

2. Нижней температурой образования БФСС является  $t = 210$  °С. При  $t > 330$  °С проявляется неравномерность осажденных пленок по толщине.

3. Концентрация бора и фосфора в пленке БФСС зависит от соотношения расходов технологических газов в процессе осаждения, а бора, кроме того, и от температуры осаждения.

4. Оптимальным режимом газофазного осаждения БФСС по скорости осаждения и качеству осажденных пленок является интервал температур  $t = 320 - 330$  °С при фиксированных значениях расхода газовых смесей.

#### Список литературы

1. Патент США № 4497683.
2. У а м а ц у М и т к о. Заявка 60-223 42. Япония.
3. Я с у м о т о М а с с а а к и, Э н о м о т о Т а д а ё с и. Заявка 60-7149. Япония.
4. Nowicki R. S., Moulden J. F. //Journ. Electrochem. Soc. 1981. V. 128. P. 562.
5. Патент США № 4826709.
6. Фукуяма Сюньими, Сёкава Акира //Кюкай Токпо. 1989. Сер. 7(2). 189. С. 163.
7. Levy R. A., Gallagher P. K., Shevly F. //Journ. Electrochem. Soc. 1987. V. 134. № 7, P. 1745.

Поступила в редакцию 14.12.92.

УДК 621.382.323-416

А. Д. АНДРЕЕВ, В. М. БОРЗДОВ, В. М. ДИТКОВСКИЙ

#### ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТОК ПОДЛОЖКИ И ДЕГРАДАЦИЮ МОП-ПТ В РЕЖИМЕ РАЗОГРЕВА ЭЛЕКТРОНОВ

It is considered influence of the drain voltage, dopant concentration, mean free path of the hot electrons in the MOSFET channel for temperature interval. It is noted that for conduction of acceleration tests is not necessary to stabilize temperature of the devices.

Деградация полевого транзистора с изолированным затвором (МОП-ПТ) при разогреве электронов в канале является одним из факторов, сдерживающих дальнейшую миниатюризацию интегральных схем. Приборы изменяют свои параметры вследствие генерации на границе раздела окисла и кремния поверхностных состояний при разрыве высокоэнергетическими электронами связей кремний-водород и образования ловушек подвижных зарядов [1]. Время наработки транзистора до отказа при энергии образования ловушки 3, 7 эВ пропорционально  $\exp(3,7/e\lambda E_m)$ , где  $E_m$  – максимальная величина поля в канале,  $e$  – заряд электрона,  $\lambda$  – его средняя длина свободного пробега, и может быть максимальным в определенном диапазоне концентрации легирующей примеси в подложке [2], а входящее в показатель экспоненты произведение  $e \cdot \lambda \cdot E_m$ , характеризующее тепловую энергию электронов, является основным при количественных оценках. В связи с этим возникает необходимость дальнейшего изучения влияния величины  $e\lambda E_m$ , в том числе с применением различных температурных режимов, на токи в канале и подложке транзистора, что имеет важное значение для корректного проведения ускоренных испытаний [3].

В данной работе рассматривается влияние на ток подложки напряжения стока, концентрации легирующей примеси и средней длины свободного пробега электронов в области перекрытия канала МОП-ПТ в режиме разогрева электронов.

Ток подложки генерируется в процессе ударной ионизации горячими электронами и является чувствительным индикатором их возникновения. При измерении тока применялись транзисторы, изготовленные по стандартной технологии кремниевых интегральных схем. Концентрация примесей в кремниевой подложке р-типа составляла  $10^{22}$ ,  $10^{23}$ ,  $10^{24}$  м<sup>-3</sup>, длина и ширина канала – соответственно  $3,10^{-6}$  и  $12,10^{-6}$  м, глубина  $p^+$  – областей истока и стока –  $10^{-6}$  м. Металлический электрод затвора из алюминия. Измерения проводились в интервале температур  $T = 185-375$  К и напряжениях па стоке, превышающих напряжение перекрытия канала.

Для определения  $e\lambda E_m$  использовалась формула, полученная в работе [2]:

$$\lambda = \frac{B\Delta E}{eE_m - \alpha E_u}, \quad (1)$$

где  $B$  – эмпирический коэффициент,  $\Delta E$  – потери энергии при рассеянии электрона на фононе,  $\alpha$  – коэффициент ионизации,  $E_u$  – энергия ионизации. После умножения числителя и знаменателя правой части формулы (1) на длину участка перекрытия канала  $\Delta L$  при максимальной напряженности электрического поля на стоковом переходе  $E_m = (V_c - V_{сн})/\Delta L$  [4] она преобразуется к виду:

$$e\lambda E_m = \frac{B\Delta E}{1 - \frac{\alpha\Delta L E_u}{e(V_c - V_{сн})}}, \quad (2)$$

где  $\alpha\Delta L$  – число электронно-дырочных пар, создаваемых одним электроном на участке перекрытия канала; выражается через токи подложки  $I_p$  и стока  $I_c: I_p = I_c \alpha\Delta L$  [5],  $V_c$  – напряжение на стоке,  $V_{сн}$  – напряжение перекрытия канала.

С увеличением напряжения на стоке интенсивность ионизации возрастает. Для используемой модели лавинного умножения коэффициент умножения равен  $M = (1 - \alpha\Delta L)^{-1}$  [6], а величина  $\alpha\Delta L$  не превышает единицу, т. е. на участке ионизации первичный электрон генерирует не более одного вторичного электрона. В предельном случае все электроны, инжектируемые из инверсионного слоя в область ионизации, могут образовать пару электрон – дырка, и ток подложки становится сравнимым с током в канале.

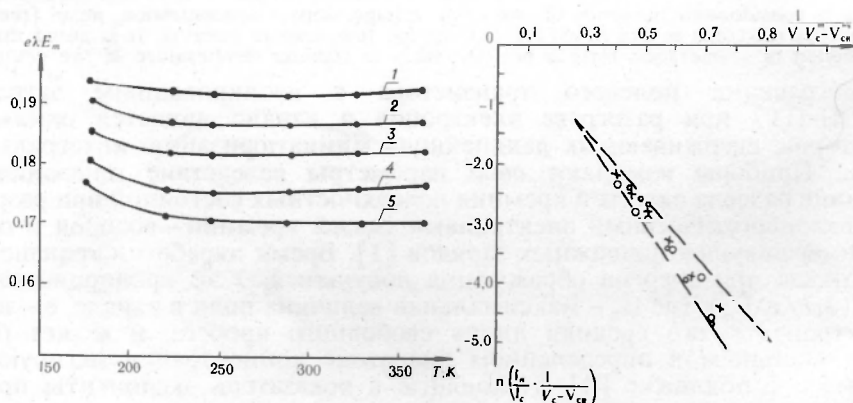


Рис. 1. Зависимость  $e\lambda E_m$  от температуры  $T$  для транзистора с концентрацией примесей в подложке  $10^{22} \text{ м}^{-3}$  при напряжении на затворе 2,5 В. Кривые 1–5 соответственно для  $V_c - V_{сн} = 6,5; 3,2$  В

Рис. 2. Зависимость  $\ln[I_p/I_c(V_c - V_{сн})]$  от  $(V_c - V_{сн})^{-1/2}$  при температуре  $T = 300$  К для концентраций легирующей примеси в канале МОП-ПТ:  $\cdot - 10^{24}$ ,  $\times - 10^{23}$ ,  $\circ - 10^{22} \text{ м}^{-3}$

На рис. 1 даны зависимости  $e\lambda E_m$  от температуры, полученные из (2), в интервале изменения отношения токов подложки и стока  $I_p/I_c = 0,1+0,6$ ,  $M = 1,1+2,5$  и напряжений на стоке  $e(V_c - V_{сн}) > E_u$ ,  $E_u = 1,7$  эВ – энергия образования пары электрон – дырка в кремнии [1].

Коэффициент  $B$  определялся из (1) по значениям  $\lambda$ , полученным из экспериментальных зависимостей коэффициента умножения от напряжения, приложенного между истоком и стоком [7,8]. С увеличением температуры от 185 до 375 К и напряжения стока от 5 до 9 В коэффициент  $B$  возрастает, изменяясь в пределах от 2,2 до 3,4. Как видно из рис. 1, величина  $e\lambda E_m$  уменьшается с уменьшением напряжения на стоке и имеет слабую зависимость от температуры. С ростом уровня легирования канала до  $10^{24} \text{ м}^{-3}$   $e\lambda E_m$  возрастает до максимального значения 0,23 эВ,

имея при этом зависимость от температуры и напряжения на стоке, подобную приведенной на рис. 1.

Найдем отношения  $I_n/I_c$  из (2) и прологарифмируем обе части полученного выражения. Тогда

$$\ln \frac{I_n}{I_c} = \ln \left[ \frac{e(V_c - V_{сн})}{E_u} \right] + \ln \left( 1 - \frac{В\Delta E}{e\lambda E_m} \right). \quad (3)$$

Второе слагаемое правой части (3) можно разложить в ряд, если  $В\Delta E/e\lambda E_m < 1$ . Подставляя значение напряженности электрического поля  $E_m = \sqrt{eN(V_c - V_{сн})/2\epsilon}$  [9], где  $N$ ,  $\epsilon$  – соответственно концентрация примесных атомов в подложке и диэлектрическая постоянная кремния, получим:

$$\frac{I_n}{I_c} = \frac{e(V_c - V_{сн})}{E_u} \exp \left( - \frac{В\Delta E}{e\lambda \left( \frac{eN}{2\epsilon} \right)^{1/2} (V_c - V_{сн})} \right). \quad (4)$$

Концентрация примесных атомов в подложке транзистора измерялась по его выходным характеристикам [10].

На рис. 2 приведена зависимость  $\ln \frac{I_n}{I_c} \cdot \frac{1}{V_c - V_{сн}}$  от  $\frac{1}{\sqrt{V_c - V_{сн}}}$ . Пунктирные

линии показывают интервал изменения полученных значений при изменении температуры и концентрации примесных атомов в подложке транзистора. Как видно, наклон зависимостей практически не изменяется при изменении уровня легирования, и имеется слабая зависимость этого наклона от температуры. Так как экспериментальные точки накладываются друг на друга, на графике отмечены значения только для одной температуры  $T = 300$  К.

Таким образом, полученные данные дают основание предполагать, что нагрев или охлаждение транзистора в рассматриваемом интервале температур не оказывают заметного влияния на тепловую энергию горячих электронов  $e\lambda E_m$ . При заданном напряжении на стоке и фиксированной температуре минимальный ток подложки, а следовательно, и минимальный уровень деградации будет иметь транзистор, у которого произведение  $\lambda(N)^{1/2}$  минимально.

#### Список литературы

1. Hsu C., Hsu F., Ko P., Cham T., Terrill K.//IEEE Journ. Solid-State Circuits. 1985. V. 20. № 1. P. 295.
2. Андреев А. Д., Борздов В. М., Дитковский В. М. Электронная техника. Сер. 2: полупровод. приборы. 1991. Вып. 1(210). С. 43.
3. Hsu F., Chi K.//IEEE Electron. Dev. Lett. 1984. V. 5. № 5. P. 148.
4. Das N. C., Kinkle W. S., Mohanty S.//Int. Journ. Electron. Electron. 1986. V. 60. № 4. P. 495.
5. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. М., 1984.
6. Керролл Д. ж. СВЧ-генераторы на горячих электронах. М., 1971.
7. Troutman R. R.//IEEE Trans. Electron. Dev. 1976. V. ED-23. № 4. P. 418.
8. Андреев А. Д., Борздов В. М., Дитковский В. М.//Вестн АН БССР. Сер. физ.-техн. 1991. № 3. С. 76.
9. Блихер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов. Л., 1986.
10. Андреев А. Д., Борздов В. М., Дитковский В. М.//Вестн. Белорус. ун-та. Сер. 1: Физ. Мат. Мех. 1992. № 1. С. 27.

Поступила в редакцию 07.09.92.

УДК 621.528.3

В. Ф. МАЛИШЕВСКИЙ, А. К. ФЕДОТОВ

#### КРИОСОРБЦИЯ ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ НА ВЫМОРОЖЕННЫХ ПАРАХ ВОДЫ

The results of studying residual-gas cryosorption by freezedout water vapours are given. It is shown that vacuum of about  $10^{-7}$  Torr can be reached when water vapour is cooled down to liquid nitrogen temperatures. Simple methods for self-vacuuming of the interspace in Dewar vessels (cryogenic tanks) and for pumping to a high «oil-free» vacuum by cryosorption evacuation are suggested.

Одним из известных методов создания высокого безмасляного вакуума является использование различных адсорбентов, охлажденных до