

отдельных составляющих спиновой конфигурации (локальный уровень, определяемый минимизацией инвариантного полинома по компонентам параметра порядка).

Особо выделяются спиновые конфигурации с одним минимумом энергии. Такие состояния обладают наиболее высокой симметрией для кубической сингонии и однородной ориентацией всех спинов вдоль пространственных осей типа [111] кубической магнитной решетки.

Термодинамически возможно существование спиновых конфигураций с нарушением симметрии, которым соответствует более одного минимума энергии и более сложное распределение областей намагниченности с ориентацией спинов вдоль различных кристаллографических направлений. В таких спиновых конфигурациях характерно наличие локально устойчивых состояний вдоль осей типа [110] и [100].

Количество возможных устойчивых спиновых конфигураций как с однородной, так и более сложной спиновой структурой определяется симметрией магнитной решетки.

При протекании в рассматриваемых магнетиках процессов спонтанной спиновой переориентации возможны фазовые переходы двух типов: а) между состояниями с наиболее симметричными спиновыми конфигурациями, обладающими одним минимумом энергии; б) между устойчивыми локальными состояниями. С точки зрения термодинамики, основными являются переходы первого типа. Переходы между локальными фазами играют чаще всего вспомогательную роль и управляются закономерностями фазовых изменений на глобальном уровне.

1. Акулов Н. С. Ферромагнетизм. М.; Л. 1939.
2. Вонсовский С. В. Магнетизм. М., 1971.
3. Виглин А. С. // ФТТ. 1960. Т.11. №2. С.331.
4. Гуфан Ю. М., Торгашев В. И. // ФТТ. 1980. Т.22. Вып.6. С.1629.
5. Гуфан Ю. М. // ЖЭТФ. 1971. Вып.4. С.1537.

Поступила в редакцию 10.09.97.

УДК 621.382.323-416

А.Д.АНДРЕЕВ, Ф.Ф.КОМАРОВ, В.Н.МИХЕЙ

## ЭМИССИЯ ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПОДЗАТВОРНЫЙ ДИЭЛЕКТРИК МОП-ПТ С ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ ПОДЛОЖКОЙ

Substrate ionization currents are measured and electron mean free path and energy are defined for dopant level substrate  $7 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$  MOSFET. The potential barrier across Si-SiO<sub>2</sub> division and emission electron currents are calculated in the range gate voltage. Substrate and emission current gradients have contrarious signs. These peculiarities may be caused by strengthening of impact ionization.

С уменьшением длины канала [1-3] и увеличением уровня легирования подложки [4] МОП-ПТ напряжение на стоке, при котором ток насыщается, становится меньше эффективного напряжения затвора и проводящий канал может не перекрываться. Электроны перемещаются по непрерывному пути от истока до стока, приобретают энергию, которая достаточна для преодоления потенциального барьера на границе диоксид кремния-кремний, могут эмитировать в окисел. Зависимость тока эмиссии от уровня легирования подложки приведена в [5]. В данной работе рассмотрено влияние напряжения, приложенного к затвору, на высоту потенциального барьера, среднюю длину свободного пробега и энергию электронов, а также эмиссионный ток в транзисторе с концентрацией примесей в кремниевой подложке  $N_A = 7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ . Длина  $L$  и ширина  $W$  канала равны 4 и 12 мкм соответственно, глубина областей истока и стока  $x_j = 0,8$  мкм, толщина окисла кремния под алюминиевым затвором  $x_{ox} \approx 0,3$  мкм.

Для расчета эмиссионного тока применялась формула, полученная в [5]:

$$I_g = \frac{W\Delta L\lambda}{x_j^2} C_0 (V_g - V_T - V_S) \sqrt{\frac{e\lambda E_m}{2\pi m^*}} \exp\left(-\frac{\varphi_a}{e\lambda E_m}\right) \left(1 - e^{-\frac{x_j}{\lambda}}\right), \quad (1)$$

где  $\Delta L$  — размер области ионизации вдоль канала,  $\lambda$  — средняя длина свободного пробега электронов,  $C_0$  — удельная емкость окисла,  $V_g, V_T, V_S$  — напряжение на затворе, пороговое и среднее напряжение на участке ионизации,  $\varphi_a$  — высота потенциального барьера на границе Si-SiO<sub>2</sub>.

В структуре с заданной концентрацией примесей умножение носителей заряда осуществляется в канале, который непрерывен, или  $(V_g - V_T) \gg V_S$  [4], поэтому плотность электронов около стока и величина тока  $I_g$  (1) определялись только эффективным напряжением затвора  $V_g - V_T$ . При повышенном уровне легирования подложки возрастает приложенное к затвору напряжение, составляющая напряженности электрического поля в окисле и компонент туннельного тока, который учитывается дополнительным понижением барьера [3,6]:

$$\varphi_a = 3,29B - aE_{ox}^{1/2} - bE_{ox}^{2/3},$$

где  $a = 2,59 \cdot 10^{-4} \text{e (В} \cdot \text{см)}^{1/2}$ ,  $b = 10^{-5} \text{e (см}^2 \text{В)}^{1/3}$ ,  $E_{ox}$  — напряженность электрического поля в окисле, равная отношению падения напряжения на окисле  $V_o = V_g - \varphi_{ms} - \varphi_s$  к его толщине,  $\varphi_{ms}$  — контактная разность потенциалов в МОП-конденсаторе,  $\varphi_s = 2\varphi_f$  — потенциал на границе Si-SiO<sub>2</sub> в режиме сильной инверсии,  $\varphi_f = (kT/e) \ln(N_A/n_i)$ ,  $n_i$  — собственная концентрация носителей заряда. Для концентрации примесей  $N_A = 7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ ,  $\varphi_f \sim 0,4$ ,

$$\varphi_{ms} \sim 0,8, V_g \sim 60 \text{ В и } E_{ox} \approx \frac{V_g}{x_{ox}}.$$

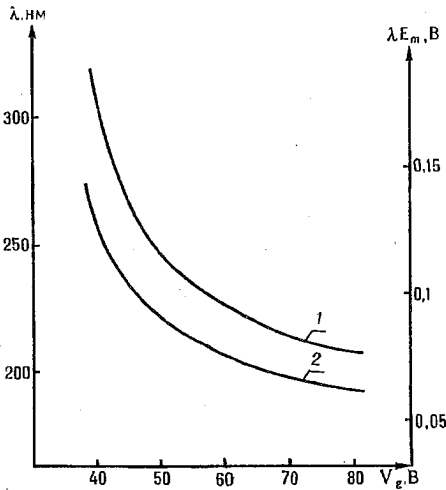


Рис. 1. Зависимости средней длины свободного пробега  $\lambda$  (1) и тепловой энергии электронов (2) от напряжения затвора  $V_g$  в режиме умножения носителей заряда,  $V_D = 4 \text{ В}$ .

$d\lambda/dV_g, d(\lambda E_m)/dV_g$  имеют отрицательный знак (разность между напряжением на стоке  $V_D$  и напряжением насыщения тока  $V_{DS}$  уменьшается с увеличением  $V_g$ ), что приводит к уменьшению тока  $I_g$  (1).

На рис. 2. даны зависимости измеренного тока подложки  $I_x$  и рассчитанного по формуле (1) компонента эмиссионного тока  $I_g$  от напряжения затвора. Из рисунка видно, что ток  $I_x$  возрастает с увеличением напряжения  $V_g$ . Это увеличение можно объяснить тем, что для заданного напряжения на стоке, выбранного в интервале используемых уровней умножения носителей заряда, возрастает плотность инверсионных электронов, а также их число с энергией, равной или большей порога ионизации. Пропорционально возрастает также

Электроны проходят без соударений расстояние  $x = x_j$  из глубины подложки к границе раздела, если  $x_j \sim \lambda$ . Глубину стока как технологический параметр уменьшают ( $x_j \sim 0,2 \text{ мкм}$ ), чтобы снизить тепловой ток утечки. В интервале изменения уровня легирования  $N_A = 10^{22} \div 10^{24} \text{ м}^{-3}$  величина  $\lambda \approx (3000 \div 300) \text{ нм}$  [5] и в (1)  $\exp(-x_j/\lambda) \ll 1$ , поэтому основной вклад в эмиссионный ток вносят параметры:  $\Delta L, \lambda E_m, V_g, \varphi_a$  при заданных значениях  $x_j, W, V_T$ . На рис. 1. даны зависимости среднего арифметического значения  $\lambda$  от  $V_g$ , полученные по трехпараметрической модели и току подложки в режиме умножения носителей заряда в поле, напряженность которого рассчитывалась по известной формуле

$$E_m = \sqrt{eN(V_D - V_{DS}/2\epsilon)}, \text{ и } \lambda E \text{ от } V_g.$$

Как видно из рисунка, градиенты

число электронов с энергией, равной или большей высоты потенциального барьера. Эти электроны могут эмитировать в окисел и создавать ток затвора, величина которого будет зависеть от интенсивности рассеяния электронов или соотношения между толщиной окисла  $x_{ox}$  и средней длиной свободного пробега электронов  $\lambda_{ox}$  при перемещении от границы раздела Si-SiO<sub>2</sub> к затвору. Если  $x_{ox} \sim \lambda_{ox}$ , ток  $I_g$  может быть сравним с током, протекающим через подзатворный диэлектрик [7]. Так как стоковое напряжение меньше эффективного напряжения затвора, то проводящий канал не перекрывается и электроны перемещаются от истока до стока по непрерывному пути [8]. В этом случае не следует учитывать эффект обратного поля вблизи перехода стока [9] и вероятность того, что электрон преодолевает существующее на окисле падение напряжения [7]. Уменьшение тока вызвано в основном сильной зависимостью показателя экспоненты  $\varphi_d/e\lambda E_m$  в (1) от напряжения  $V_g$  (рис.3).

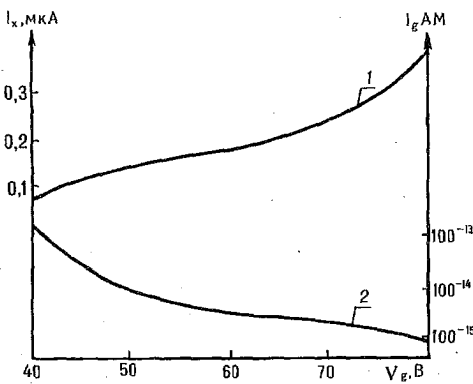


Рис.2. Зависимости измеренного тока подложки  $I_x$  и рассчитанного по (1) тока эмиссии  $I_g$  от напряжения затвора  $V_g$  в режиме умножения носителей заряда,  $V_D = 4$  В.

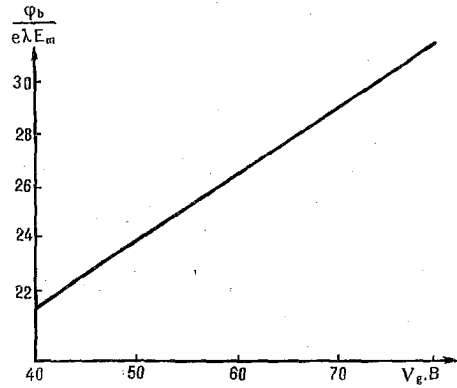


Рис.3. Зависимость показателя экспоненты  $\varphi_d/e\lambda E_m$  в (1) от напряжения затвора  $V_g$ .

Полученные экспериментальные и расчетные данные показывают, что при повышении уровня легирования подложки МОП-ПТ до  $7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ , толщине подзатворного диэлектрика  $\sim 0,3$  мкм, глубине  $n^+$ - $p$ -перехода стока  $\sim 0,8$  мкм увеличение приложенного к затвору напряжения приводит к увеличению тока подложки, который формально используют для оценки деградации порогового напряжения и крутизны вольтамперной характеристики. В данном случае эта оценка не будет адекватной, так как ответственный за деградацию ток эмиссии имеет противоположную зависимость от напряжения затвора. В структурах типа МОП-ПТ КНД подбором глубины  $n^+$ - $p$ -перехода стока [5] возможна оптимизация токов утечки тепловой генерации и эмиссии горячих электронов, чтобы снизить их значения до сравнимых величин и, следовательно, определить необходимую толщину слоя полупроводника, в котором изготавливается транзистор.

1. Ghibando G. // Phys. Stat. Sol. (a). 1989. 113. P.223.
2. Arora N., Sharma M. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1991. 38. №6. P.1392.
3. Banna M. // Int. J. Electron. 1994. 77. №1. P.49.
4. Андреев А.Д., Бельский А.М., Валиев А.А. // Вестн. Белорус. ун-та. Сер.1. 1997. С.26.
5. Андреев А.Д., Борисович Д.Д., Комаров Ф.Ф. и др. // Вестн. Академіі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1997. №4. С.58.
6. Ning T.H., Osburn C.M., Yu H.N. // J. Appl. Phys. 1977. 48. №1. P.286.
7. Miura-Mattausch M., Schwerin A., Weber W. et. all // IEE Proceedings. 1987. 134. Pt.1. №4. P.111.
8. Андреев А.Д., Бельский А.М., Валиев А.А. // Вестн. Белорус. ун-та. Сер.1. 1996. №1. С.26.
9. Acovic P., Dutoit M. // Helvet. Rhys. Acta. 1988. 61. №1-2. P.117.

Поступила в редакцию 05.03.98.