06,13

Надежность МДП-структур на основе пленок титаната бария стронция и оксида гафния

© М.С. Афанасьев, Д.А. Белорусов, Д.А. Киселев, В.А. Лузанов, Г.В. Чучева ¶

Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязино, Россия

¶ E-mail: gvc@fireras.su

Поступила в Редакцию 28 мая 2025 г.
В окончательной редакции 1 октября 2025 г.
Принята к публикации 2 октября 2025 г.

Сегнетоэлектрические пленки титаната бария стронция (BST) и оксида гафния (HfO_2) синтезированы на кремниевые подложки методом высокочастотного напыления и магнетронного распыления соответственно. Представлены результаты исследований структурного состава пленок BST и HfO_2 и электрофизических свойств структур металл-диэлектрик-полупроводник (Ni-BST-Si) и (Ni-HfO_2-Si) на их основе.

Ключевые слова: сегнетоэлектрические пленки, титанат бария стронция (BST), оксид гафния (HfO_2), структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), электрофизические свойства.

DOI: 10.61011/FTT.2025.10.61972.148-25

1. Введение

Интеграция сегнетоэлектрических материалов с полупроводниковыми технологиями открывает возможность создания нового поколения элементной базы современной электроники, основанной на нелинейных физических эффектах [1–3]. Но на пути внедрения подобных гетеструктур существует ряд технических трудностей. Одна из них — невозможность использовать существующее технологическое оборудование для отработки процессов изготовления в связи с его возможным загрязнением химическими элементами данных соединений. Также проблемы интеграции заключаются в необходимости существенного усложнения технологического процесса и разработки для него дополнительных операций [3]. Следует отметить, что при формировании сегнетоэлектрических пленок в них возникают механические напряжения на границе раздела пленка-подложка. Эти напряжения связаны с несоответствием параметров кристаллических решеток подложки и пленки и отличием коэффициентов теплового расширения, вследствие чего в пленках возникают дефекты типа дислокаций, которые приводят к изменениям сегнетоэлектрических свойств гетероструктур.

Целью работы является определить надежность изготовленных МДП-структур на основе сегнетоэлектрических пленок титаната бария стронция и оксида гафния различной толщины.

2. Образцы и методика эксперимента

Осаждение пленок $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ (BST) на кремниевые подложки n-типа (100) проводилось методом высокочастотного (ВЧ) распыления стехиометрической мишени того же состава при повышенных давлениях кислорода на установке „Плазма 50 СЭ“. Условия напыления пленок BST: давление кислорода во время процесса напыления 60 Pa, расстояние между мишенью и подложкой 10 mm, температура подложки 630 °C. При заданных условиях скорость роста пленки составляла ≈ 6.0 nm/min.

Пленки HfO_2 были сформированы на кремниевых подложках n-типа (100) методом магнетронного распыления керамической мишени аналогичного состава. Основные параметры напыления пленок: расстояние мишень-подложка — 50 mm, диаметр распыляемой мишени — 70 mm, рабочее давление в камере $3 \cdot 10^{-3}$ Torr. Радиационный нагрев подложки во время напыления обеспечивал достаточную поверхностную подвижность осаждаемых частиц для формирования оксида.

Для исследования электрофизических свойств пленок были сформированы структуры Ni-BST-Si и Ni-HfO_2-Si. Для этого на сформированные пленки BST и HfO_2 методом электроннолучевого распыления через теневую маску наносился электрод. Материал электрода — никель, площадь $2.7 \cdot 10^{-4}$ cm^2, толщина 0.1 μm. Параметры процесса напыления: остаточное давление в камере 10^{-4} Pa, температура структуры 70 ± 5 °C, скорость напыления 2.0 ± 0.2 Å/s.

Кристаллическая структура пленок исследовалась методом рентгеноструктурного анализа на автоматизированном двухкристальном дифрактометре ДРОН-3, работающем по схеме Брэгга-Брентано. В качестве источника излучения применялась рентгеновская трубка с медным анодом (длина волны 0.1541 nm). Для выделения из спектра линии $K\alpha_1$ использовался кварцевый монохроматор. Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МДП-структур измерялись на автоматизированной экспериментальной установке [4] с использованием прецизионного измерителя LCR E4980A (Agilent).

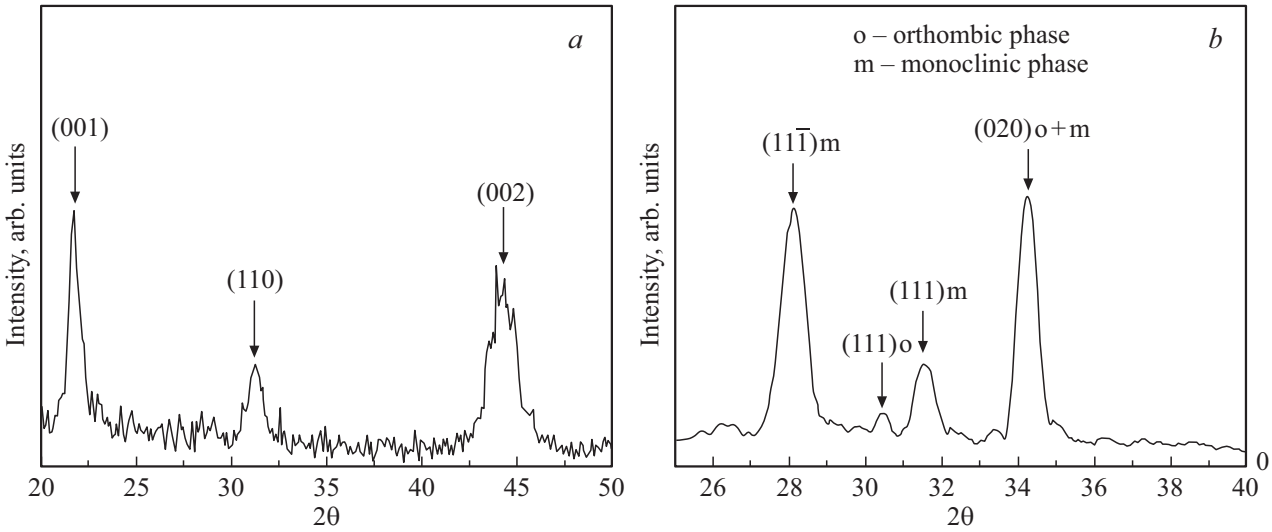

Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы пленок толщиной 150 nm BST/Si (*a*) и HfO_2/Si (*b*).

Для исследований были изготовлены два типа МДП-структур Ni-BST-Si и Ni-HfO_2-Si с толщинами пленок BST и HfO_2 $h = 20$, 100 и 150 nm.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Структурные исследования МДП структур

На рис. 1 приведены дифрактограммы полученных пленок BST и HfO_2 с толщиной 150 nm.

На обеих дифрактограммах присутствуют пики от различных кристаллографических плоскостей пленок BST и HfO_2. Это свидетельствует о том, что пленки являются поликристаллическими без признаков преимущественной ориентации. При этом на дифрактограмме от пленки HfO_2 можно видеть отражения как от моноклинной фазы, так и от полярной орторомбической, которая, как считается, и придает HfO_2 сегнетоэлектрические свойства. Оценка размеров областей когерентного рассеяния (ОКР) по методу Дебая-Шерера показала, что для пленки BST средний размер ОКР составляет около 5 nm, для HfO_2 — 10 nm.

Ранее в работе [5] нами получены численные значения шероховатости поверхности и среднего размера кристаллитов для исследуемых пленок, которые также демонстрируют большие латеральные значения кристаллитов у пленок HfO_2 по сравнению с BST при одинаковых толщинах, что коррелирует с данными рентгеноструктурного анализа.

3.2. Электрофизические свойства МДП-структур

3.2.1. Электрофизические свойства Ni-BST-Si структур

На рис. 2 представлены ВФХ МДП-структур Ni-BST-Si с толщиной пленки BST $h = 20$, 120 и 150 nm. Измерения проводились при комнатной температуре и частоте 1 MHz со скоростью полевой развертки 100 mV/sec. Зависимости емкости от напряжения смещения имели форму петель гистерезиса. Значения напряжения выбирались, исходя из получения наибольшей ширины петли гистерезиса без повреждения МДП-структур. Диапазоны напряжений смещения (V_g) при измерении составляли: от -5 до 5 V, от -10 до 10 V и от -12 до 12 V и обратно для МДП структур с $h = 20$, 100 и 150 nm соответственно. Из-за различия пленок по толщине для сравнения полученных результатов проводилось нормирование значения емкости $C/C_{\max}$.

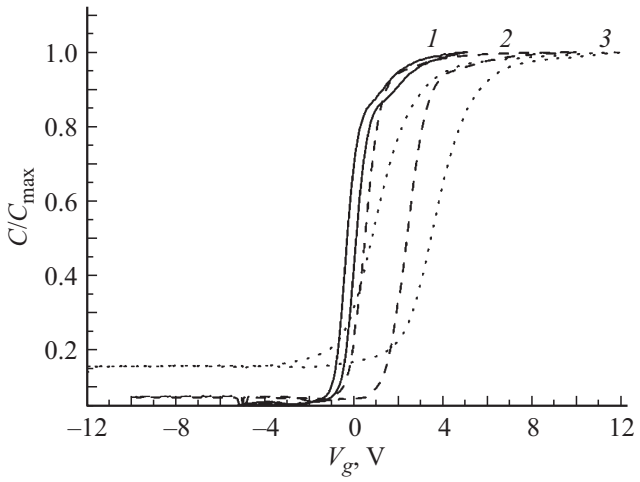

Рис. 2. ВФХ структур Ni-BST-Si с толщинами пленок BST: *1* — 20 nm, *2* — 100 nm, *3* — 150 nm.

Уменьшение толщины BST пленки приводило к увеличению максимума емкости $C_{\max} = 139.11$, 130.24, 33.94 pF и сокращению ширины петли гистерезиса 0.43, 1.91, 2.64 V при $h = 20$, 100 и 150 nm соответственно. Стоит отметить, что уменьшение толщины пленки также

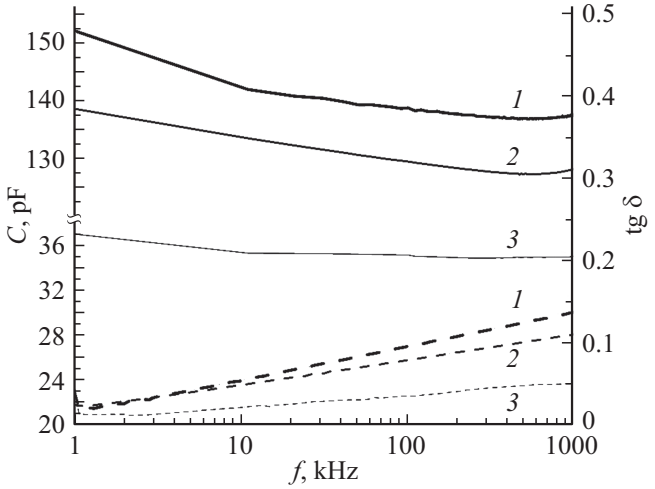

Рис. 3. Зависимости C (сплошные линии) и $\mathrm{tg}\,\delta$ (пунктирные линии) от частоты (f) структур Ni-BST-Si с толщиной пленки BST: *1* — 20 nm, *2* — 100 nm, *3* — 150 nm.

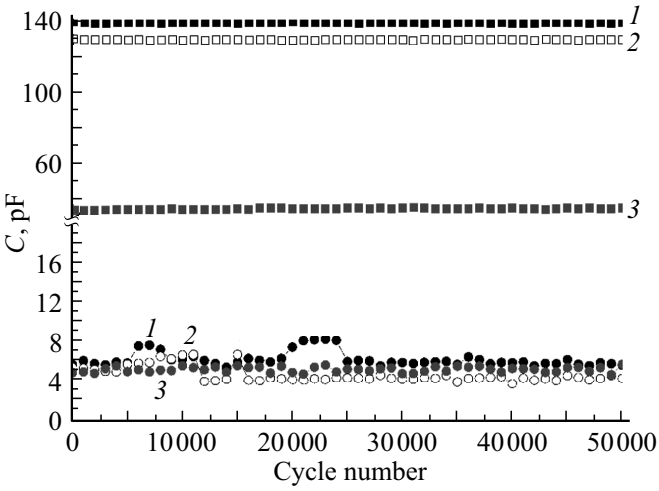

Рис. 4. Зависимости $C_{\max}$ (квадраты) и $C_{\min}$ (круги) от числа циклов переключения структур Ni-BST-Si с толщиной пленки BST: *1* — 20 nm, *2* — 100 nm, *3* — 150 nm.

приводило к сдвигу центра симметрии ВФХ в область отрицательных напряжений. Смещение, по-видимому, связано с изменением концентрации встроенного заряда на границе раздела сегнетоэлектрик/подложка.

На рис. 3 представлены частотные характеристики емкости (C) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\mathrm{tg}\,\delta$) МДП-структур Ni-BST-Si, измеренные при комнатной температуре и постоянном напряжении смещения $V_g = +5,\ +10,\ +12$ V для пленки BST $h = 20,\ 100$ и 150 nm соответственно.

Характер изменения емкости от частоты для МДП-структур идентичен. При увеличении частоты изменение значения емкости не превышало 10 %. Зависимость $\mathrm{tg}\,\delta(f)$ имела вид линейной функции. При уменьшении толщины BST пленки возрастала крутизна характеристик $\mathrm{tg}\,\delta(f)$. Уменьшение толщины сегнетоэлектрической пленки приводило к росту значений $\mathrm{tg}\,\delta$.

На рис. 4 представлены зависимости максимальной и минимальной емкости от числа циклов переключения МДП-структур, полученные при комнатной температуре на частоте 1 MHz. На образцы циклично подавалось V_g, соответствующее значениям максимальной и минимальной C (см. рис. 2). Время задержки при каждом V_g составляло 0.5 s. Таким образом, один цикл переключения выполнялся за 1 s. Был проведен тест, насчитывающий $5 \cdot 10^4$ переключений.

Показано, что за $5 \cdot 10^4$ переключений изменение максимальной и минимальной емкости, а также значение отношения емкостей ($C_{\max}/C_{\min}$) не превышали 5 %.

3.2.2. Электрофизические свойства Ni-HfO_2-Si структур

ВФХ структур Ni-HfO_2-Si при комнатной температуре и частоте 1 MHz приведены на рис. 5. Диапазон напряжения смещения V_g составлял от -4 до 4 V.

Как и в случае с Ni-BST-Si структурами, уменьшение толщины пленки приводило к уменьшению крутизны и ширины петли гистерезиса, однако заметен противоположный сдвиг центра симметрии петли гистерезиса в область положительных напряжений.

Значение максимума емкости составляет 148.46 pF при $h = 20$ nm, 75.36 pF при 100 nm и 50.35 pF при 150 nm, а ширина петель гистерезиса — 0.32 V при $h = 20$ nm, 0.57 V при 100 nm и 0.68 V при 150 nm.

Характер изменения частотной зависимости емкости от толщины слоя аналогичен Ni-BST-Si структурам, однако, значение емкости изменяется не более, чем на 5 %. Зависимость $\mathrm{tg}\,\delta(f)$ для образцов с $h = 150$ и 100 nm частотно-стабильнее, чем для структур с $h = 20$ nm, для которых характерно резкое уменьшение значения $\mathrm{tg}\,\delta$ в диапазоне частот от 1 до 10 kHz. По сравнению с Ni-BST-Si структурами значения $\mathrm{tg}\,\delta$ для Ni-HfO_2-Si в полтора раза больше (рис. 6).

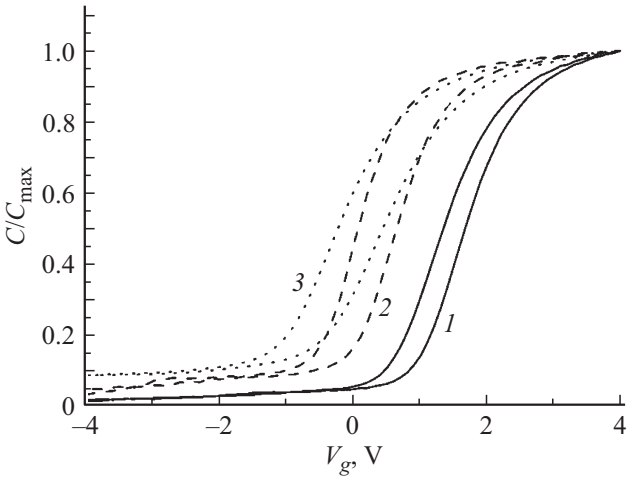

Рис. 5. ВФХ структур Ni-HfO_2-Si с толщинами пленок HfO_2: *1* — 20 nm, *2* — 100 nm, *3* — 150 nm.

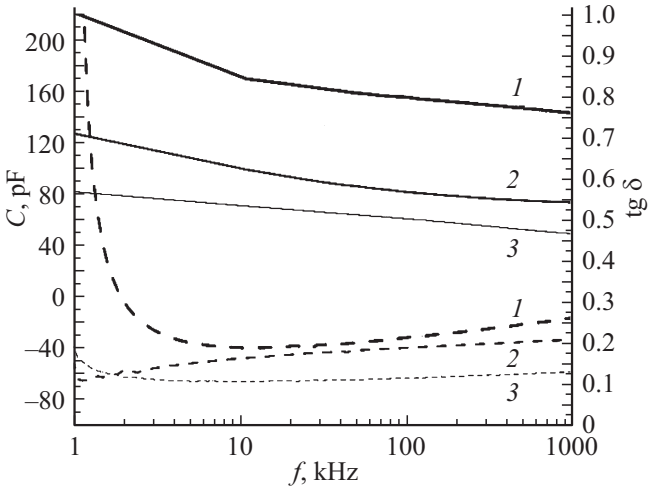

Рис. 6. Зависимости C (сплошные линии) и $\mathrm{tg}\,\delta$ (пунктирные линии) от частоты f Ni-HfO_2-Si структур с толщиной пленки HfO_2: *1* — 20 nm, *2* — 100 nm, *3* — 150 nm.

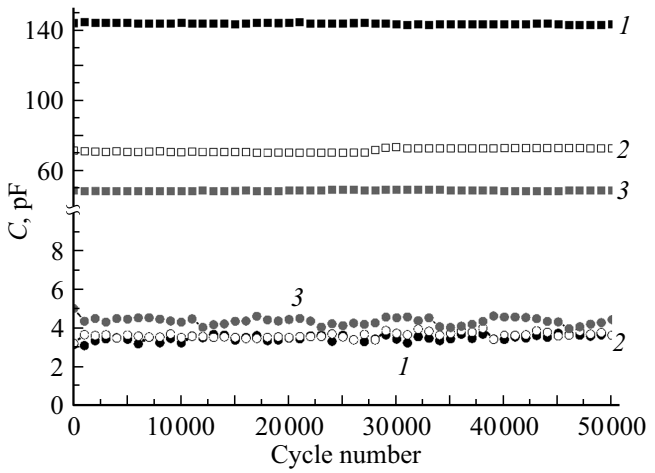

Рис. 7. Зависимости $C_{\max}$ (квадраты) и $C_{\min}$ (круги) от числа циклов переключения Ni-HfO_2-Si структур с толщиной пленки HfO_2: *1* — 20 nm, *2* — 100 nm, *3* — 150 nm.

На рис. 7 представлены зависимости максимальной и минимальной емкости от числа циклов переключения МДП-структур, полученные при комнатной температуре на частоте 1 MHz. Изменение максимальной и минимальной емкости, а также значение отношения емкостей $(C_{\max}/C_{\min})$ за $5 \cdot 10^4$ переключений не превышали 3 %.

4. Заключение

Исследовано влияние толщины пленок BST и HfO_2, сформированных на кремниевых подложках, методом ВЧ-напыления и магнетронного распыления соответственно на электрофизические свойства МДП-структур на их основе. Установлено, что в целом МДП структуры Ni-BST-Si обладают более высокими напряжениями пробоя, чем Ni-HfO_2-Si. Характер изменения свойств МДП-структур при изменении толщины слоев BST и HfO_2 идентичен. Уменьшение толщины пленок приводит к сокращению ширины петель вольт-фарадного гистерезиса, что свидетельствует о понижении степени кристалличности пленок, а также сдвигу центра симметрии петель, что скорее всего связано с изменением концентрации встроенного заряда на границе раздела сегнетоэлектрик/подложка. Циклические измерения продемонстрировали достаточную устойчивость МДП-структур. После $5 \cdot 10^4$ переключений изменение значений отношения $(C_{\max}/C_{\min})$ не превышало 5 %. При этом надежность МДП-структур с уменьшением толщины пленок не ухудшается.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-49-10014, https://rscf.ru/project/23-49-10014/

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Физика сегнетоэлектриков: современный взгляд: учебное пособие / под редакцией К.М. Рабе [и др.]. 3-е изд. (эл.). Лаборатория знаний, М. (2015). 443 с.
[2] Д.А. Абдуллаев, Р.А. Милованов, Р.Л. Волков, Н.И. Боргардт, А.Н. Ланцев, К.А. Воротилов, А.С. Сигов. Российский технологический журнал **8**, *5*, 44 (2020).
[3] К.А. Воротилов, В.М. Мухортов, А.С. Сигов. Интегрированные сегнетоэлектрические устройства / под ред. А.С. Сигова. Энергоатомиздат, М. (2011). 175 с.
[4] Е.И. Гольдман, А.Г. Ждан, Г.В. Чучева. ПТЭ **2**, 110 (1997).
[5] М.С. Афанасьев, Д.А. Белорусов, Д.А. Киселев, В.А. Лузанов, Г.В. Чучева. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. **16**, *7*, 867 (2024).

Редактор В.В. Емцев