

06,13

Влияние сильного статического электрического поля и нагрева на характеристики высокочастотного импеданса структур металл–сегнетоэлектрик–полупроводник

© Д.А. Белорусов, Е.И. Гольдман, Г.В. Чучева [¶]

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

[¶] E-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Поступила в Редакцию 31 января 2022 г.

В окончательной редакции 1 февраля 2022 г.

Принята к публикации 2 февраля 2022 г.

Проведены исследования влияния нагрева и сильных полевых, но допробойных, воздействий на высокочастотные характеристики импеданса гетероэпитаксиальных структур $\text{Ni}-\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3-p\text{Si}$ с толщиной сегнетоэлектрика 50 нм. Показано, что независимо от полярности полевого стресса, характеристики сдвигались в сторону положительного смещения, и ширина петель гистерезиса уменьшалась; уровни плато практически оставались неизменными. Нагрев до 121°C приводил к изменению уровней верхнего плато характеристик: для емкости он снижался, а для проводимости — поднимался; ветви на петле не просто сужались и сдвигались, а менялись местами по сравнению с исходной зависимостью (реверс петли). Данные результаты могут быть объяснены: при полевым воздействии — генерацией дополнительных электронных состояний, локализованных в буферном слое на границе раздела кремний — $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$, а при нагреве — возникновением эффектов запаздывания вследствие развития флуктуационных процессов, лежащих в основе размытия фазового перехода из сегнетоэлектрического в параэлектрическое состояние.

Ключевые слова: высокочастотные полевые характеристики импеданса, полевой стресс, петли гистерезиса, генерация дополнительных локализованных электронных состояний, эффекты запаздывания, флуктуационные процессы, размытый фазовый переход.

DOI: 10.21883/FIT.2022.05.52336.273

1. Введение

Одно из приоритетных направлений исследований альтернатив окислу кремния — это использование сегнетоэлектрических пленок в качестве изолирующих слоев в электронных устройствах нано диапазона [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 новый класс устройств хранения и обработки информации [2]. Перспективным сегнетоэлектрическим составом для применения в СВЧ-технике считаются твердые растворы титаната бария-стронция ($\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ или BST) [1,2]. Они обладают сегнетоэлектрическими свойствами при температурах выше комнатной, а эффективная диэлектрическая проницаемость их тонких пленок остается рекордно высокой (в сотни раз выше, чем у SiO_2) в широком диапазоне температур. Управляющие воздействия на сегнетоэлектрические слои в микро- и нанoeлектронных устройствах сопровождаются прикладыванием к толще образца значительных электрических смещений, создающих в BST поля в несколько MV/cm. Подобные нагрузки приводят к называемому по аналогии с объектами из кремния повреждению структур, когда их характеристики высокочастотного импеданса изменяются после по-

левого или высокотемпературного воздействий, а затем, за времена порядка суток восстанавливаются к исходному состоянию. Также, по аналогии со структурами на основе кремния для обозначения таких воздействий будем использовать термины полевой и температурный (термический) стрессы. В настоящий момент практически не публикуются работы, посвященные изучению механизмов изменений электрофизических свойств структур металл–BST–Si после полевых и тепловых воздействий. Возникает существенный пробел в знании об устойчивости BST сегнетоэлектриков к полевым и термическим нагрузкам. Поэтому важным направлением исследований является изучение механизмов изменений характеристик структур металл–BST–Si, в результате не приводящих к разрушению типа пробоя полевого и термического стрессов. Этой теме на примере структур металл–BST–pSi с толщинами сегнетоэлектрического слоя 50 нм и посвящена настоящая работа.

2. Влияние стрессов на высокочастотный импеданс структур $\text{Ni}-\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3-\text{Si}$

Экспериментальные исследования были выполнены на гетероэпитаксиальных структурах $\text{Ni}-\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3-p\text{Si}$ с площадью полевого электрода

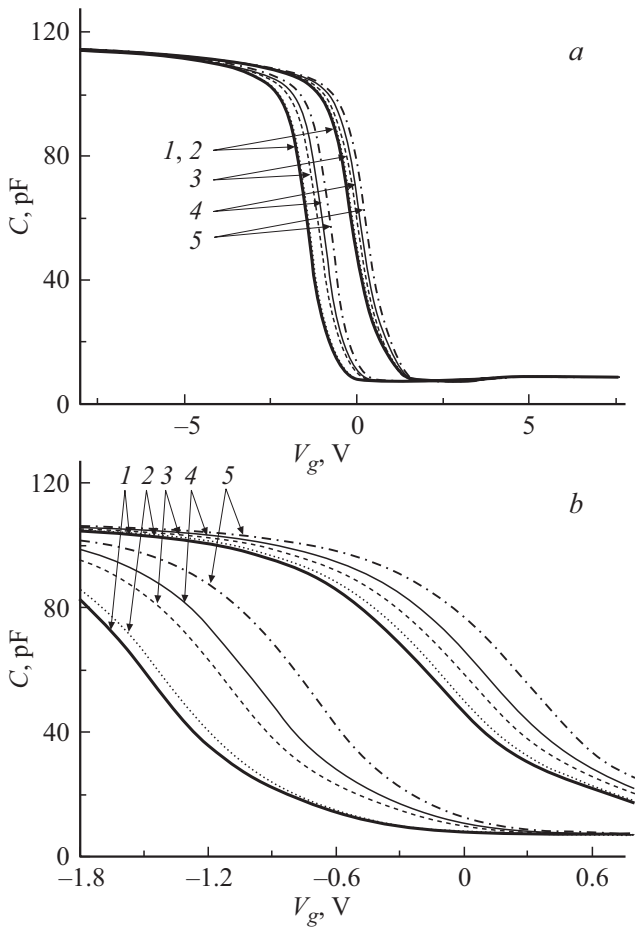


Рис. 1. Изменения вольтемкостных характеристик структур $\text{Ni-Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3\text{-Si}$ после полевых воздействий различной амплитуды: *a* — общий вид кривых, *b* — петля гистерезиса в увеличенном масштабе. Номера кривых: 1 — исходная, 2 — после стресса -4 V , 3 — после стресса -8 V , 4 — после стресса $+4\text{ V}$, 5 — после стресса $+8\text{ V}$.

из никеля $S = 2.7 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$. Сегнетоэлектрическую пленку толщиной $h = 50 \text{ nm}$ наносили методом высокочастотного распыления поликристаллической мишени в атмосфере кислорода на установке Плазма-50СЭ (Россия). Более детально конструкции установок и методика осаждения пленок описаны в [3,4]. Измерения импеданса проводились в области температур от комнатной до 121°C на частоте 1 MHz 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 [5]. На структуру металл-сегнетоэлектрик-полупроводник подавалось напряжение смещения V_g от -8 V до $+8\text{ V}$, с шагом 0.005 V и амплитудой измерительного сигнала 25 mV со скоростью считывания данных 3 точки в секунду.

Выдержка объектов в течение 30 min. при комнатной температуре под постоянными напряжениями от ± 2

до $\pm 8\text{ V}$ обеспечивала спектр полевых стрессовых воздействий. Термический стресс реализовывался нагревом образца до 121°C и проведением высокочастотных измерений при этой температуре. Результаты опытов представлены на рис. 1–4.

Полевой стресс приводил к заметным изменениям характеристик высокочастотного импеданса. Как при отрицательных, так и при положительных полярностях стрессового напряжения наблюдались сдвиг характеристик в сторону положительного смещения и уменьшение ширины петель гистерезиса (см. рис. 1,2). При этом уровни плато характеристик практически оставались неизменными. И на высокочастотную емкость, и на проводимость воздействие положительных полярностей

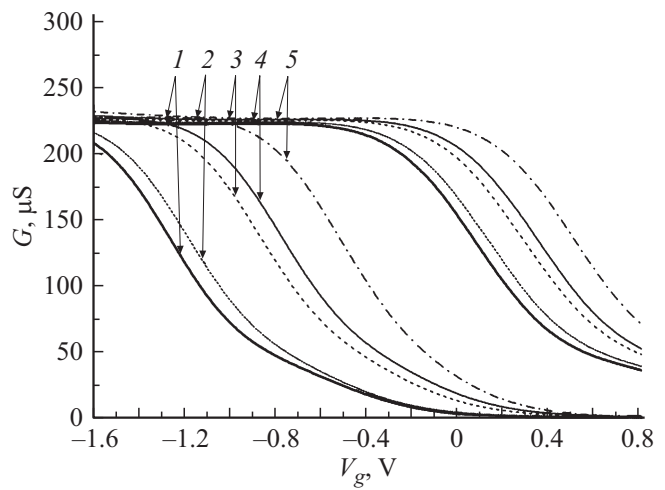


Рис. 2. Влияние полевого стресса на характеристики проводимости структур $\text{Ni-Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3\text{-Si}$. *a* — общий вид кривых, *b* — петля гистерезиса в увеличенном масштабе. Номера кривых: 1 — исходная, 2 — после стресса -4 V , 3 — после стресса -8 V , 4 — после стресса $+4\text{ V}$, 5 — после стресса $+8\text{ V}$.

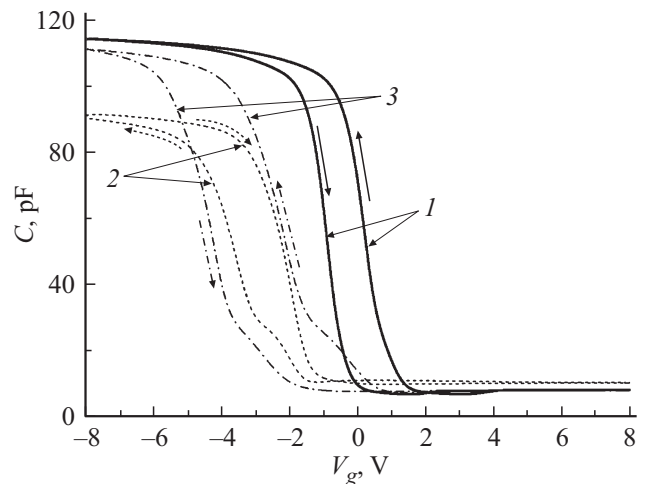


Рис. 3. Изменение вольфарадной характеристики структуры $\text{Ni-Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3\text{-Si}$ при нагреве. Номера кривых: 1 — исходная, 2 — измерения при 121°C , 3 — измерения сразу после охлаждения до комнатных условий.

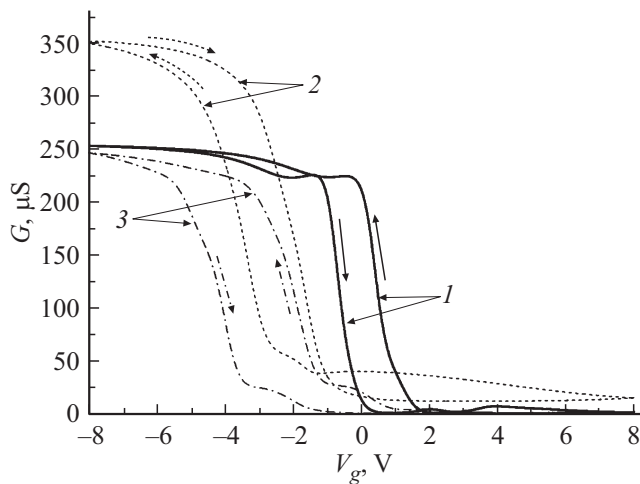


Рис. 4. Изменение характеристик проводимости структуры $\text{Ni}-\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3-\text{Si}$ при нагреве. Номера кривых: 1 — исходная, 2 — измерения при 121°C , 3 — измерения сразу после охлаждения до комнатных условий.

сильного электрического поля сказывалось сильнее, чем отрицательных. В таблице приведены экспериментальные данные изменений параметров вольт-фарадных характеристик после различных полевых стрессовых нагрузок.

Изменения вольт-фарадной характеристики образца в результате полевого стресса. (Ширина и сдвиг петли гистерезиса определялись на половине высоты перепада характеристики на уровне 60 pF . В качестве сдвига принималось изменение положения левой ветви вольт-емкостной зависимости)

	Величина полевого воздействия				
	Исходная, без стресса	-4 V	-8 V	+4 V	+8 V
Ширина петли гистерезиса, В	1.32	1.30	1.145	1.11	1.03
Сдвиг петли гистерезиса, В	—	0.069	0.37	0.47	0.70

Термический стресс приводил к более сильным, по сравнению с полевыми, изменениям высокочастотных характеристик импеданса, см. рис. 3, 4. Кривые не только сдвигались, но и изменялся уровень верхнего плато: для емкости он снижался, а для проводимости — поднимался. Ветви на петле характеристики, измеренной при 121°C , не просто сужались, а менялись местами по сравнению с исходной зависимостью, см. рис. 3 (реверс петли).

3. Обсуждение результатов

По аналогии с классическими кремниевыми структурами металл- SiO_2 -Si картина изменения высокоча-

стотных характеристик импеданса объектов металл-сегнетоэлектрик-полупроводник после продолжительной выдержки в сильном электрическом поле может быть объяснена образованием в результате стрессов на контакте BST-кремний дополнительных локализованных электронных состояний [6–8]. Данный контакт имеет сложный характер и содержит тонкий (несколько nm) буферный слой с естественным (native) окислом кремния, прилегающий непосредственно к Si. Известно, что на границе раздела Si-SiO₂ имеются так называемые оборванные связи кремния [9], которые не только перезаряжаются при изменении потенциала, но и их концентрация увеличивается в процессе воздействия сильным электрическим полем. Причем увеличение числа локализованных электронных состояний происходит при обеих полярностях электрического воздействия. В работах [10–11] экспериментально показано, что в связи с перезарядкой электронных ловушек в буферном переходном слое между сегнетоэлектриком и полупроводником, эффект поля на контакте BST-Si проявляется крайне слабо. Практически все внешнее поле экранируется зарядами в переходном слое, падение внешнего напряжения на полупроводник мало, высокочастотная емкость структуры металл-BST-Si определяется кремнием, а изгиб зон в нем отклоняется от состояния плоских зон всего на несколько kT/q во всем наблюдаемом диапазоне смещений, где k — константа Больцмана, T — абсолютная температура, q — элементарный заряд. Присущая высокой концентрации неупорядоченных ловушек буферного слоя U-образная энергетическая плотность локализованных состояний с минимумом в окрестности плоских зон кремния обуславливает резкое замедление повышения при обогащении и уменьшения при обеднении падения внешнего напряжения на полупроводнике. В свою очередь, это замедление приводит: во-первых, к образованию никак не связанных с сильным обогащением или инверсией поверхности полупроводника, двух плато полевых зависимостей высокочастотных характеристик импеданса структур металл-BST-Si, а во-вторых, к расположению петель гистерезиса на данных характеристиках в окрестности состояния плоских зон полупроводника. Полевое воздействие приводит к увеличению энергетической плотности локализованных в переходном слое электронных состояний, и модуль их заряда возрастает. Соответственно, при том же смещении должна уменьшиться абсолютная величина заряда поверхностной области полупроводника, связанная с перетеканием свободных носителей для экранирования внешнего поля. Таким образом, модуль изгиба зон в кремнии уменьшается, а падение напряжения на слое сегнетоэлектрика (при том же смещении) возрастает.

В сегнетоэлектрической фазе петли гистерезиса характеристик объекта металл-BST-Si не описываются в одномерных представлениях, а обусловлены разными для каждого направления изменениями внешнего смещения со временем перестройки доменной системы. Расположение ветвей характеристик высокочастотного импеданса по оси напряжений не симметрично относительно начала отсчета. Это связано с контактной

разностью потенциалов между полевым электродом и кремнием, а также с концентрацией встроенного заряда в сегнетоэлектрическом промежутке. Поэтому при одном и том же значении емкости на одной из ветвей (в нашем случае на левой, см. рис. 1) падение внешнего напряжения будет по модулю больше, чем на другой. Соответственно, и реакция на приращение в результате полевого стресса заряда локализованных в буферном слое электронных состояний у данной ветви будет больше, чем у другой. Наблюдательно это сводится к большему сдвигу левой петли, чем правой — отсюда и смещение характеристик в сторону положительных внешних напряжений и уменьшение ширины петель гистерезиса.

Нагрев от комнатной температуры до 121°C переводит пленку BST в параэлектрическое состояние. В этой фазе стационарные петли сегнетоэлектрического гистерезиса на характеристиках должны исчезать. Наблюдаемый реверс петель, см. рис. 3, свидетельствует о проявлении эффектов запаздывания в динамических кривых представления измеряемых величин, как функций внешнего напряжения. Об этом же говорят и отклонения формы характеристик, измеренных сразу после охлаждения, от исходных. Температура 121°C близка к области размытого фазового перехода пленки BST из сегнетоэлектрического в параэлектрическое состояние. Поэтому на роль источников эффектов запаздывания вполне могут претендовать продолжительные флуктуационные процессы, обусловленные дефектами структуры и объясняющие размытие фазового перехода [12,13].

4. Заключение

Из результатов настоящей работы следует, что механизмы возникновения последствий полевого и термического воздействий на изолирующую пленку BST различны. В первом случае это генерация дополнительных электронных состояний, локализованных в буферном слое на границе раздела кремний— $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$. Во втором — проявление эффектов запаздывания вследствие развития флуктуационных процессов, лежащих в основе размытия фазового перехода из сегнетоэлектрического в параэлектрическое состояние. Естественно, что детальное изучение этих явлений потребует разных подходов к постановке экспериментальных работ. В первом случае это привлечение методов определения локализованного в буферном слое заряда электронных ловушек. Во втором случае, два пути: проведение измерений временных зависимостей характеристик импеданса после ступенчатого изменения внешнего напряжения и применение различных скоростей динамической развертки результатов фиксации данных по смещению.

Отметим важную особенность тонкопленочных структур металл—сегнетоэлектрик—полупроводник. В подавляющем большинстве случаев у них используется единая кремниевая подложка для разных сегнетоэлектрических материалов. Это означает, что проявления полевого

воздействия на данные объекты должны носить общий характер, в большей степени зависеть от свойств буферного слоя на контакте изолятор—кремний и в меньшей — от вида используемого сегнетоэлектрика.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ № 19-29-03042-мк).

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 устройств. / Под ред. А.С. Сигова. Энергоатомиздат, М. (2011). 175 с.
- [3] М.С. Иванов, М.С. Афанасьев. *ФТТ* **51**, 7, 1259 (2009).
- [4] Д.А. Киселев, М.С. Афанасьев, С.А. Левашов, Г.В. Чучева. *ФТТ* **57**, 6, 1134 (2015).
- [5] Е.И. Гольдман, А.Г. Ждан, Г.В. Чучева. *ПТЭ* **6**, 110 (1997).
- [6] J. Nissan-Cohen. *Appl. Surf. Sci.* **39**, 1–4, 511 (1989).
- [7] T.R. Oldham, F.B. McLean, H.E. Boesch, J.M. McCarrity. *Semicond. Sci. Technol.* **4**, 12, 986 (1989).
- [8] M.L. Reed. *Semicond. Sci. Technol.* **4**, 12, 980 (1989).
- [9] В.А. Грищенко. *УФН* **52**, 9, 869 (2009).
- [10] E.I. Goldman, G.V. Chucheva, D.A. Belorussov. *Ceram. Int.* **47**, 15, 21248 (2021).
- [11] Д.А. Белорусов, Е.И. Гольдман, Г.В. Чучева. *ФТТ* **63**, 11, 1887 (2021).
- [12] А.П. Леванюк, В.В. Осипов, А.С. Сигов, А.А. Собинин. *ЖЭТФ*, **76**, 1, 345 (1979).
- [13] А.П. Леванюк, Б.В. Мошинский, А.С. Сигов. *ФТТ* **23**, 7, 2037 (1981).

Редактор Т.Н. Василевская