) W v_{ds}}, \qquad (5)$$

где $\gamma = 3 \cdot 10^{-3}$ — эмпирический коэффициент,

$W = 3 \cdot 10^{-5}$ м, V_1=1,2 В, $C_0=10^{-4}$ ф/м^2, $v_{ds}=10^5$ м/с.

На рисунке знаком (□) отмечены результаты расчета по формуле (5).

Полученные экспериментальные данные дают основание предполагать, что в МОП-ПТ с длиной канала $\gtrsim 3$ мкм при увеличении уровня легирования подложки переход к насыщению тока стока и уменьшение $V_{DS}<(V_g-V_T)$ может быть вызван в основном насыщением дрейфовой скорости в канале. Этот эффект может преобладать над подавлением инверсии типа электропроводности при перекрытии канала под действием стокового напряжения. При последующей оценке вклада каждого из указанных механизмов необходимо учитывать изменение подвижности электронов с учетом фононного и кулоновского рассеяния в канале с $N_A>10^{23}$ м$^{-3}$ [13].

1. Андреев А. Д., Бельский А. М., Кулагин Ю. А., Савотин Ю. И. // Микроэлектроника. 1976. Вып. 5. С. 443.
2. Андреев А. Д., Бельский А. М., Савотин Ю. И. и др. // Изв. АН БССР. Сер. физ.-мат. 1978. № 1. С. 69.
3. Андреев А. Д., Борздов В. М., Дитковский В. М. // Вестн. Белорус. ун-та. Сер. 1. 1992. № 1. С. 27.
4. Маллер Р., Кейминс Г. Элементы интегральных схем. М., 1989.
5. Hu C., Tam S. et al. // IEEE J. Solid-State Circ. 1985. V. 20. № 1. P. 295.
6. Arora N., Sharma M. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1991. V. 38. № 6. P. 1392.
7. Андреев А. Д., Борздов В. М., Дитковский В. М. // Вестн. Белорус. ун-та. Сер. 1. 1993. № 3. С. 27.
8. Андреев А. Д., Борздов В. М., Дитковский В. М. // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1994. № 3. С. 81.
9. Majkusiak B., Jakubowski A. et al. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1987. V. 34. № 12. Pt. 1. P. 2560.
10. Hsu F., Chiu K. // IEEE Electron. Dev. Letters. 1984. V. 5. № 5. P. 148.
11. Россадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. М., 1991.
12. Toh K., Ko P., Meyer R. // IEEE J. Solid-State Cirs. 1988. V. 23. № 4. P. 950.
13. Huang C., Arora N. // Solid-State Electron. 1994. V. 37. № 1. P. 97.

Поступила в редакцию 27.05.95.