

Нормальный и аномальный гистерезис проводимости в канале прозрачного сегнетоэлектрического транзистора

© И.Е. Титков, И.П. Пронин, Е.Ю. Каптелов, Л.А. Делимова, И.А. Линийчук, И.В. Грехов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: ITitkov@mail.ioffe.ru

Созданы и исследованы структуры прозрачного сегнетоэлектрического полевого транзистора PZT/SnO₂/Al₂O₃ с „нормальным“ и „аномальным“ гистерезисом проводимости канала. Впервые получена „нормальная“ петля модуляции в данной структуре. В качестве канала полевого транзистора использовались легированные сурьмой эпитаксиальные пленки SnO₂/Al₂O₃, напыленные YAG-лазером из металлической мишени. Сегнетоэлектрические пленки PZT осадились магнетронным распылением. Распределение глубоких уровней на границе PZT/SnO₂ измерялось модифицированным методом релаксационных токов. Установлено, что соотношение поляризационного заряда и заряда ловушек на границе PZT/SnO₂ критически влияет на направление гистерезиса проводимости канала.

Работа выполнена при поддержке грантов ОФН, Президиума РАН и РФФИ (№ 06-08-01370а).

PACS: 77.80.Dj, 73.50.Td, 85.30.Tv

1. Введение

Прозрачный полевой транзистор, предложенный Номура [1], стимулировал большой прогресс в развитии других активных элементов прозрачной электроники. Элементы прозрачной энергонезависимой памяти могут найти самое различное применение в ЖК-дисплеях повышенной яркости, „умных окнах“ и т.д. [2–7]. Сегнетоэлектрический полевой транзистор (FFET) в качестве ячейки памяти 1-Т имеет ряд принципиальных преимуществ, таких как высокая степень интеграции, низкое энергопотребление, неразрушающее считывание информации и др. [8]. К сожалению, ключевой элемент FFET, пленка PZT, если она выращена не на перовскитной подложке, имеет на границе с полупроводником дефектный слой, способный аккумулировать заряд, экранирующий поляризационный заряд доменов, в результате чего в транзисторе доминирует память, управляемая ловушками [9]. Это в свою очередь определяет „аномальное“ направление модуляционной петли гистерезиса и ограничивает время удержания памяти [9–11]. Чтобы улучшить качество пленок PZT, в работе [4] была использована эпитаксиальная монокристаллическая подложка SrTiO₃, но в этом случае канал SnO₂ выращивался на пленке PZT и не мог иметь совершенную кристаллическую структуру и высокую (более 1 см²/V·с) подвижность. Применение различных буферных слоев SiN [10], Si₃N₄ [7], Al₂O₃ [9] между PZT и проводящим каналом может существенно увеличить время удержания памяти, но также сильно уменьшает глубину модуляции. Проблема может быть частично решена за счет использования сегнетоэлектрической динамической памяти (FEDRAM), где записанная в ячейку информация должна регулярно обновляться [12]. В нашей последней работе [13] было показано, что проводимость канала имеет аномальное направление (по часовой стрелке), если управляется полем заряженных

центров на границе PZT/SnO₂. В настоящей работе была впервые получена структура Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃/SnO₂/Al₂O₃ с „нормальным“ гистерезисом проводимости канала.

2. Образцы

Пленки SnO₂:Sb напылялись YAG-лазером ($\lambda = 1064$ nm) на полированную поверхность (0001) монокристаллической сапфировой подложки при температуре 670°C в атмосфере кислорода. Для распыления металлических мишеней (Sn:Sb) использовался метод синхронного распыления [14]. Подвижность электронов в таких пленках при комнатной температуре достигала 25 см²/V·с при концентрации $4 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Пленки PbZr_{0.54}Ti_{0.46}O₃, осадились ВЧ-магнетронным распылением при температуре подложки 130°C. Отжиг образца № 1 производился при 580°C, а образца № 2 — при 550°C в течение 3 h. Транзисторные структуры [13] формировались при осаждении пленок через кремниевые маски, без применения фотолитографии и какого-либо травления.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Предметом настоящей работы является изучение и сравнение параметров двух образцов транзисторных структур PbZr_{0.54}Ti_{0.46}O₃/SnO₂/Al₂O₃, изготовленных по одной и той же технологии, но различающихся температурами отжига PZT. На рис. 1, *a, b* показаны модуляционные характеристики этих образцов. Остаточное изменение тока стока ΔI_d при напряжении на канале V_d после снятия внешнего смещения затвора можно выразить простой формулой $\Delta I_d = \mu \Delta Q V_d W / L$, использованной в [4], из которой легко найти изменение остаточного заряда ΔQ , обеспечивающего модуляцию

тока. Здесь W и L — ширина и длина подзатворной области соответственно, μ — подвижность электронов в канале. Величина полной модуляции тока в обоих образцах сравнительно невелика (2.6%) из-за высокой проводимости канала ($R_1 = 1.7 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 4.3 \text{ k}\Omega$), при этом остаточная модуляция (ΔI_d) составила $4 \mu\text{A}$ в обоих образцах, что соответствует изменению заряда $\Delta Q_d = 0.07 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. Методом релаксационных токов, описанным в работе [15], были определены концентрации активных ловушек заряда на границе PZT/SnO₂: для образца № 1 ($1.35 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$), а для образца № 2 ($1.14 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$), что соответствует плотностям заряда $Q_t = 2.16$ и $1.83 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ соответственно. Интересно, что направление петель гистерезиса тока для каждого из образцов разное: „прямое запоминание“ полярности затвора за счет остаточной поляризации сегнетоэлектрических доменов (для образца № 1) и „обратное запоминание“ за счет заряда ловушек (для образца № 2). Разность плотностей зарядов ($P_r - Q_t$), удерживаемых каждым из этих механизмов, обеспечивает остаточную модуляцию тока канала. Направление петли модуляции зависит от знака разности двух величин, на порядок больших ΔQ_d . Это означает, что небольшие флуктуации

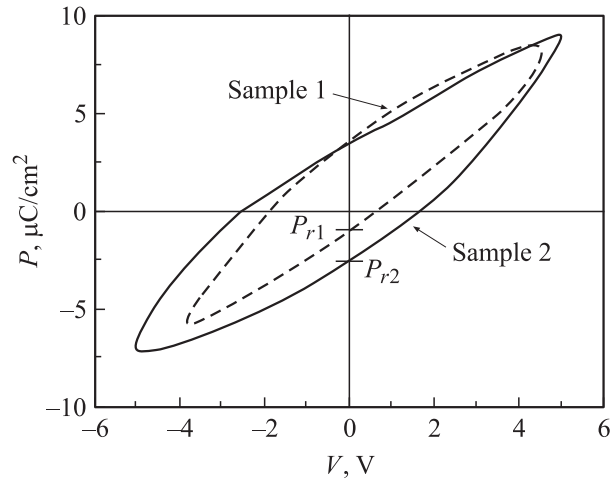


Рис. 2. Петли сегнетоэлектрического гистерезиса затвора полевого транзистора Au/PZT/SnO₂, измеренные методом Сойера–Тауэра на частоте 65 Hz. Амплитуда смещения совпадает с максимальным напряжением, которое подавалось для модуляции канала.

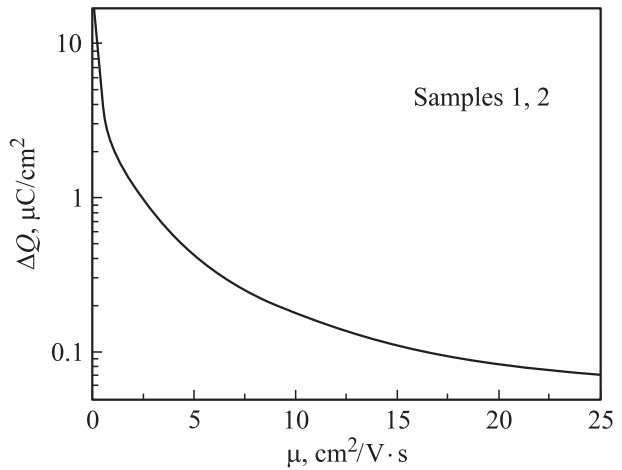


Рис. 3. Зависимость модулируемого заряда ΔQ_d от дрейфовой подвижности электронов в канале (подвижность можно считать не зависящей от напряжения затвора).

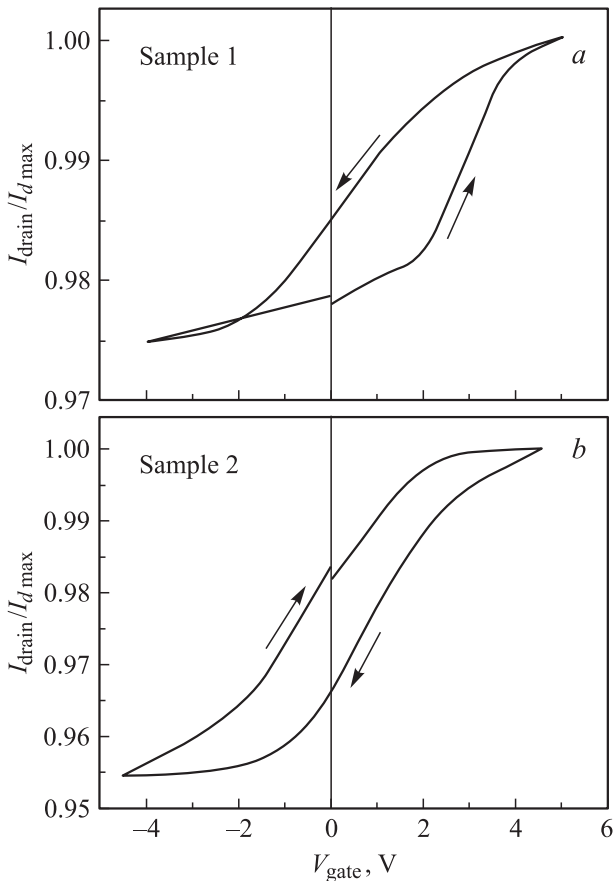


Рис. 1. Ток в канале сегнетоэлектрического полевого транзистора в зависимости от напряжения на затворе. Сопротивление канала составляет около $3 \text{ k}\Omega$. *a* — нормальный гистерезис, *b* — аномальный гистерезис.

параметров P_r и Q_t могут привести к смене знака их разности, а следовательно, и к смене направления гистерезиса $I_d(V_g)$. К сожалению, недостаточная точность измерений петель Сойера–Тауэра (рис. 2) не позволила получить четкую корреляцию знака $P_r - Q_t$ и направления петель. Однако в пользу данного объяснения свидетельствует то, что ΔQ_d и $P_r - Q_t$ примерно совпадают по порядку величин, и это делает критичным изменение концентрации ловушек даже на 15%. Так, для образца № 1 $P_{r1} - Q_{t1} = 0.9 \pm 1.0 - 2.16 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, а для образца № 2 $P_{r2} - Q_{t2} = 2.64 \pm 1.00 - 1.83 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. Интересно также построить зависимость $\Delta Q_d(\mu)$, если считать, что подвижность не зависит от напряжения затвора. Из рис. 3 видно, что при подвижностях, меньших $2.5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, заряд ΔQ_d , необходимый для

запоминания модулированного состояния, становится порядка $1 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. Такие величины остаточного заряда еще могут обеспечивать модуляцию порядка 1%, но для более эффективной работы транзистора при концентрации ловушек 10^{13} cm^{-2} необходимы более высокие подвижности или более низкие концентрации электронов в канале.

4. Заключение

Из полученных данных можно сделать вывод, что соотношение поляризационного заряда и заряда ловушек критически влияет на направление гистерезиса проводимости канала. Для эффективной работы транзистора при концентрации ловушек 10^{13} cm^{-2} необходимы более высокие подвижности чем $25 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ или более низкие чем 10^{19} cm^{-3} концентрация электронов в канале.

Список литературы

- [1] K. Nomura, H. Ohta, K. Ueda, T. Kamiy, T.M. Hirano, H. Hosono. *Science* **300**, 1269 (2003).
- [2] H. Ohta, H. Hosono. *Materials Today* **7**, 6, 42 (2004).
- [3] J.F. Wager. *Science* **300**, 1245 (2003).
- [4] M.W.J. Prins, S.E. Zinnemers, J.F.M. Cillessen, J.B. Giesbers. *Appl. Phys. Lett.* **70**, 4, 458 (1997).
- [5] I.E. Titkov, I.P. Pronin, I.A. Liniichuk, I.V. Grekov. *Integrated Ferroelectrics* **72**, 53 (2005).
- [6] E. Tokumitsu, M. Senoo, E. Shin. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **902E**, 0902-T10-54.1 (2006).
- [7] Y.-S. Kang, Q. Fan, Bo Xiao, Ya.I. Alivov, J. Xie, N. Onojima, Y.-S. Park. *Appl. Phys. Lett.* **88**, 123 508 (2006).
- [8] Shu-Yau Wu. *IEEE Trans. Electron Devices* **21**, 8, 499 (1974).
- [9] S.-M. Koo, S. Khartsev, C.-M. Zetterling, A. Grishin, M. Ostling. *Appl. Phys. Lett.* **83**, 19, 3975 (2003).
- [10] J.-P. Han, S.-M. Koo, C.A. Richter, E.M. Vogel. *Appl. Phys. Lett.* **85**, 8, 1439 (2004).
- [11] И.Е. Титков, И.П. Пронин, Д.В. Машовец, Л.А. Делимова, И.А. Линийчук, И.В. Грехов. *ФТП* **39**, 7, 890 (2005).
- [12] T.P. Ma, J.-P. Han. *U.S. Patent N 6067244* (2000).
- [13] I. Titkov, I. Pronin, L. Delimova, I. Linichuk, I. Grekhov. *Thin Solid Films* **515**, 24, 8748 (2007).
- [14] A.A. Gorbunov, W. Pompe, A. Sewing, S.V. Gaponov, A.D. Akhsakhalyan, I.G. Zabrodin, I.A. Kas'kov, E.B. Kluev, A.P. Morozov, N.N. Salaschenko, R. Dietsch, H. Mai, S. Völlmar. *Appl. Surf. Sci.* **96/98**, 649 (1996).
- [15] L. Delimova, I. Grekhov, D. Mashovets, S. Tyaginov, S. Shin, J.-M. Koo, S.-P. Kim, Y. Park. *Appl. Phys. Lett.* **87**, 192 101 (2005).