

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 [†]

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

[†] 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 нм 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 $h = 350$ нм 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 $h = 120$ нм.

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, ω — 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 —

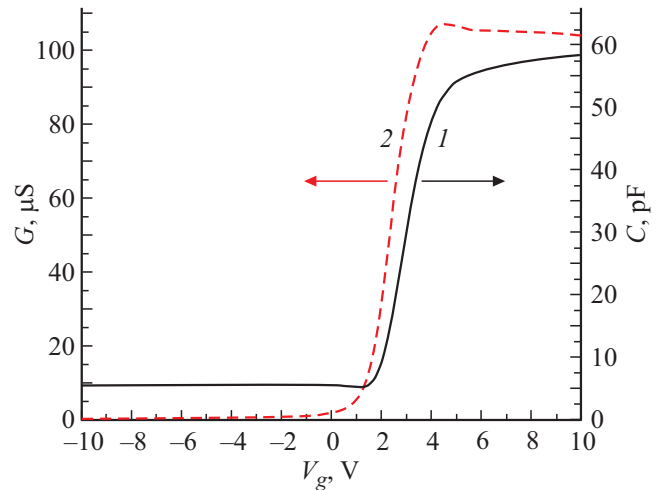


Рис. 1. Высокочастотные полевые характеристики структуры Ni-Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO₃-Si с толщиной сегнетоэлектрика 120 nm, измеренные при $T = 121^\circ\text{C}$. Кривые: 1 — емкость, 2 — проводимость.

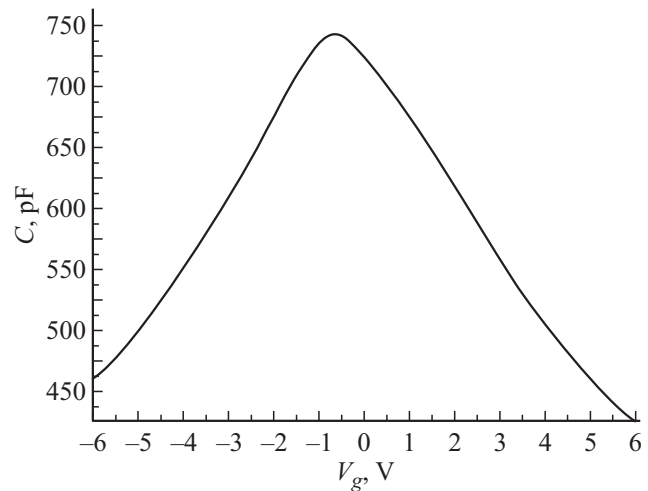


Рис. 2. Высокочастотная вольт-фарадная характеристика структуры Ni-Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO₃-Pt с толщиной сегнетоэлектрика 120 nm, измеренная при $T = 121^\circ\text{C}$.

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 ν_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.

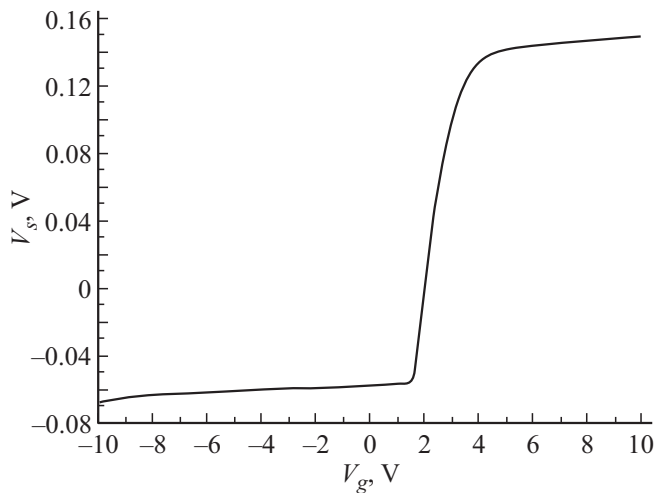


Рис. 3. Зависимость изгиба зон V_g в кремнии от внешнего напряжения V_g в структуре Ni-Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO₃-Si.

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_{1-x}Sr_xTiO₃ 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} 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 окисла кремния; поверхностные уровни на границах раздела Si-SiO₂ 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-SiO₂-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