

На основании экспериментальных данных по исследованию поведения спектров люминесценции различных кристаллов рубина от температуры можно сделать следующие выводы: зависимость полуширины и сдвига линий рубина от температуры описывается показательной функцией, наиболее устойчивые и интенсивные линии люминесценции при изменении температуры принадлежат кристаллу рубина с содержанием хрома 0,75%, наличие *N*-линий сильной интенсивности в низкотемпературных спектрах кристаллов с большим содержанием Cr^{3+} дает возможность использовать спектр люминесценции этой области в таких установках, где необходимо измерение очень низких температур при высоких давлениях.

1. Свиридов Д.Т., Смирнов Ю.Ф. Теория оптических спектров ионов переходных металлов. М., 1977.
2. Свиридов Д.Т., Свиридова Р.К., Смирнов Ю.Ф. Оптические спектры ионов переходных металлов в кристаллах. М., 1976.
3. Арсеньев П.А., Свиридов Д.Т. Кристаллография. 1969. №14. С.687.
4. Феофилов П.П., Тимофеева В.А., Толстой М.К., Беляев Л.М. // Оптика и спектроскопия. 1965. Т.19. С.817.
5. Свиридов Д.Т., Севастьянов Б.К. и др. // Там же. 1973. Т.35. Вып.1. С.102.
6. Бокша О.Н., Варина Т.М., Попова А.А. Кристаллография. 1972. Т.15. С.5.
7. Прингсхейм П., Фогель М. Люминесценция жидких и твердых тел. М., 1948.
8. Гёттель, Мао, Белл. // ПНИ. 1985. №7. С.127.
9. Hiroshi Iwasaki, Shiego Sueno, Osamu Shimomura. New modification of the high-temperature X-rays diamond-anvil press and an accurate method of pressure-temperature determination. Tokyo, 1986.
10. Павловский А.И., Таценко О.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1986. Т.12. Вып.22. С.35

Поступила в редакцию 24.06.96.

УДК 621.382.537.33:621.317

А.Д.АНДРЕЕВ, А.М.БЕЛЬСКИЙ, А.А.ВАЛИЕВ

ОСОБЕННОСТИ ВАХ МОП-ПТ С ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ ПОДЛОЖКОЙ

The current-voltage characteristics of the MOSFET with a highly-doped substrate have been measured. It has been shown that the onset voltage for the channel current saturation is smaller than the effective gate voltage, and it increases with temperature. These peculiarities may be caused by an increase in the electrical field, decrease in the electron mobility near the drain region or by the drift velocity saturation.

Необходимость исследования параметров МОП-ПТ с высоким уровнем легирования подложки может быть вызвана следующими факторами: применением транзисторов в качестве тестовых элементов при измерении концентрации примесей в высоколегированных компонентах интегральных схем и конструктивно-технологическими требованиями повышения уровня легирования для предотвращения сквозного обеднения в короткоканальных приборах. Одним из таких параметров является напряжение стока, при котором ток в канале транзистора насыщается. Как показано в [1], это напряжение на порядок меньше эффективного напряжения затвора для уровня легирования подложки ($\sim 10^{24} \text{ м}^{-3}$). В данной работе измеренные значения напряжения насыщения тока в канале сравниваются с расчетными при различных концентрациях примесных атомов.

Уравнение вольтамперной характеристики (ВАХ) МОП-ПТ в омической области имеет вид [2,3]:

$$I = \mu C_0 \frac{W}{L} \left[(V_G - V_T) V_D - \frac{V_D^2}{2} \right], \quad (1)$$

где μ — подвижность электронов в проводящем канале, W, L — ширина и длина канала соответственно, V_G, V_D, V_T — напряжение затвора, стока и пороговое соответственно при заземленном истоке.

На рис.1 показаны зависимости тока I от напряжения V_D транзистора, изготовленного на кремниевой подложке p -типа, ориентированной в направлении (111), с концентрацией примесей $N_A = 2 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$, толщина окисла под затвором $\sim 0,6 \text{ мкм}$, глубина диффузионных n^+ -областей $\sim 0,8 \text{ мкм}$, электрод затвора алюминиевый. Как видно из рис.1, ток насыщается при напряжении $V_D = V_{DS} \ll (V_G - V_T)$, $V_T = 140 \text{ В}$, начало участка насыщения смещается в сторону более высоких напряжений V_D при увеличении $(V_G - V_T)$ и ВАХ практически параллельна оси абсцисс. В заданном интервале изменения стокового напряжения пренебрежимо мало влияние механизмов электростатической обратной связи и подавления инверсии типа электропроводности. Величина поверхностной плотности инверсионных электронов вдоль границы раздела кремний — диоксид кремния изменяется незначительно из-за действующего неравенства $(V_G - V_T) \gg V_D$ и насыщение тока не сопровождается перекрытием канала в точке, ближайшей к стоку.

При инверсии электроны образуют проводящий канал, который в структуре с резкими n^+ - p -переходами включает области пространственного заряда (ОПЗ) с размером обедненного p -слоя

$$d_1 = \sqrt{2\epsilon(V_0 - V_1) / eN_A}, d_2 = \sqrt{2\epsilon(V_0 + V_2) / eN_A}$$

прямо и обратно смещенных переходов истока и стока соответственно [2], где участок $L - d_1 - d_2$, $V_0 = (kT/e) \ln(N_D N_A / n_i^2)$ — встроенный потенциал N_D, N_A — концентрация донорной и акцепторной примесей соответственно, n_i — собственная концентрация носителей заряда, V_1, V_2 — падение напряжения на переходе истока и стока соответственно. Полное сопротивление проводящего канала равно [3]:

$$\frac{V_D}{I} = \frac{d_1}{W\mu_1 Q_N} + \frac{d_2}{W\mu_2 Q_N} + \frac{L - d_1 - d_2}{W\mu_3 Q_N}, \quad (2)$$

где I — ток в канале, μ_1, μ_2, μ_3 — подвижность электронов в обедненной области истока, стока и собственно канала соответственно, $Q_N = C_0(V_G - V_T)$, C_0 — удельная емкость окисла. Электроны, движущиеся вдоль канала, как только они достигают стока, замещаются инжектируемыми электронами из истока, в результате поддерживается равновесная плотность заряда Q_N при заданной величине напряжения $(V_G - V_T)$ [4]. При инжекции из истока электроны проходят через ОПЗ в подложке, преодолевая силы сопротивления электрического поля встроенного потенциала, замедляются и теряют направленную скорость. В канал могут поступать электроны, имевшие в момент инжекции скорость, в предельном случае равную скорости v_{DS} в режиме насыщения. Они проходят участок d_1 со средней скоростью $v_{DS}/2$ и создают ток $V_1/R \approx Q_N W v_{DS}/2$ в пониженном электрическом поле [5], где R — сопротивление прямо смещенного перехода истока $\sim 100 \text{ Ом}$ [6]. Величина $V_1 = 0,015 \text{ В}$ (для $C_0 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ Ф/м}^2$, $V_G - V_T = 10 \text{ В}$, $v_{DS} = 10^6 \text{ м/с}$), которой можно пренебречь ($V_1 \ll V_D$) и записать $V_D = V_2 + V_3$. Так как ток вдоль канала $I = \text{const}$ [4], то из (2) $V_2 \mu_2 / d_2 = V_3 \mu_3 / (L - d_1 - d_2)$, V_3 — падение напряжения на участке $(L - d_1 - d_2)$.

В области резкого перехода стока напряженность электрического поля $E_m = \sqrt{eN(V_0 + V_2) / 2\epsilon}$ [2] превышает напряженность электрического поля $V_D/L = E$, создаваемого стоковым напряжением. Для $N_A = 2 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$,

$L=10$ мкм, $V_D=0,2$ В, $E_m=4 \cdot 10^7$ В/м, $E=2 \cdot 10^4$ В/м и $E_m \gg E$. Из условия постоянства тока вдоль канала $E_m \mu_2 \cong E \mu_3$ и $V_2 = (V_0/2) \left[\sqrt{1 + 4V_D/V_0} - 1 \right]$ при $d_2 \ll L$: $V_D=0,2$ В, или более 80% напряжения, приложенного между истоком и стоком, падает на области обеднения d_2 (высокий градиент канального потенциала вблизи стокового перехода [7]). Напряжение $V_2 > V_1, V_3$ и ток в проводящем канале будет определяться в основном сопротивлением участка d_2 с подвижностью электронов μ_2 . Как видно из рис.1, переход ВАХ к насыщению происходит на сравнительно малом интервале изменения напряжения V_D , поэтому в предельном случае $V_D = V_{DS}$, $I = I_S$, $v_D = v_{DS} \approx \mu_2 E_m (\mu_2 \approx \mu, E_m > E)$ из (1) получим

$$V_{DS} \cong \frac{I_S \sqrt{e N_A (V_0 + V_2) / 2\epsilon}}{v_{DS} C_0 (W/L) (V_G - V_T)} \quad (3)$$

На рис.1 знаком (*) отмечены значения V_{DS} , рассчитанные по формуле (3). По этой же формуле получены напряжения V_{DS} при $N_A = 10^{23}, 7 \cdot 10^{23}$ [1], $2 \cdot 10^{24}$ м⁻³ и соответственно $I_S = 2 \cdot 10^{-5}, 3 \cdot 10^{-6}, 4 \cdot 10^{-7}$ А; $(V_G - V_T) = 10, 20, 15$ В, $W/L = 2,5; 3; 2$, $v_{DS} = 10^5$ м/с [2]. Величина $V_{DS} = 2,5; 1,5; 0,25$ В в порядке возрастания указанных концентраций N_A . На рис.1 точками показаны рассчитанные по (1) значения тока. Подвижность электронов $\mu = \mu_0$ на омическом участке определялась по формуле $\frac{\partial I}{\partial V_D} \Big|_{V_D \rightarrow 0} = \mu_0 C_0 (W/L) (V_G - V_T)$ [2].

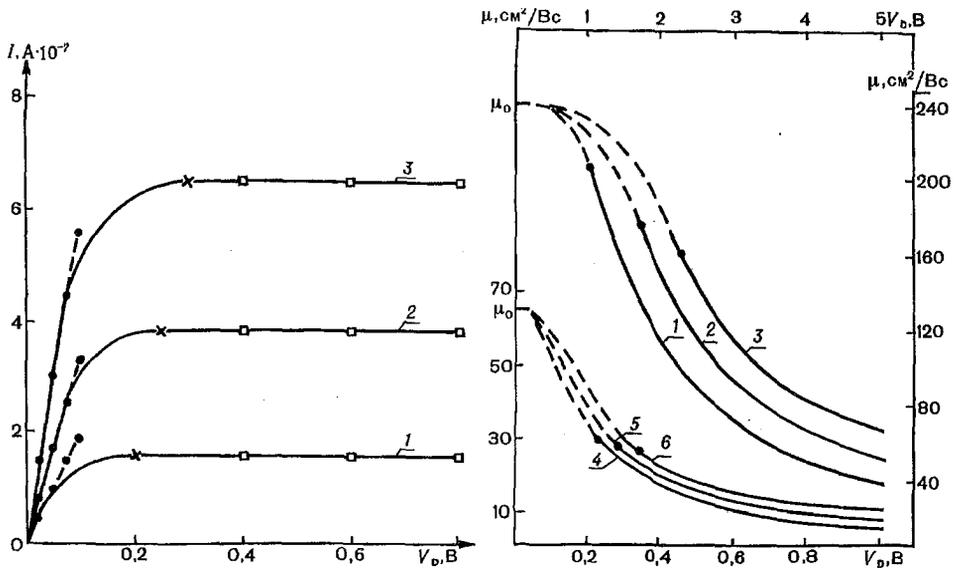


Рис.1. Зависимости тока стока от напряжения на стоке: 1-3 соответствуют $(V_G - V_T) = 5, 10, 15$ В, $V_T = 140$ В, $N_A = 2 \cdot 10^{24}$ м⁻³, $T = 300$ К

Рис.2. Зависимости подвижности электронов от напряжения на стоке при насыщении тока: 1-3 по шкале $V_D = (0 \div 5)$ В, $\mu = 0 \div 240$ соответствуют $(V_G - V_T) = 20, 30, 50$ В, $N_A = 7 \cdot 10^{23}$ м⁻³ [1]; 4-6 по шкале $V_D = (0 \div 0,8)$ В, $\mu = 0 \div 70$ для $(V_G - V_T) = 5, 10, 15$ В (рис.1). Точками отмечены значения $V_D = V_{DS}$

При увеличении напряжения V_D ВАХ изгибаются вниз вследствие роста сопротивления на участке канала, ближайшем к стоку, и ток насыщается [3]. Рост сопротивления может быть обусловлен уменьшением числа электронов под воздействием напряжения V_D и деградацией подвижности. Так как канал не перекрывается, то формально уравнение (1) может быть приме-

нено для расчета тока и подвижности электронов на горизонтальной ветви ВАХ при условии $\partial I / \partial V_D = 0$ [8], $\mu = f(V_D)$. Дифференцируя (1) по напряжению V_D , получим $d\mu/\mu = -[(V_G - V_T) - V_D] dV_D / [(V_G - V_T)V_D - V_D^2/2]$ и найдем изменение подвижности в пределах $\mu_S \div \mu$, $V_{DS} \div V_D$:

$$\mu = \mu_S \frac{V_{DS}[2(V_G - V_T) - V_{DS}]}{V_D[2(V_G - V_T) - V_D]}, \quad (4)$$

где μ_S — подвижность электронов в точке ВАХ $V_D = V_{DS}$. На рис.1 знаком (□) отмечены расчетные значения тока по формулам (1), (4). Характер изменения подвижности $\mu = f(V_D)$ при различных концентрациях N_A и напряжениях $(V_G - V_T)$ показан на рис.2.

Приведенные в данной работе экспериментальные результаты дают основание предполагать, что в n -канальном МОП-ПТ с повышением уровня легирования подложки ($N_A > 10^{23} \text{ м}^{-3}$ и $L > 3 \text{ мкм}$) насыщение тока не сопровождается перекрытием канала и может быть вызвано уменьшением подвижности в области стокового перехода и насыщением дрейфовой скорости электронов. При анализе механизма насыщения необходимо использовать зависимость от температуры тока I_S и напряжения V_{DS} , которые уменьшаются при охлаждении транзистора: $I_S = 2,1; 3,9; 11 \cdot 10^{-7} \text{ А}$, $V_{DS} = 0,2; 0,35; 0,65 \text{ В}$, $V_T = 145, 140, 135 \text{ В}$ соответственно при $T = -100, +20, +100^\circ\text{С}$, $V_G = 150 \text{ В}$. Расчет по формуле (3) дает согласующиеся с измеренными значениями V_{DS} . Более подробные результаты с учетом зависимости от температуры концентрации ионизированных примесных атомов [9], насыщенной дрейфовой скорости [10] и встроенного потенциала [2] будут представлены в последующей публикации.

1. Андреев А. Д., Бельский А. М., Валиев А. А. // Вестн. Белорус. ун-та. Сер.1. 1996. №1. С.26.
2. Маллер Р., Кейминс Г. Элементы интегральных схем. М., 1989
3. Россато Л. Физическая электроника и микроэлектроника. М., 1991.
4. Sigfridsson В. // Solid-State electron. 1991. 34. №9. P.937.
5. Yamaguchi K. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1983. 30. №6. P.658.
6. Narayanan M. // Solid-State Technol. 1978. 21. №8. P.80.
7. Yeow Y. T. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1988. 35. №12. P.2368.
8. Dike R. S. // Int. J. Electron. 1994. 76. №3. P.403.
9. Андреев А. Д., Борзлов В. М., Дитковский В. М. // Вестн АН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 1994. №3. С.81.
10. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М., 1984. Т.1.

Поступила в редакцию 01.04.96.

УДК 536.425

Л.О. МЕЛЕШКО

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ФОРМИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАРОДЫШЕЙ АЛМАЗА В ОБЛАСТИ ЕГО МЕТАСТАБИЛЬНОСТИ

It is established that in the process of diamond synthesis in the metastable state with increasing oversaturation the pressure in nucleation centres of a new phase also increases, and might achieve the value associated with the system's diamond stability state, where the formation of its structure takes place at the initial stage.

В соответствии с общими принципами статистической механики в системах, находящихся даже в равновесном состоянии, вследствие флуктуации непрерывно возникают и исчезают очаги новых фаз. Однако их рост становится возможным лишь при некотором отступлении от равновесия в пересыщенном паре, растворе или переохлажденной жидкости после достижения достаточного развития. Если скорость возникновения новой фазы мала, то в этом неравновесном (метастабильном) состоянии исходная фаза может долго сохраняться. Движущей силой, ведущей к образованию новой фазы при заданных температуре T и объеме V (или других экстенсивных