

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 (HfO₂) синтезированы на кремниевые подложки методом высокочастотного напыления и магнетронного распыления соответственно. Представлены результаты исследований структурного состава пленок BST и HfO₂ и электрофизических свойств структур металл-диэлектрик-полупроводник (Ni-BST-Si) и (Ni-HfO₂-Si) на их основе.

Ключевые слова: сегнетоэлектрические пленки, титанат бария стронция (BST), оксид гафния (HfO₂), 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}TiO₃ (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 Па, расстояние между мишенью и подложкой 10 мм, температура подложки 630 °С. При заданных условиях скорость роста пленки составляла ≈ 6.0 nm/min.

Пленки HfO₂ были сформированы на кремниевых подложках *n*-типа (100) методом магнетронного распыления керамической мишени аналогичного состава. Основные параметры напыления пленок: расстояние мишень-подложка — 50 мм, диаметр распыляемой мишени — 70 мм, рабочее давление в камере $3 \cdot 10^{-3}$ Торг. 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-HfO₂-Si. Для этого на сформированные пленки BST и HfO₂ методом электроннолучевого распыления через теньевую маску наносился электрод. Материал электрода — никель, площадь $2.7 \cdot 10^{-4}$ см², толщина 0.1 μm. Параметры процесса напыления: остаточное давление в камере 10⁻⁴ Па, температура структуры 70 ± 5 °С, 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 Ka₁ использовался кварцевый монохроматор. Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МДП-структур измерялись на автоматизированной экспериментальной установке [4] с использованием прецизионного измерителя LCR E4980A (Agilent).

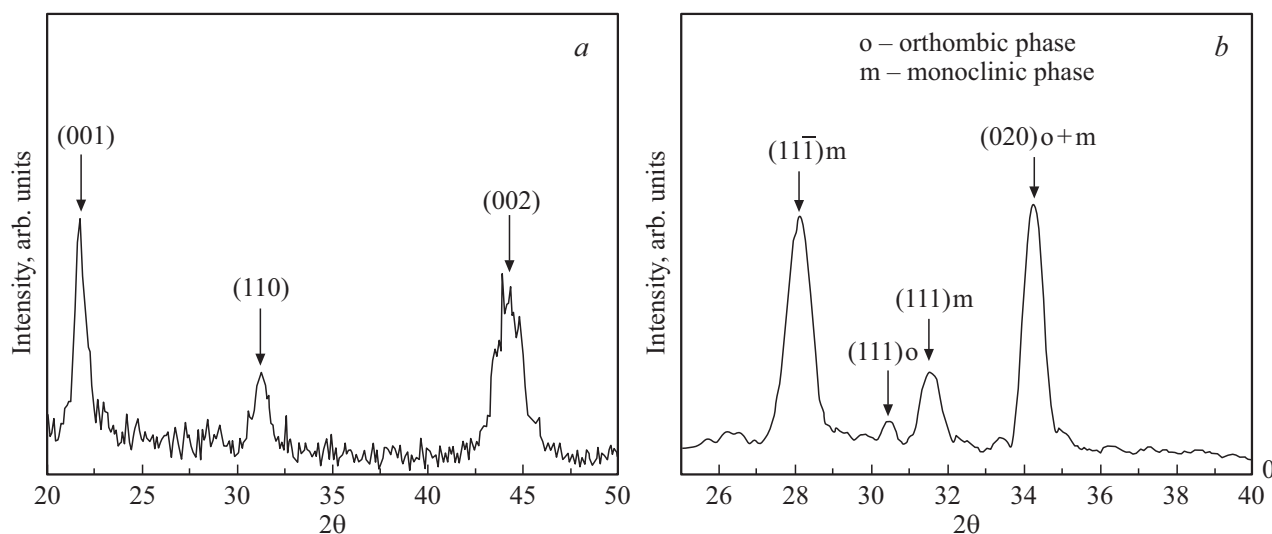


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы пленок толщиной 150 nm BST/Si (a) и HfO₂/Si (b).

Для исследований были изготовлены два типа МДП-структур Ni-BST-Si и Ni-HfO₂-Si с толщинами пленок BST и HfO₂ $h = 20, 100$ и 150 nm.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Структурные исследования МДП структур

На рис. 1 приведены дифрактограммы полученных пленок BST и HfO₂ с толщиной 150 nm.

На обеих дифрактограммах присутствуют пики от различных кристаллографических плоскостей пленок BST и HfO₂. Это свидетельствует о том, что пленки являются поликристаллическими без признаков преимущественной ориентации. При этом на дифрактограмме от пленки HfO₂ можно видеть отражения как от моноклинной фазы, так и от полярной орторомбической, которая, как считается, и придает HfO₂ 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 HfO₂ — 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 HfO₂ 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. Измере-

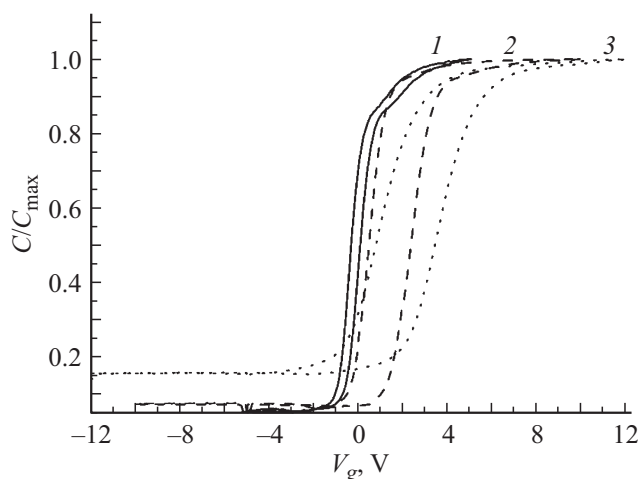


Рис. 2. ВФХ структур Ni-BST-Si с толщинами пленок BST: 1 — 20 nm, 2 — 100 nm, 3 — 150 nm.

ния 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} .

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

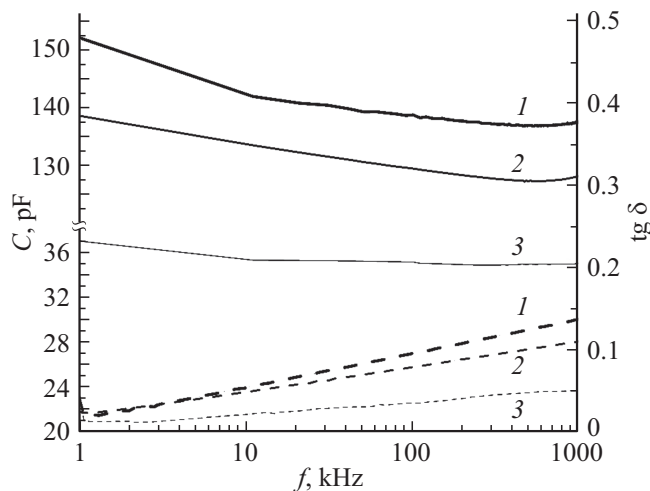


Рис. 3. Зависимости C (сплошные линии) и $\operatorname{tg} \delta$ (пунктирные линии) от частоты (f) структур Ni-BST-Si с толщиной пленки BST: 1 — 20 nm, 2 — 100 nm, 3 — 150 nm.

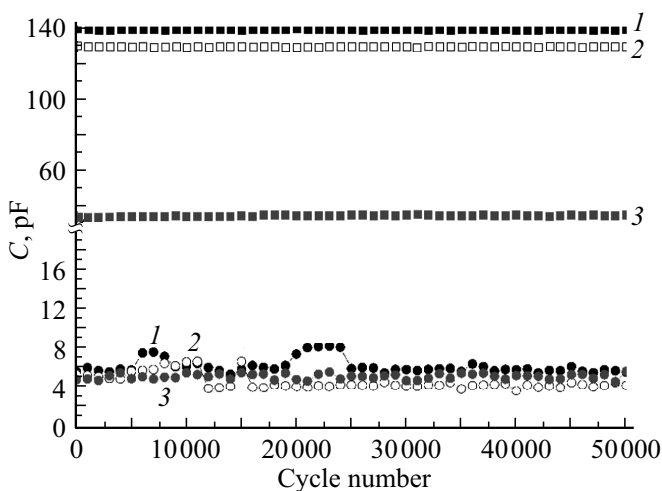


Рис. 4. Зависимости $C_{\max}$ (квадраты) и $C_{\min}$ (круги) от числа циклов переключения структур Ni-BST-Si с толщиной пленки BST: 1 — 20 nm, 2 — 100 nm, 3 — 150 nm.

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 ($\operatorname{tg} \delta$) МДП-структур Ni-BST-Si, измеренные при комнатной температуре и постоянном напряжении смещения $V_g = +5, +10, +12$ В 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 $\operatorname{tg} \delta(f)$ имела вид линейной функции. При уменьшении толщины BST пленки возрастала крутизна характери-

стик $\operatorname{tg} \delta(f)$. Уменьшение толщины сегнетоэлектрической пленки приводило к росту значений $\operatorname{tg} \delta$.

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 значения отношения емкостей ($C_{\max}/C_{\min}$) не превышали 5 %.

3.2.2. Электрофизические свойства Ni-HfO₂-Si структур

ВФХ структур Ni-HfO₂-Si при комнатной температуре и частоте 1 MHz приведены на рис. 5. Диапазон напряжения смещения V_g составлял от -4 до 4 В.

Как и в случае с Ni-BST-Si структурами, уменьшение толщины пленки приводило к уменьшению крутизны и ширины петли гистерезиса, однако замечен 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 В при $h = 20$ nm, 0.57 В при 100 nm и 0.68 В 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 $\operatorname{tg} \delta(f)$ для образцов с $h = 150$ и 100 nm частотно-стабильнее, чем для структур с $h = 20$ nm, для которых характерно резкое уменьшение значения $\operatorname{tg} \delta$ в диапазоне частот от 1 до 10 kHz. По сравнению с Ni-BST-Si структурами значения $\operatorname{tg} \delta$ для Ni-HfO₂-Si в полтора раза больше (рис. 6).

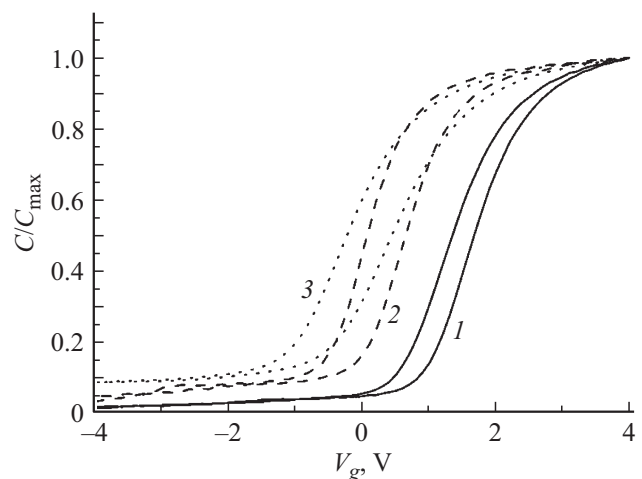


Рис. 5. ВФХ структур Ni-HfO₂-Si с толщинами пленок HfO₂: 1 — 20 nm, 2 — 100 nm, 3 — 150 nm.

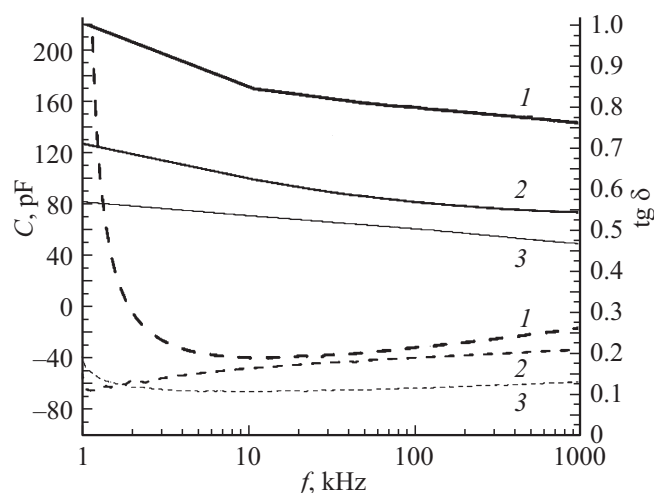


Рис. 6. Зависимости C (сплошные линии) и $\text{tg } \delta$ (пунктирные линии) от частоты f Ni-HfO₂-Si структур с толщиной пленки HfO₂: 1 — 20 nm, 2 — 100 nm, 3 — 150 nm.

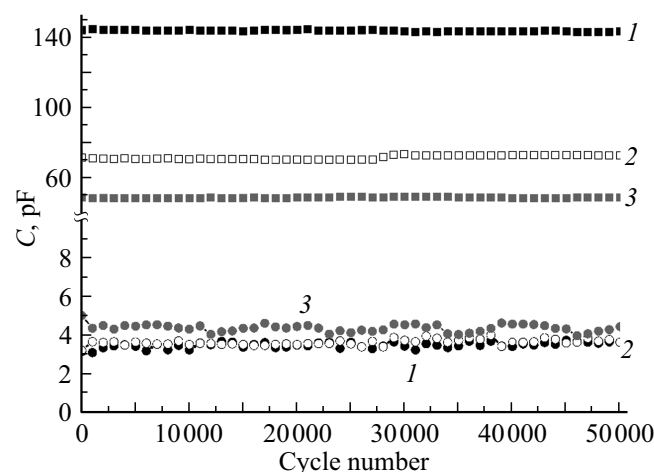


Рис. 7. Зависимости C_{max} (квадраты) и C_{min} (круги) от числа циклов переключения Ni-HfO₂-Si структур с толщиной пленки HfO₂: 1 — 20 nm, 2 — 100 nm, 3 — 150 nm.

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

4. Заключение

Исследовано влияние толщины пленок BST и HfO₂, 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-HfO₂-Si. Характер изменения свойств

МДП-структур при изменении толщины слоев BST и HfO₂ 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 ($C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$) 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. Богардт, 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