

06,13

## Слабое проявление эффекта поля в структурах металл–диэлектрик–полупроводник с сегнетоэлектрическим изолирующим слоем $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$

© Д.А. Белорусов, Е.И. Гольдман, Г.В. Чучева <sup>†</sup>

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл., Россия

<sup>†</sup> E-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Поступила в Редакцию 29 июня 2021 г.

В окончательной редакции 29 июня 2021 г.

Принята к публикации 3 июля 2021 г.

Проведены высокочастотные измерения емкости и проводимости объектов  $\text{Ni-Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3\text{-Pt}$  и  $\text{Ni-Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3\text{-Si}$  с толщиной сегнетоэлектрика 120 nm в параэлектрической фазе. Показано, что во всем диапазоне внешних напряжений электрическое поле в Si практически не проникает. Подтвержден сделанный ранее вывод о причинах слабого проявления эффекта поля — происходит практически полное экранирование поляризации сегнетоэлектрического слоя зарядами электронных ловушек на контакте  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3\text{-Si}$ . Отмечено, что резкое снижение за счет пассивации активности поверхностных ловушек позволит реализовать транзисторы на базе структур металл–BST–Si с работающим поверхностным каналом неосновных носителей заряда и обеспечит построение высококачественных ячеек энергонезависимой памяти FeRAM.

**Ключевые слова:** металл–диэлектрик–полупроводник–структуры, металл–диэлектрик–металл–структуры, сегнетоэлектрические пленки состава  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ , высокочастотный импеданс.

DOI: 10.21883/FIT.2021.11.51592.154

### 1. Введение

Сегнетоэлектрические пленки — это одна из приоритетных альтернатив изолирующим слоям окисла кремния для использования в электронных устройствах. [1]. Уникальные физические свойства сегнетоэлектрических материалов (в частности, высокая и изменяемая под действием внешнего электрического поля диэлектрическая проницаемость) позволяют создавать на основе планарной технологии фактически новые классы устройств хранения и обработки информации [2]. Твердые растворы титаната бария–стронция ( $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$  или BST) обладают сегнетоэлектрическими свойствами выше комнатной температуры, а их диэлектрическая постоянная остается достаточно высокой и в параэлектрической фазе. Но, хотя исследования пленок BST начались с конца прошлого века [3,4], до сих пор нет сообщений о транзисторных структурах на базе этих сегнетоэлектриков с работающими проводящими поверхностными каналами неосновных носителей заряда в полупроводнике нанометрового диапазона [5]. В опытах [6] на структурах Ni–BST–Si с толщиной сегнетоэлектрической пленки  $h = 350$  nm и составом  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$  была обнаружена возможная причина слабого проявления эффекта поля — практически полное экранирование поляризации сегнетоэлектрического промежутка зарядами электронных ловушек в межфазном слое на контакте с кремнием. Это важный результат, поскольку известные из кремниевой планарной технологии способы пассивации ловушек в межфазном слое позволяют надеяться на

устранение препятствий для открытия канала проводимости неосновных носителей заряда в полупроводнике и тем самым обеспечить перспективу для создания ячеек энергонезависимой памяти FeRAM на базе структур с BST. Для развития работ в этом направлении важна уверенность в общности сделанных в [6] выводов в отношении структур с разными толщинами сегнетоэлектрика, нанесенного на подложки *n*- и *p*-типов. С целью такой проверки результатов [6] в настоящей работе приведены результаты исследований образцов Ni–BST–Si и Ni–BST–Pt с более тонким слоем сегнетоэлектрика  $h = 120$  nm.

### 2. Высокочастотный импеданс структур $\text{Ni-Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3\text{-Si}$ и $\text{Ni-Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3\text{-Pt}$

В работе [6] была развита одномерная модель высокочастотного (ВЧ) импеданса структур металл–сегнетоэлектрик–полупроводник с буферным слоем на контакте с подложкой. Анализ на базе развитой модели экспериментальных характеристик подобных структур и образцов металл–сегнетоэлектрик–металл позволяет определить в зависимости от внешнего напряжения изгиб зон в полупроводнике и концентрацию заряда в буферном слое между BST и Si. Строго говоря, данная модель применима в параэлектрической фазе изолирующего слоя. Поэтому измерения ВЧ-характеристик

нужно проводить при температурах существенно выше комнатной.

Экспериментальные исследования были выполнены на структурах Ni-BST-Pt и Ni-BST-Si с площадью  $S = 2.7 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$ . В качестве подложек использовался тот же, что и в [6], кремний  $n$ -типа,  $N_d = 2.4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  с подслоем платины, либо естественным окислом на поверхности пластины. Сегнетоэлектрическую пленку толщиной  $h = 120 \text{ nm}$  наносили методом высокочастотного распыления поликристаллической мишени в атмосфере кислорода на установке Плазма-50СЭ (Россия). Более детально конструкции установок и методика осаждения пленок описаны в [7,8]. Измерения импеданса проводились в параэлектрической фазе в области температур 110–130°C на той же частоте 1 MHz, что и в [6], с использованием прецизионного измерителя LCR Agilent E4980A, портативного компьютера с доработанным программным обеспечением и специальной камеры, снабженной нагревательным столиком с термостабилизацией. Подробности экспериментальной установки описаны в [9].

Результаты опытов представлены на рис. 1 и 2 для температуры измерений 121°C.

Формы кривых для других температур были близки к показанным на данных рисунках. Как и у образцов из работы [6], имеют место неравенства  $(G/\omega C) \propto (1/100) \ll 1$ ,  $(C_{SE}/C) \propto 10 \div 100 \gg 1$ , где  $C$  и  $G$  — емкость и проводимость структур Ni-BST-Si,  $C_{SE}$  — емкость образца Ni-BST-Pt,  $\omega$  — циклическая частота измерений импеданса. Из модели ВЧ-импеданса [6, формула (5)] следует неравенство

$$1 \gg \frac{C}{\omega C} > \left\{ \left[ 1 - \frac{(C + \frac{G^2}{\omega^2 C})}{C_s} \right] \times \left[ \frac{(C + \frac{G^2}{\omega^2 C})}{C_{SE}} + \frac{(C + \frac{G^2}{\omega^2 C})}{C_s} - 1 \right] \right\}^{1/2}. \quad (1)$$

Здесь  $C_s$  — емкость граничащей с BST заряженной области кремния. Поэтому для наших образцов, как и в опытах [6], для всей области подаваемых напряжений получается

$$C \cong C_s. \quad (2)$$

Таким образом, табулируя зависимость  $C_s$  от изгиба зон в полупроводнике  $V_s$  по выражениям для классической статистики [10]:

$$C_s = \frac{C_{sfb}}{2^{(1/2)}} \frac{|1 - e^{-\nu_s}|}{(e^{-\nu_s} + \nu_s - 1)^{(1/2)}}, \quad \nu_s = -\frac{qV_s}{T}, \quad (3)$$

можно через цепочку взаимосвязей  $V_g \Rightarrow C = C_s \Rightarrow \nu_s \Rightarrow V_s$  построить зависимость изгиба зон от внешнего напряжения  $V_g$ . Здесь  $C_{sfb}$  — емкость полупроводника в состоянии flat band ( $V_s = 0$ );  $\nu_s = -\frac{qV_s}{T}$  — безразмерный изгиб зон в полупроводнике,  $\nu_s > 0$  при обеднении поверхности кремния;  $q$  — элементарный заряд;  $T$  —

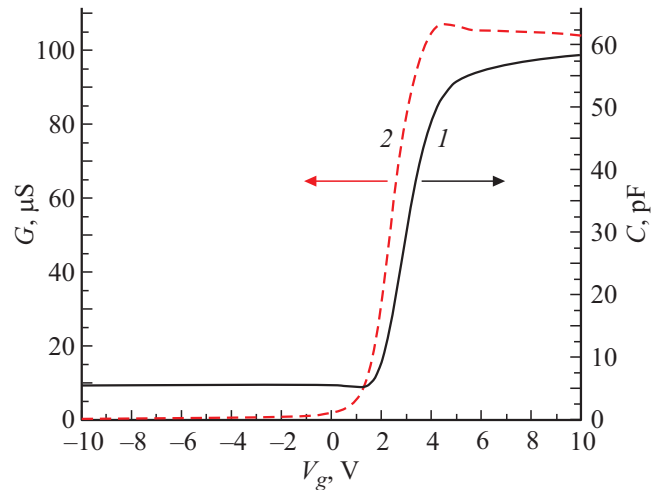


Рис. 1. Высокочастотные полевые характеристики структуры Ni-Ba<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>TiO<sub>3</sub>-Si с толщиной сегнетоэлектрика 120 nm, измеренные при  $T = 121^\circ\text{C}$ . Кривые: 1 — емкость, 2 — проводимость.

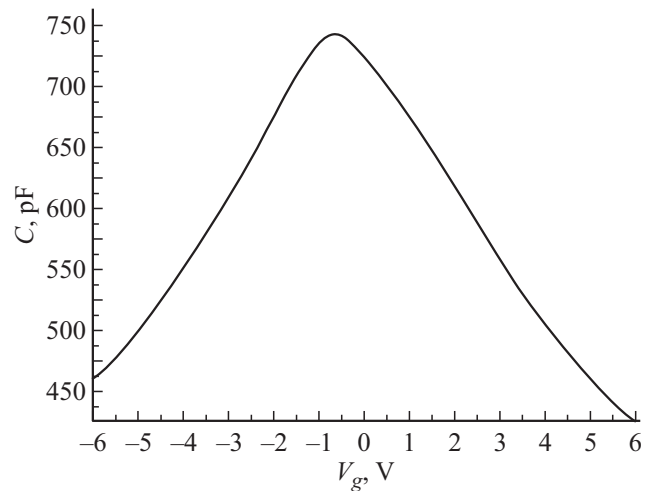
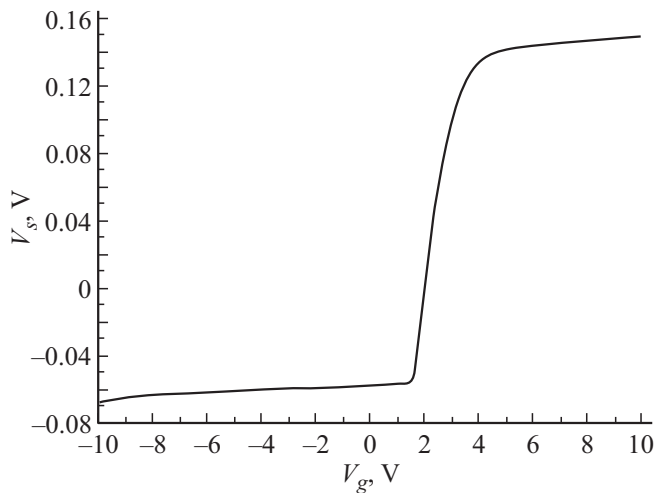


Рис. 2. Высокочастотная вольт-фарадная характеристика структуры Ni-Ba<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>TiO<sub>3</sub>-Pt с толщиной сегнетоэлектрика 120 nm, измеренная при  $T = 121^\circ\text{C}$ .

абсолютная температура в энергетических единицах. Величина емкости полупроводника в состоянии flat band вычислялась в работе [6]:  $C_{sfb} = 9.17 \text{ pF}$ , результат изложенной процедуры представлен на рис. 3.

Из графика  $V_s(V_g)$  следует, что по модулю изгиб зон в кремнии многократно меньше приложенного напряжения. В обеднении изменение  $\nu_s$  с  $V_g$  ограничено сильнее, чем в обогащении,  $-5 < \nu_s < 2$ . Малая чувствительность изгиба зон в полупроводнике к изменению  $V_g$  обуславливает появление плато на полевых зависимостях ВЧ-емкости и проводимости структуры, причем на нижнем, где условие  $V_s \approx \text{const}$  выполняется более жестко,  $C$  и  $G$  слабее зависят от напряжения, чем на верхнем.



**Рис. 3.** Зависимость изгиба зон  $V_g$  в кремнии от внешнего напряжения  $V_g$  в структуре Ni-Ba<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>TiO<sub>3</sub>-Si.

Итак, на образцах с другой толщиной сегнетоэлектрика полностью подтвердились результаты работы [6]: слабое проявление эффекта поля в структурах металл–диэлектрик–полупроводник с сегнетоэлектрическим изолирующим слоем Ba<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>TiO<sub>3</sub> обусловлено перезарядкой поверхностных электронных ловушек в межфазном слое. Именно эти локализованные состояния обеспечивают практически полное экранирование поляризации сегнетоэлектрического промежутка в структуре металл-BST-Si. Исходя из размаха изменения внешнего напряжения (10 В), пользуясь оценкой заряда на ловушках  $C_{SE}V_g$ , получаем, что их концентрация должна быть велика — не меньше  $10^{14} \text{ cm}^{-2}$ . В рамках настоящей работы рассуждать о природе ловушек можно только из общих соображений. Буферный слой между сегнетоэлектриком и Si состоит в основном из оксида кремния; поверхностные уровни на границах раздела Si-SiO<sub>2</sub> соответствуют парамагнитным состояниям атомов Si с неспаренным электроном, связанным с тремя атомами в объеме полупроводника,  $\equiv \text{Si}_3\text{Si}\bullet$  — так называемыми  $P_b$ -центрами или оборванными связями [11]. Теоретически концентрация этих оборванных связей составляет  $8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ , и они перезаряжаются и при обеднении, и при обогащении полупроводника [11]. Т.е.,  $P_b$ -центры вполне подходят для исполнения роли электронных ловушек в образцах металл-BST-Si.

### 3. Заключение

Повторим важный тезис из работы [6]: имеет место „аналогия наших современных объектов с сегнетоэлектрическим изолирующим слоем и структур металл-SiO<sub>2</sub>-Si в шестидесятые-семидесятые годы прошлого века, когда активные ловушки на контакте кремния с окислом мешали изготавливать качественные транзисторы с каналом проводимости неосновных но-

сителей заряда. Эта проблема была решена технологами за счет пассивации оборванных связей водородом“. Поэтому естественно при изготовлении структур металл-BST-Si использовать опыт, накопленный в планарной кремниевой технологии и подавить активность электронных ловушек в межфазном слое. Этот результат позволит создать транзисторы на базе металл-BST-Si с работающим поверхностным каналом неосновных носителей заряда и обеспечит построение высококачественных ячеек энергонезависимой памяти FeRAM.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты РФФИ № 18-29-11029, № 19-07-00271 и № 19-29-03042).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] V.R. Mudinepalli, L. Feng, W.-C. Lin, B.S. Murty. *J. Adv. Ceram.* **4**, 46 (2015).
- [2] К.А. Воротилов, В.М. Мухортов, А.С. Сигов. Интегрированные сегнетоэлектрические устройства / Под ред. А.С. Сигова. Энергоатомиздат, М. (2011). 175 с.
- [3] H. Kawano, K. Morii, Y. Nakayama. *J. Appl. Phys.* **73**, 10, 5141 (1993).
- [4] S. Ezhilvalavan, T.Y. Tseung. *Rev. Mater. Chem. Phys.* **65**, 227 (2000).
- [5] J.Y. Park, K. Yang, D.H. Lee, S.H. Kim, Y. Lee, P.R. Sekhar Reddy, J.L. Jones, M.H. Park. *J. Appl. Phys.* **128**, 24, 240904 1–24 (2020); doi: 10.1063/5.0035542.
- [6] E.I. Goldman, G.V. Chucheva, D.A. Belorусov. *Ceram. Int.* <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.129>
- [7] М.С. Иванов, М.С. Афанасьев. *ФТТ* **51**, 7, 1259 (2009).
- [8] Д.А. Киселев, М.С. Афанасьев, С.А. Левашов, Г.В. Чучева. *ФТТ* **57**, 6, 1134 (2015).
- [9] Е.И. Гольдман, А.Г. Ждан, Г.В. Чучева. *ПТЭ* **6**, 110 (1997).
- [10] S.M. Sze, Kwok K. Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley Interscience publication (2007).
- [11] В.А. Грищенко. *УФН* **52**, 9, 869 (2009).

Редактор К.В. Емцев