

Автокоррекция характеристик полевых транзисторов в режиме спонтанной объемно-зарядовой ионной поляризации подзатворного окисла

© А.Г. Ждан, В.Г. Нарышкина, Г.В. Чучева[†]

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, 141190 Фрязино, Россия

(Получена 23 сентября 2008 г. Принята к печати 7 октября 2008 г.)

В кремниевом полевом транзисторе с инверсионным n -каналом осуществлена спонтанная объемно-зарядовая ионная поляризация подзатворного окисла в режиме джоулева разогрева прибора током стока I_d . Характеристики транзистора, измеренные при комнатной температуре (T_r) до и после термополевой обработки, показывают, что локализация положительных ионов (Na^+) у границы раздела SiO_2/Si сопровождается увеличением эффективной подвижности электронов (в ~ 2.3 раза), крутизны, I_d и небольшим уменьшением порогового напряжения ($\Delta V_{th} = 0.58$ В). При $T = T_r$ модифицированные характеристики транзистора сохраняются в течение месяцев; их легко прогнозируемо варьировать изменением I_d и продолжительностью нагрева.

PACS: 85.30.Tv, 73.40.Qv, 73.61.Ng, 85.40.Ry

Смещение подвижных ионов (Na^+) в подзатворном окисле кремниевых полевых транзисторов к границе раздела SiO_2/Si приводит к существенному (более чем в ~ 3 раза) увеличению эффективной подвижности электронов $\mu^* = (1/C_i)d\sigma_s/dV_g$ в инверсионном канале [1]. Здесь C_i — „удельная емкость окисла“, $\sigma_s = I_d L / W V_d$ — удельная поверхностная проводимость, I_d — ток стока, V_g — потенциал полевого электрода, L — расстояние между электродами исток/сток, W — их ширина, V_d — напряжение на стоке. Наблюдавшиеся при комнатной температуре ($T_r = 293$ К) после поляризации окисла значения μ^* превышали подвижность электронов в массивном кремнии с эквивалентным уровнем легирования [1,2]. В работе [1] ионная поляризация окисла осуществлялась посредством нагрева транзистора от внешнего источника до $T = 423$ К при $V_g = 20$ В. Напряжение V_g прикладывалось к затвору относительно соединенных вместе истока, стока и подложки транзистора (поляризация в диодной конфигурации). Представляется интересным исследовать эффекты спонтанной объемно-зарядовой ионной поляризации окисла в режиме джоулева саморазогрева транзистора током стока.

Эксперименты проводились на полевых транзисторах с толщиной термического подзатворного окисла $h = 1000$ Å, $W = 1$ мм, $L = 10$ мкм. При заданном потенциале затвора $V_g = 20$ В последовательно увеличивалось напряжение на стоке V_d до уровня $V_d > 5$ В, при котором начинался саморазогрев транзистора. Его температура регистрировалась микротермопарой медь-константан. На рис. 1 приведена типичная динамика зависимости тока стока I_d от времени t ($V_d = 6.73$ В). Начальный спад I_d , по-видимому, обусловлен уменьшением μ^* с повышением температуры транзистора [2], а его последующий рост — с увеличением μ^* , вследствие поляризации окисла, сопровождающейся локализацией

положительных ионов в SiO_2 у поверхности Si [1]. В области $t \approx 200$ с температура транзистора практически стабилизируется ($T = 437$ К), тогда как процесс ионной поляризации окисла, несмотря на уменьшение его темпа, еще далек от завершения [3]. На рис. 2, 3 представлены зависимости тока стока I_d и производных $dI_d(V_g)/dV_g$ от потенциала затвора V_g . Эти кривые получены при $T = 293$ К и $V_d = 0.1$ В до (1) и после (2) спонтанной поляризации окисла. Производные dI_d/dV_g найдены численным дифференцированием кривых 1, 2 (рис. 2) с применением процедуры сглаживания по адаптивному тихоновскому алгоритму [4,5].

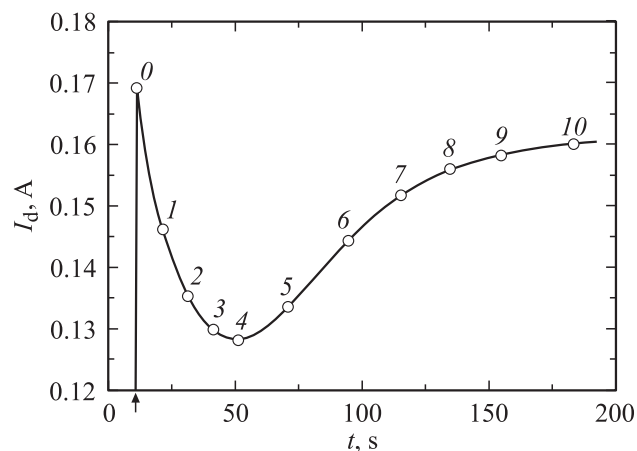


Рис. 1. Зависимость тока стока I_d от времени t в режиме джоулева саморазогрева полевых транзисторов; потенциал затвора $V_g = 20$ В, потенциал стока $V_d = 6.73$ В. Динамика нагрева транзистора отражается последовательностью точек 0–10, соответствующих температуре T , К: 0 — 293, 1 — 350, 2 — 385, 3 — 404, 4 — 410, 5 — 420, 6 — 429, 7 — 432, 8 — 435, 9 — 436, 10 — 437. Вертикальной стрелкой отмечен момент подачи напряжения на сток.

[†] E-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

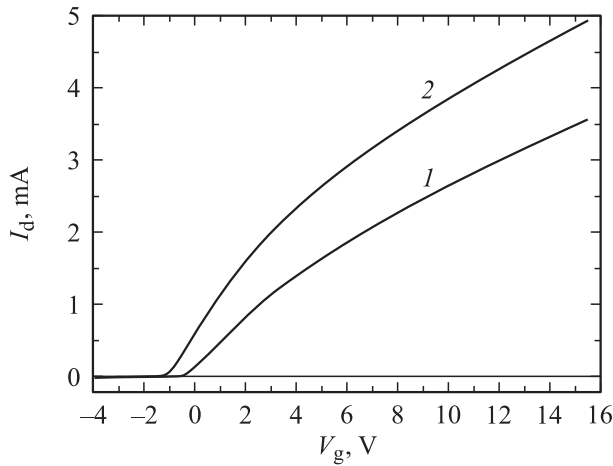


Рис. 2. Ток стока I_d в функции от потенциала полевого электрода V_g при напряжении на стоке $V_d = 0.1$ В и температуре $T_f = 293$ К. Кривая 1 — до, 2 — после спонтанной поляризации окисла (рис. 1).

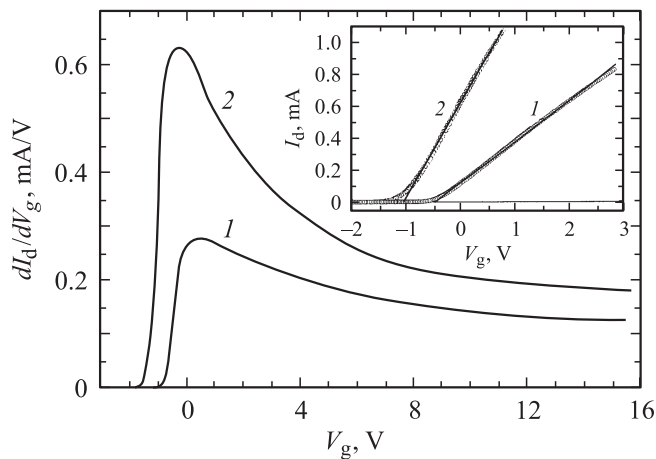


Рис. 3. Результаты численного дифференцирования кривых 1 и 2 на рис. 2. На вставке — иллюстрация процедуры определения порогового напряжения транзистора V_{th1} , V_{th2} по начальным областям нарастания зависимости тока стока I_d от потенциала затвора V_g (рис. 2). Номера кривых на рисунке и на вставке соответствуют нумерации рис. 2. Полученные параметры: 1 — $V_{th1} = -0.47$ В, 2 — $V_{th2} = -1.05$ В, $\Delta V_{th} = V_{th1} - V_{th2} = 0.58$ В.

Из приведенных на рис. 2, 3 данных явствует: спонтанная ионная поляризация окисла, как и в [1], сопровождается увеличением тока стока, крутизны

$$g = \left. \frac{dI_d}{dV_g} \right|_{V_d = \text{const}} \propto \mu^*$$

и эффективной подвижности электронов, а также уменьшением порогового напряжения транзистора. Используя приведенные выше выражения для μ^* и σ_s , имеем

$$\mu^* = \frac{L}{C_i W V_d} \frac{dI_d}{dV_g}.$$

Рассчитывая μ^* в максимумах кривых 1, 2 (рис. 3) — μ_{m1}^* , μ_{m2}^* соответственно, — находим $\mu_{m1}^* = 808$, $\mu_{m2}^* = 1856$ $\text{cm}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ($L = 10^{-3}$ см, $W = 10^{-1}$ см, $C_i = 3.45 \cdot 10^{-8}$ Ф/см², $V_d = 0.1$ В), т.е. после поляризации окисла максимальное значение μ^* возрастает в ~ 2.3 раза. Пороговое напряжение транзистора V_{th} после поляризации окисла (рис. 2, кривая 2) сдвигается в сторону отрицательных значений V_g на величину $\Delta V_{th} = 0.58$ В. Значения V_{th} определялись посредством экстраполяции линейных областей зависимостей $I_d(V_g)$ (рис. 2), измеренных при малых V_g , до пересечения с осью $I_d = 0$ [2]. Эту процедуру иллюстрирует вставка на рис. 3.

Следует заметить, что исходные свойства поляризованного в спонтанном режиме транзистора (рис. 2, 3, кривые 1) полностью восстанавливаются после деполяризации подзатворного окисла в диодной конфигурации при $T = 423$ К и $V_g = -10$ В. Процесс деполяризации осуществляется при нагреве транзистора внешним источником.

Таким образом, экспериментальные данные, полученные в спонтанном режиме ионной поляризации окисла, в общем очень хорошо согласуются с результатами работы [1]. Выше отмечалось, что стабилизация температуры транзистора при спонтанном терморазогреве происходит раньше, чем плотность ионов, сосредоточенных в SiO_2 у границы с Si, достигает насыщения ($6 \cdot 10^{13}$ см⁻² [1]). Это обстоятельство естественным образом объясняет несколько меньшее значение $\mu_{m2}^* = 1856$ $\text{cm}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, чем достигнутое в работе [1] $\mu_{m2}^* = 2645$ $\text{cm}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. По сдвигу порогового напряжения ΔV_{th} легко найти плотность не нейтрализованных ионов N^+ , локализованных в результате поляризации у поверхности кремния:

$$N^+ = \frac{\Delta V_{th} C_i}{q} = 1.2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}.$$

Отсюда и из данных работы [1] следует, что подавляющее количество ионов, локализованных у поверхности Si, нейтрализовано электронами инверсионного слоя.

Характеристики транзисторов, модифицированные поляризацией окисла (кривые 2 на рис. 2, 3) сохраняются при комнатной температуре в течение весьма длительного времени (месяцы). Это обстоятельство может быть использовано для записи информации, т.е. для создания „элионных“ запоминающих устройств [4,5], в особенности, если учесть, что время „записи“ существенно сокращается при увеличении потенциала стока, стимулирующего интенсивность джоулевого разогрева канала. Возможность автокоррекции характеристик готовых приборов представляется полезной для целей прецизионной симметризации параметров входных каскадов дифференциальных усилителей. Наконец, простота варьирования режима саморазогрева транзисторов за счет варьирования значений V_g , V_d и продолжительности токовой

нагрузки позволяет изменять в существенных пределах их базовые характеристики, что открывает перспективы самоорганизации параметров подобных приборов и электронных схем на их основе.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-07-00360-а).

Список литературы

- [1] Ю.В. Гуляев, А.Г. Ждан, Г.В. Чучева. ФТП, **41**, 368 (2007).
- [2] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984).
- [3] Е.И. Гольдман, А.Г. Ждан, Г.В. Чучева. ФТП, **34**, 677 (2000).
- [4] Ю.В. Гуляев, А.Г. Ждан, В.Г. Приходько. Препринт ИРЭ РАН № 46 [418] (М., 1990).
- [5] Е.И. Гольдман, В.А. Иванов. Препринт ИРЭ РАН № 22 [551] (М., 1984).

Редактор Т.А. Полянская

Self-correction of field-effect transistor characteristics in the regime of the spontaneous volume-charged ion polarization of a gate oxide

A.G. Zhdan, V.G. Naryshkina, G.V. Chucheva

Institute of Radio Engineering and Electronics,
Russian Academy of Sciences,
141190 Fryazino, Russia

Abstract The spontaneous volume-charged ion polarization of a gate oxide in the silicon field-effect transistor with the inversion n -channel was realized in the regime of the joule heating of the transistor by the drain current I_d . Characteristics of the transistor, measured under the room temperature (T_r) before and after thermofield processing, show, that the localization of positive ions (Na^+) at the SiO_2/Si interface is accompanied by the increase of the efficient electron mobility (in ~ 2.3 times), the steepnesses, the I_d and the small decreasing of the threshold voltage ($\Delta V_{th} = 0.58$ V). Under the $T = T_r$ modified characteristics of the transistor were saved for months; their easy prognosis to vary the change I_d and time of the heating.