УДК 537.226 *Оригинальная статья*

Влияние температуры синтеза на структурные и электрофизические свойства структур металл-диэлектрик-полупроводник на основе пленок оксида гафния

М.С. Афанасьев, Д.А. Белорусов, Е.И. Гольдман, Д.А. Киселев, А.А. Сивов, Г.В. Чучева
Фрязинский филиал ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»
141190, Россия, Московская область, Фрязино, пл. Введенского, 1
gvc@fireras.su

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.530

Аннотация: В работе методом магнетронного распыления получены пленки оксида гафния на кремниевых подложках при температурах 25, 300, 500 и 700°С. Представлены результаты исследований качества пленок HfO_2 на сканирующем зондовом микроскопе и электрофизических свойств структур металл-диэлектрик-полупроводник (*Ni-*HfO_2*-Si*). Показано, что повышение температуры синтеза укрупняет кристаллиты (от 53 до 100 нм) и снижает шероховатость. При температуре синтеза 500°С наблюдается улучшение сегнетоэлектрических параметров: встроенное напряжение уменьшается с +1,38 до +0,33 В, коэффициент прямоугольности петли растет с 0,34 до 0,63. Наибольшая ширина петли на вольт-фарадной характеристике (~4 В) и наилучшая частотная стабильность емкости и диэлектрических потерь достигаются при температуре синтеза 300°С. Дальнейшее повышение температуры до 500-700°С увеличивает максимальную емкость, но сужает петлю гистерезиса, снижает частотную стабильность и сдвигает минимум диэлектрических потерь в область высоких частот. Определено, что выход полевых кривых высокочастотных емкостей на насыщение не связан с инверсией *Si* на контакте *Si*/HfO_2 при обеднении полупроводника и не связан с глубоким обогащением поверхности кремния, а обусловлен пиннингом уровня Ферми на ветвях U-образной плотности состояний электронных ловушек в буферном слое между подложкой и изолирующем слоем. Установлено, что выбор температуры синтеза позволяет целенаправленно управлять свойствами пленок: 500°С оптимальна для усиления сегнетоэлектрического отклика, а 300°С – для получения частотно-стабильных структур. Результаты полезны для разработки энергонезависимой памяти и высокочастотных устройств на основе HfO_2.

Ключевые слова: сегнетоэлектрические пленки, оксид гафния (HfO_2), структуры металл-диэлектрик-полупроводник, электрофизические свойства, поляризация.

Афанасьев Михаил Сергеевич – д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник, Фрязинский филиал ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»
Белорусов Дмитрий Александрович – научный сотрудник, Фрязинский филиал ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»
Гольдман Евгений Иосифович – к. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник, Фрязинский филиал ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»
Киселев Дмитрий Александрович – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Фрязинский филиал ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»
Сивов Алексей Алексеевич – научный сотрудник, Фрязинский филиал ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»
Чучева Галина Викторовна – д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Фрязинский филиал ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»

Original paper

The influence of synthesis temperature on the structural and electrical properties of metal-dielectric-semiconductor structures based on hafnium oxide films

M.S. Afanasiev, D.A. Belorusov, E.I. Goldman, D.A. Kiselev, A.A. Sivov, G.V. Chucheva
Fryazino branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazino, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.530

Abstract: In this work, hafnium oxide films were obtained on silicon substrates using magnetron

© М.С. Афанасьев, Д.А. Белорусов, Е.И. Гольдман, Д.А. Киселев, А.А. Сивов, Г.В. Чучева, 2026

sputtering at temperatures of 25, 300, 500, and 700°C. The results of scanning probe microscopy studies of the HfO_2 film quality and electrical properties of metal-insulator-semiconductor (*Ni-*HfO_2*-Si*) structures are presented. It is shown that an increase in the synthesis temperature increases the crystallite size (from 53 to 100 nm) and reduces the roughness. At a synthesis temperature of 500°C, an improvement in the ferroelectric parameters is observed: the built-in voltage decreases from +1,38 to +0,33 V, and the loop squareness coefficient increases from 0,34 to 0,63. The largest loop width on the capacitance-voltage characteristic (~4 V) and the best frequency stability of the capacitance and dielectric losses are achieved at a synthesis temperature of 300°C. A further increase in temperature to 500-700°C increases the maximum capacitance but narrows the hysteresis loop, reduces frequency stability, and shifts the minimum dielectric loss to high frequencies. It was determined that the saturation of the high-frequency capacitance field curves is related neither to Si inversion at the *Si*/HfO_2 contact during semiconductor depletion nor to deep enrichment of the silicon surface. Rather, it is caused by Fermi-level pinning on the branches of the U-shaped density of states of electron traps in the buffer layer between the substrate and the insulating layer. It was established that the choice of the synthesis temperature allows for targeted control of the film properties: 500°C is optimal for enhancing the ferroelectric response, while 300°C is optimal for obtaining frequency-stable structures. The results are useful for the development of non-volatile memory and high-frequency devices based on HfO_2.

Keywords: ferroelectric films, hafnium oxide (HfO_2), structures metal-dielectric-semiconductor, electrophysical properties, polarization.

Mikhail S. Afanasiev – Dr. Sc., Associate Professor, Leading Researcher, Fryazino branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, ORCID: 0000-0001-5475-8616
Dmitriy A. Belorusov – Researcher, Fryazino branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS
Evgeniy I. Goldman – Ph. D., Leading Researcher, Fryazino branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS.
Dmitriy A. Kiselev – Ph. D., Senior Researcher, Fryazino branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, ORCID: 0000-0003-1047-3007
Alexey A. Sivov – Researcher, Fryazino branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS
Galina V. Chucheva – Dr. Sc., Chief Researcher, Fryazino branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, ORCID: 0000-0002-9956-1857

Поступила в редакцию/received: 20.08.2026; после рецензирования/revised: 15.09.2026; принята/accepted: 17.09.2026.

1. Введение

В настоящее время применение сегнетоэлектрических пленок в микроэлектронике становится все более распространенным [1]. Существует растущий спрос на многофункциональные сегнетоэлектрические материалы для устройств, таких как конденсаторные и микроэлектромеханические системы (МЭМС), энергонезависимая память [2]. Поэтому расширение перечня сегнетоэлектрических материалов, используемых в качестве активных сред электронных структур – это важная задача современной электроники. Открытие сегнетоэлектричества в элементах на основе легированного оксида гафния (HfO_2), сделанное Беске и др., опубликованное в 2011 г. [3], положило начало созданию и исследованиям транзисторных структур с изолирующими слоями HfO_2, $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ [4, 5].

Электрофизические свойства пленок на основе HfO_2 в значительной

степени определяются условиями их синтеза, и одним из наиболее критических параметров является температура осаждения (температура подложки). Исследования показывают, что вариация температуры синтеза в диапазоне от комнатной до 500°C и выше оказывает комплексное воздействие на структурно-фазовое состояние пленок, их морфологию [6, 7], характер межфазных границ и, как следствие, на диэлектрические и транспортные характеристики [8]. Таким образом, температура синтеза является ключевым параметром, определяющим комплекс электрофизических свойств пленок оксида гафния на кремниевых подложках. Понимание закономерностей влияния этого фактора на структуру, диэлектрические характеристики, токи утечки и параметры межфазной границы необходимо для оптимизации технологических режимов получения высококачественных пленок HfO_2 с заданными свойствами.

В настоящей работе анализируется влияние температуры синтеза на структурные и электрофизические свойства структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) на основе пленок оксида гафния. В качестве методов анализа использованы исследования на сканирующем зондовом микроскопе и измерения высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ).

2. Экспериментальная часть

Пленки оксида гафния сформированы на кремниевых подложках n-типа (100) методом магнетронного распыления керамической мишени аналогичного состава. Основные параметры напыления пленок: газ – аргон (Ar), остаточное давление $1\cdot10^{-2}$ мбар, время напыления – 30 мин, расстояние мишень-подложка – 8 см. Предварительная откачка камеры проводилась до давления $4\cdot10^{-5}$ мбар. Заданная мощность высокочастотного блока питания составляла 150 Вт, эффективная мощность при напылении 121 Вт. Задавались температуры подложки при напылении: 25°C, 300°C, 500°C, 700°C. Для исследования электрофизических свойств полученных пленок были сформированы МДП-структуры $Ni-HfO_2-Si$. Для этого на синтезированные пленки HfO_2 методом электроннолучевого распыления через теневую маску наносился электрод. Материал электрода – никель, площадь $2{,}7\cdot10^{-4}$ см^2, толщина 0,1 мкм. Параметры процесса напыления: остаточное давление в камере 10^{-6} мбар, температура структуры 70±5°C, скорость напыления 2,0±0,2 Å/сек. Рельеф поверхности и процессы переключения поляризации изучались методом силовой микроскопии пьезоотклика (СМП) на сканирующем зондовом микроскопе NTEGRA Prima (NT-MDT, Россия) с использованием кантилевера серии HA-HR с Pt покрытием, жесткостью

17 Н/м и резонансной частотой 230 кГц. Остаточные петли гистерезиса получены в режиме выключения напряжения при времени записи и считывания 25 мс. ВФХ МДП-структур измерялись на автоматизированной экспериментальной установке [9] с использованием прецизионного измерителя LCR E4980A (Agilent). Для исследований были изготовлены четыре серии МДП-структур $Ni-HfO_2-Si$ с различной температурой синтеза пленки HfO_2: 25°C, 300°C, 500°C, 700°C.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 а, в показаны изображения поверхности пленок HfO_2, синтезированных при 300°C и 500°C, соответственно. Статистический анализ, проведенный в программе Gwyddion [10], показал, что пленки имеют равномерное распределение зерен (см. рис. 1 б, г). Установлено, что увеличение температуры синтеза приводит к латеральному росту зерен: средний диаметр зерен для пленки, синтезированной при 500°C, составил 100 нм против 53 нм для слоя HfO_2, сформированного при 300°C. При этом среднеквадратичная шероховатость поверхности (Rms), наоборот, уменьшается: 0,75 нм для HfO_2 (300°C) и 0,55 нм для HfO_2 (500°C).

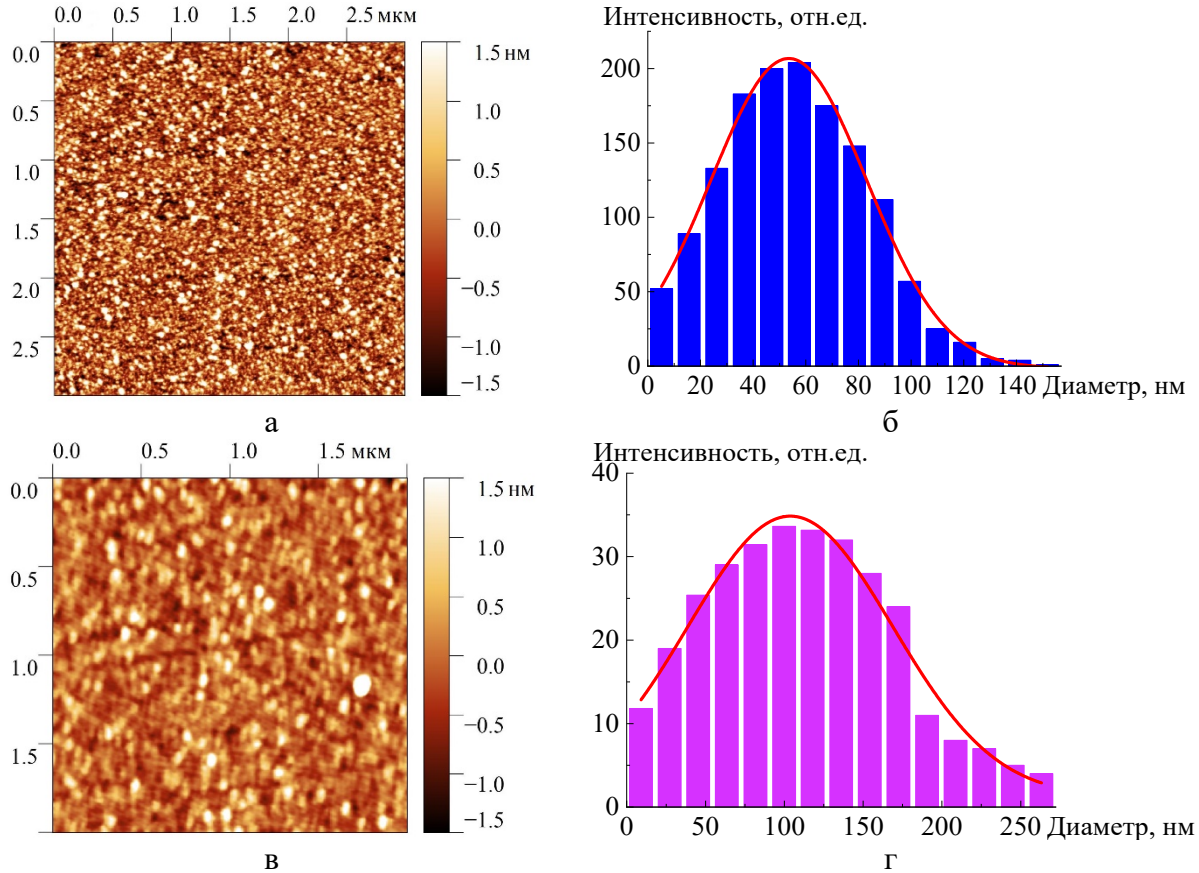
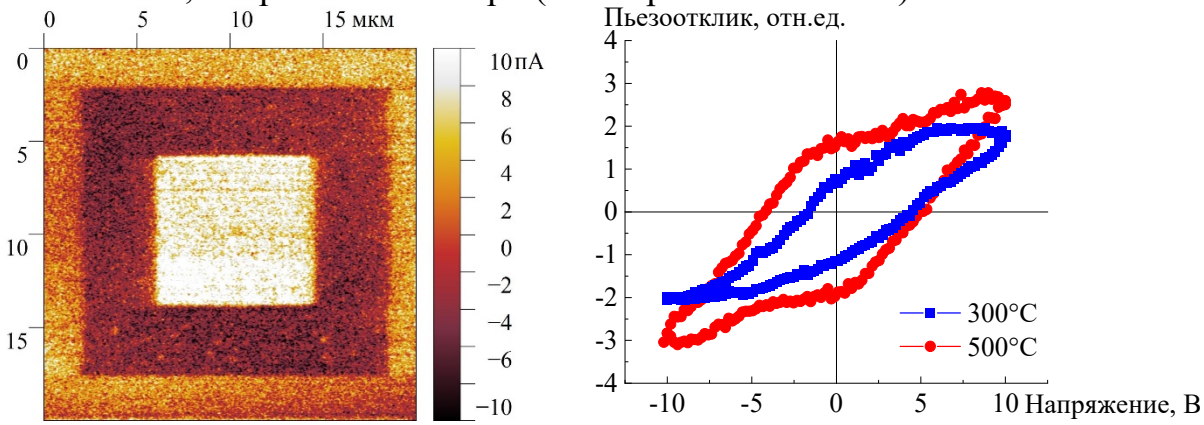


Рис. 1. Изображения рельефа поверхности пленки HfO_2 (а – 300°C, в – 500°C), распределение диаметра зерен (б – 300°C, г – 500°C).

Таким образом, увеличение температуры синтеза одновременно способствует укрупнению кристаллитов и уменьшению шероховатости, что является характерным признаком перехода к более равновесной, структурно совершенной и морфологически однородной пленке.

На рис. 2 а представлен сигнал вертикального пьезоэлектрического отклика ($R \times \cos(\Phi)$), полученный методом СМП, который демонстрирует наличие переключаемой поляризации P в пленке оксида гафния и свидетельствует о сегнетоэлектрическом поведении HfO_2 на наномасштабном уровне.

Запись проводилась при подаче на зонд постоянного напряжения -10 В и сканировании области размером 16×16 мкм^2 с последующим перемещением зонда при приложении +10 В к центральному участку 8×8 мкм^2. О направлении P можно судить по контрасту между поляризованными областями: светлые области соответствуют доменам с поляризацией, ориентированной вниз (к подложке), тогда как темные области – P, направленной вверх (к поверхности пленки).



а б

Рис. 2. Индуцированные доменные области (а) напряжением ±10 В (+10 В центральный квадрат); б – остаточные петли гистерезиса пленок HfO_2.

В дополнение к визуализации доменов с противоположным направлением поляризации сегнетоэлектрический характер тонких пленок оксида гафния однозначно подтверждается данными локальной спектроскопии переключения пьезоэлектрического отклика – наличием петель гистерезиса (см. рис. 2 б). Асимметрия петли гистерезиса для пленки HfO_2 (300°C) относительно нуля по оси напряжения (смещение, или imprint) свидетельствует о наличии внутреннего электрического поля в пленке, которое смещает коэрцитивные поля (напряжение переключение). Значение напряжения смещения (*built-in* напряжение) составило +1,38 В, что в 4 раза превышает данный параметр V_{in} = +0,33 В для пленки HfO_2 (500°C). Как видно из графиков (см. рис. 2 б), увеличение температуры синтеза приводит к более прямоугольной петле гистерезиса. Значения

коэффициента прямоугольности петли гистерезиса составили $k = 0{,}34$ в HfO_2 (300°C) и $k = 0{,}63$ в HfO_2 (500°C).

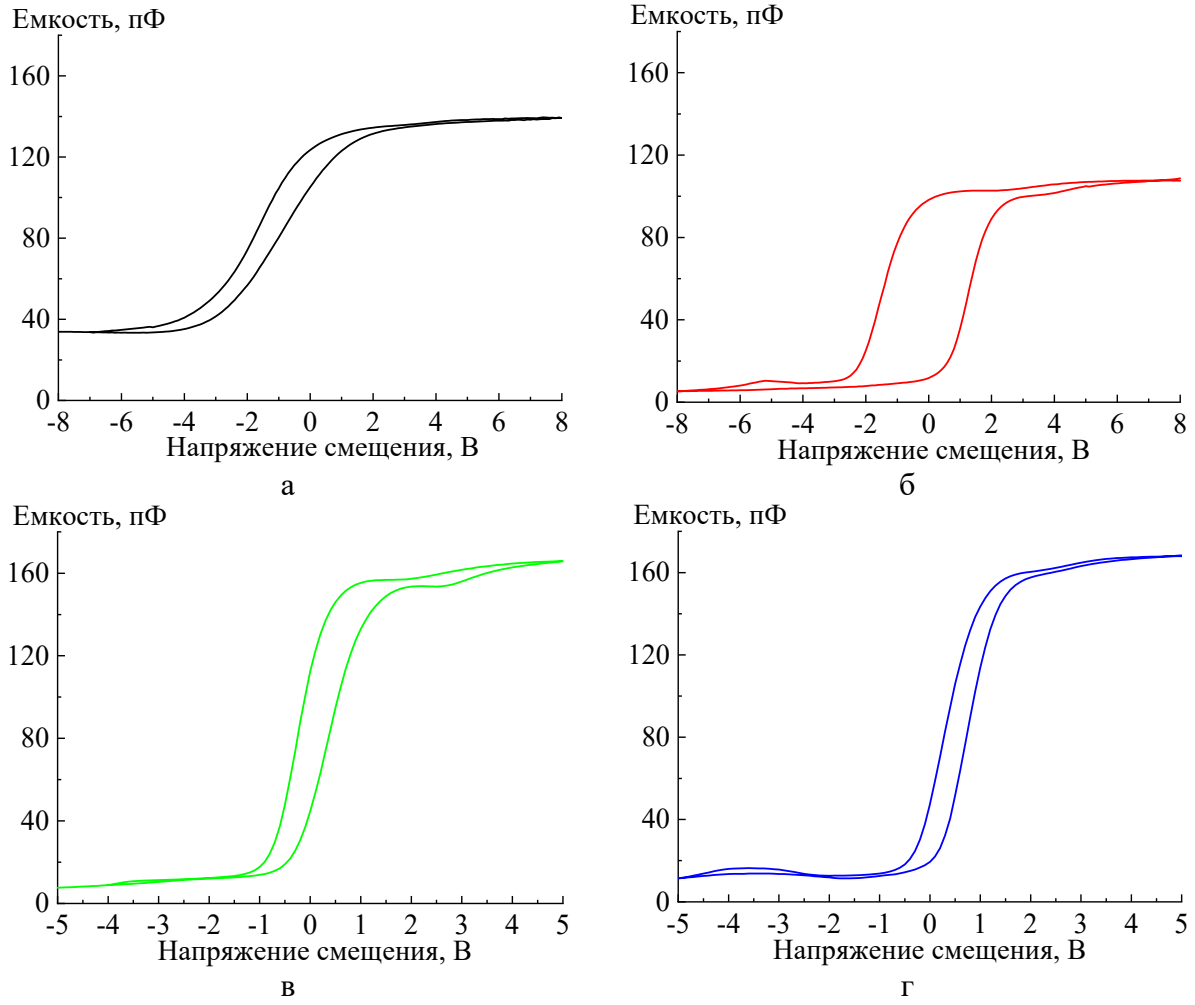


Рис. 3. ВФХ структур $Ni - HfO_2 - Si$ с температурой синтеза пленки HfO_2: а − 25°C, б − 300°C, в − 500°C, г − 700°C.

На рис. 3 а-г представлены высокочастотные ВФХ $Ni - HfO_2 - Si$-структур с температурой синтеза пленок HfO_2: 25°C, 300°C, 500°C и 700°C. Измерения проводились при комнатной температуре и частоте 100 кГц, в диапазоне напряжений смещения V_g от 8 до -8 В и обратно (для структур, полученных при температурах 25°C, 300°C) и V_g от 5 до -5 В и обратно (500°C и 700°C). Скорость изменения V_g для всех структур составляла 500 мВ/сек.

При измерении ВФХ все структуры демонстрировали гистерезисное поведение, выражавшееся расхождением прямой и обратной ветвей ВФХ. Однако ширина петли гистерезиса существенно зависела от температуры осаждения пленки HfO_2. Для образцов, полученных при температуре синтеза 25°C, характерна наибольшая минимальная емкость и наименьшая

крутизна характеристик, что, по-видимому, связано с большим количеством перезаряжающихся дефектов. Образцы, полученные при температуре 300°С, обладали наибольшей петлей гистерезиса порядка 4 В, но при этом наименьшей максимальной емкостью, примерно 109 пФ. Переход между плато ВФХ происходил в области напряжений, соответствующих коэрцитивному полю. Такое поведение можно охарактеризовать максимально быстрой кинетикой перераспределения заряда, что свидетельствует об оптимальных технологических условиях формирования. При увеличении температуры осаждения до 500°С и 700°С наблюдалось увеличение максимальной емкости и соответственно коэффициента переключения, но при этом происходило уменьшение ширины петли гистерезиса, а также уменьшение величины пробивных напряжений. Оба этих обстоятельства объясняются деградацией структуры, вызванной образованием более толстого паразитного слоя SiO_2 и релаксацией механических напряжений, вследствие чего подавляется как переключение поляризации, так и дефектная кинетика.

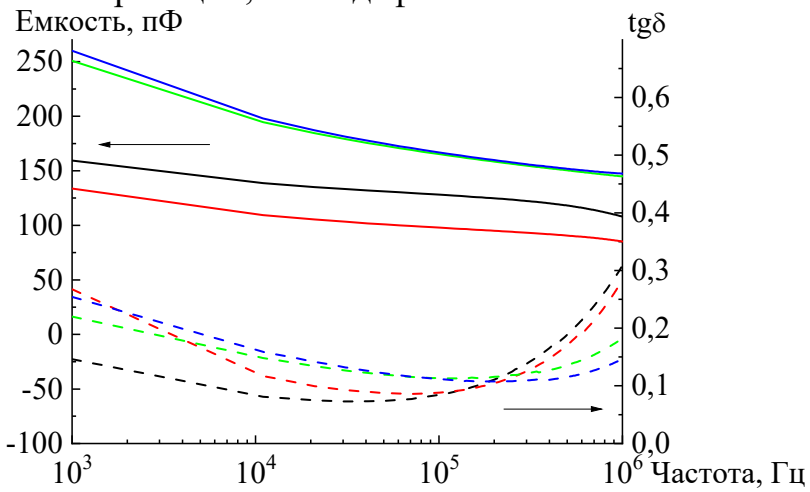


Рис. 4. Зависимости емкости (сплошная линия) и тангенса угла диэлектрических потерь (пунктирная линия) от частоты структур $Ni-HfO_2-Si$ с температурой синтеза пленки HfO_2: черная кривая − 25°С, красная − 300°С, зеленая − 500°С, синия − 700°С.

На рис. 4 представлены зависимости емкости и тангенса угла диэлектрических потерь от частоты структур $Ni-HfO_2-Si$ с температурой синтеза пленки HfO_2: 25°С, 300°С, 500°С и 700°С. Измерения проводились при комнатной температуре и напряжении, соответствующему максимуму емкости при измерении ВФХ, в диапазоне частот от 1 кГц до 1 МГц с шагом 10 кГц.

Частотные зависимости емкости демонстрируют монотонное снижение емкости с ростом частоты для всех исследованных структур. На частоте 1 кГц максимальная емкость 260 пФ наблюдалась у образцов, полученных при температуре синтеза 700°С, а минимальная 134 пФ у

образцов при 300°С. Изменение емкости при росте частоты от 1 кГц до 1 МГц для структур, полученных при температурах 25°С и 300°С, не превышает 50 пФ, в то время как для образцов, полученных при температурах 500°С и 700°С, изменение превышает 100 пФ.

Частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь, напротив, демонстрирует немонотонное поведение, на низких частотах наблюдается спад диэлектрических потерь, достигающих минимума на определенной частоте, после чего диэлектрические потери вновь растут.

Для структур, полученных при температуре 25°С, значение диэлектрических потерь падало от 0,146 при частоте 1 кГц до 0,073 при частоте 30 кГц и росло до 0,309 при частоте 1 МГц. Для образцов, полученных при температуре 300°С, значение диэлектрических потерь падало от 0,267 при частоте 1 кГц до 0,085 при частоте 70 кГц и росло до 0,284 при частоте 1 МГц. Для объектов, полученных при температуре 500°С, величина диэлектрических потерь уменьшалась с 0,22 при частоте 1 кГц до 0,112 при частоте 130 кГц и возрастало до 0,182 при частоте 1 МГц. Для структур, сформированных при температуре 700°С, значение диэлектрических потерь падало от 0,254 при частоте 1 кГц до 0,107 при частоте 30 кГц и росло до 0,147 при частоте 1 МГц.

Увеличение температуры осаждения приводит к сдвигу минимума диэлектрических потерь в сторону больших частот. Максимально частотно стабильной структурой как по изменению емкости, так и по изменению диэлектрических потерь, себя проявили образцы, полученные при 300°С.

Из кривых $C(V_g)$ по аналогии с [11, 12] была восстановлена зависимость изгиба зон в полупроводнике от полевого напряжения:

$$C(V_g) \cong C_s, \quad C_s = \frac{C_{fb}\left|1-e^{-v_s}\right|}{2^{1/2}\left(e^{-v_s}+v_s-1\right)^{1/2}}, \quad C_{fb} = S\left(\frac{æ_s q^2 N_d}{4\pi T}\right)^{1/2}, \qquad (1)$$

здесь q – элементарный заряд, T – температура в энергетических единицах, S – площадь полевого электрода, N_d – концентрация донорного легирования, $v_s = qV_s/T$ – безразмерный изгиб зон в полупроводнике ($v_s > 0$ при обеднении и $v_s < 0$ при обогащении), $æ_s$ – диэлектрическая проницаемость полупроводника, C_s – емкость заряженного слоя полупроводника. Первое равенство в соотношениях (1) справедливо в условиях $C(V_g) << C_i$, где C_i – эффективная емкость изолирующего слоя HfO_2. Второе и третье выражения в формулах (1) приведены в [13] и справедливы для классического (Больцмановского) распределения свободных носителей заряда по энергии. Величина N_d определялась из паспортного значения удельного сопротивления подложки 6,25 Ом·см, и

расчетная величина емкости в состоянии плоских зон C_{fb} составила 66,5 пФ. Результаты расчета по формулам (1) зависимости изменения безразмерного изгиба зон полупроводника от напряжения смещения $v_s(V_g)$ представлены на рис. 5. Для всех структур характерно изменение v_s от больших положительных значений (глубокое обеднение) до отрицательных (обогащение). При напряжении $V_g = +5$ В достигаются отрицательные сравнимые значения $|v_s| \approx 11\text{-}12$, что указывает на одинаковую степень обогащения при указанном V_g.

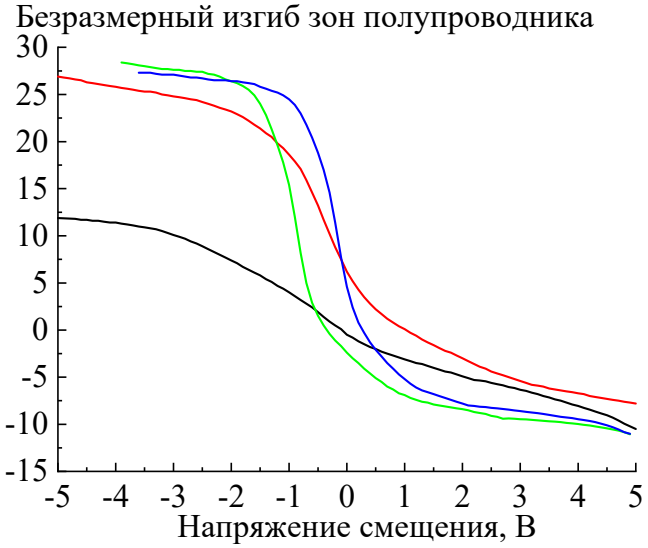


Рис. 5. Зависимости безразмерного изгиба зон полупроводника v_s от напряжения смещения V_g, вычисленные для структур HfO_2 / Si, полученных при температурах осаждения: черная – 25°С, красная – 300°С, зеленая – 500°С, синяя – 700°С.

Выход изгиба зон на стремление к насыщению в области слабой инверсии при обеднении Si и на плато при незначительном (уровень Ферми в полупроводнике на границе раздела с HfO_2 лежит в запрещенной зоне кремния) вырождении в области обогащения свидетельствуют о физической причине прекращения изменения v_s с ростом и уменьшением V_g: имеет место пиннинг уровня Ферми на ветвях U-образной плотности состояний электронных ловушек в буферном слое между Si и HfO_2 [11, 12].

4. Заключение

Экспериментальные данные показывают, что повышение температуры синтеза пленок HfO_2 от 300°С до 500°С приводит к улучшению их сегнетоэлектрических характеристик. Уменьшение встроенного напряжения с +1,38 В до +0,33 В (почти в 4 раза) свидетельствует о снижении плотности захваченного заряда и релаксации

внутренних электрических полей, что обусловлено уменьшением концентрации дефектов и напряжений в процессе высокотемпературного роста. Рост коэффициента прямоугольности с 0,34 до 0,63 указывает на повышение кооперативности переключения доменов, что является следствием увеличения структурной однородности и уменьшения пиннинга доменных стенок. Таким образом, температура синтеза, равная 500°C, обеспечивает существенно более высокое качество пленок, приближая их свойства для применения в сегнетоэлектрической памяти и в других функциональных устройствах.

Исследования ВФХ и частотных зависимостей емкости и тангенса угла диэлектрических потерь структур $Ni - HfO_2 - Si$ позволили установить влияние температуры синтеза на электрофизические свойства подобных структур. Все структуры обладали сегнетоэлектрической природой, выраженной гистерезисным поведением ВФХ. Наибольшая ширина петли (≈ 4 В) и наиболее частотно стабильные характеристики наблюдались у структур с температурой синтеза 300°C. Увеличение температуры осаждения до 500°C и 700°C приводило к увеличению максимума емкости структуры, но сопровождалось уменьшением ширины петли гистерезиса и уменьшением частотной стабильности как емкости, так и тангенса угла диэлектрических потерь, а также к сдвигу минимума диэлектрических потерь в область повышенных частот.

Выход кривых ВФХ на насыщение не связан ни с инверсией Si на контакте Si / HfO_2 при обеднении полупроводника, ни с глубоким обогащением поверхности кремния, а обусловлен пиннингом уровня Ферми на ветвях U-образной плотности состояний электронных ловушек в буферном слое между подложкой и изолирующем слоем.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Библиографический список:

1. **Воротилов, К.А.** Интегрированные сегнетоэлектрические устройства / К.А. Воротилов, В.М. Мухортов, А.С. Сигов. – М.: Энергоатомиздат, 2011. – 175 с.
2. **Park, J.Y.** A perspective on semiconductor devices based on fluorite-structured ferroelectrics from the materials–device integration perspective / J.Y. Park, K. Yang, D.H. Lee et al. // Journal of Applied Physics. – 2020. – V. 128. – I. 24. – Art. № 240904. – 24 p. DOI: 10.1063/5.0035542.
3. **Böscke, T.S.** Ferroelectricity in hafnium oxide thin films / T.S. Böscke, J. Müller, D. Bräuhaus et al. // Applied Physics Letters. – 2011. – V. 99. – I. 10. – Art. № 102903. – 4 p. DOI:10.1063/1.3634052.
4. **Müller, J.** Ferroelectric $Zr_{0.5}Hf_{0.5}O_2$ thin films for nonvolatile memory applications / J. Müller, T.S. Böscke, D. Bräuhaus et al. // Applied Physics Letters. – 2011. – V. 99. – I. 11. – Art. № 112901. – 4 p. DOI: 10.1063/1.3636417.
5. **Paul, A.** Hafnium oxide-based ferroelectric field effect transistors: From materials and reliability to applications in storage-class memory and in-memory computing / A. Paul, G. Kumar, A. Das et al. // Journal of Applied Physics. – 2025. – V. 138. – I. 1. – Art. № 010701. – 19 p. DOI: 10.1063/5.0278057.
6. **Khaskheli, M.A.** Effects of substrate temperature on dielectric and structural properties of Ti and Er co-doped

HfO_2 thin films / M.A. Khaskheli, P. Wu, X. Li et al. // Vacuum. – 2012. – V. 86. – I. 12. – P. 1920-1923. DOI: 10.1016/j.vacuum.2012.03.028.
7. **Das, K.C.** Evolution of microstructural and electrical properties of sputtered HfO_2 ceramic thin films with RF power and substrate temperature / K.C. Das, S.P. Ghosh, N. Tripathy et al. // Ceramics International. – 2016. – V. 42. – I. 1. – P. 138-145. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.08.038.
8. **Nath, M.** Interface and electrical properties of ultra-thin HfO_2 film grown by radio frequency sputtering / M. Nath, A. Roy // Physica B: Condensed Matter. – 2016. – V. 482. – P. 43-50. DOI: 10.1016/j.physb.2015.12.007.
9. **Гольдман, Е.И.** Определение коэффициентов ионного переноса в диэлектрических слоях на поверхности полупроводников по динамическим вольтамперным характеристикам деполяризации / Е.И. Гольдман, А.Г. Ждан, Г.В. Чучева // Приборы и техника эксперимента. – 1997. – № 6. – С. 110-115.
10. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, …) data analysis software. – Режим доступа: www.url: http://gwyddion.net. – 15.07.2026.
11. **Goldman, E.I.** On the form of high-frequency voltage-capacitance characteristics of metal-insulator-semiconductor structures with a ferroelectric insulating layer $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ / E.I. Goldman, G.V. Chucheva, D.A. Belorusov // Ceramics International. – 2021. – V. 47. – I. 15. – P. 21248-21252. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.04.129.
12. **Goldman, E.I.** The role of a buffer layer at the contact with silicon in structures with an insulating gap made of a material replacing SiO_2 / E.I. Goldman, G.V. Chucheva, D.A. Belorusov // Ceramics International. – 2024. – V. 50. – I. 6. – P. 9678-9681. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.12.286.
13. **Sze, S.M.** Physics of semiconductor devices: 3rd edition / S.M. Sze, K.K. Ng. – Hoboken: A John Willey & Sons, 2007. – 815 p.

References:

1. Vorotilov K.A., Muhortov V.M., Sigov A.S. *Integrirovannye segnetoelektricheskie ustroystva* [Integrated ferroetoelectric devices]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2011. – 175 p. (In Russian).
2. Park J.Y., Yang K., Lee D.H. et al. A perspective on semiconductor devices based on fluorite-structured ferroelectrics from the materials–device integration perspective, *Journal of Applied Physics*, 2020, vol. 128, issue 24, art. no. 240904, 24 p. DOI: 10.1063/5.0035542.
3. Böscke T.S., Müller J., Bräuhaus D. et al. Ferroelectricity in hafnium oxide thin films, *Applied Physics Letters*, 2011, vol. 99, issue 10, art. no. 102903, 4 p. DOI: 10.1063/1.3634052.
4. Müller J., Böscke T.S., Bräuhaus D. et al. Ferroelectric $Zr_{0.5}Hf_{0.5}O_2$ thin films for nonvolatile memory applications, *Applied Physics Letters*, 2011, vol. 99, issue 11, art. no. 112901, 4 p. DOI: 10.1063/1.3636417.
5. Paul A., Kumar G., Das A. et al. Hafnium oxide-based ferroelectric field effect transistors: From materials and reliability to applications in storage-class memory and in-memory computing, *Journal of Applied Physics*, 2025, vol. 138, issue 1, art. № 010701, 19 p. DOI: 10.1063/5.0278057.
6. Khaskheli M.A., Wu P., Li X. et al. Effects of substrate temperature on dielectric and structural properties of Ti and Er co-doped HfO_2 thin films, *Vacuum*, 2012, vol. 86, issue 12, pp. 1920-1923. DOI: 10.1016/j.vacuum.2012.03.028.
7. Das K.C., Ghosh S.P., Tripathy N. et al. Evolution of microstructural and electrical properties of sputtered HfO_2 ceramic thin films with RF power and substrate temperature, *Ceramics International*, 2016, vol. 42, issue 1, pp. 138-145. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.08.038.
8. Nath M., Roy A. Interface and electrical properties of ultra-thin HfO_2 film grown by radio frequency sputtering, *B: Condensed Matter*, 2016, vol. 482, pp. 43-50. DOI: 10.1016/j.physb.2015.12.007.
9. Gol'dman E.I., Zhdan A.G., Chucheva G.V. Determination of the coefficients of ion transfer in insulating layers on the surface of semiconductors using dynamic current-voltage depolarization characteristics, *Instruments and Experimental Techniques*, 1997, vol. 40, issue 2, pp. 841-846.
10. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, …) data analysis software. Available at: http://gwyddion.net (accessed 15.07.2026).
11. Goldman E.I., Chucheva G.V., Belorusov D.A. On the form of high-frequency voltage-capacitance characteristics of metal-insulator-semiconductor structures with a ferroelectric insulating layer $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$, *Ceramics International*, 2021, vol. 47, issue 15, pp. 21248-21252. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.04.129.
12. Goldman E.I., Chucheva G.V., Belorusov D.A. The role of a buffer layer at the contact with silicon in structures with an insulating gap made of a material replacing SiO_2, *Ceramics International*, 2024, vol. 50, issue 6, pp. 9678-9681. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.12.286.
13. Sze S.M., Ng K.K. *Physics of semiconductor devices*, 3rd edition. Hoboken, John Willey & Sons, 2007, 815 p.