

УДК 538.911

ПЕРЕНОС ТОНКИХ ПЛЁНОК КРЕМНИЯ С SiO_2 И HfO_2 НА С-САПФИР: ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОДЛОЖКИ НА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИОКСИДА ГАФНИЯ

© В. А. Антонов¹, В. П. Попов¹, С. М. Тарков¹, А. В. Мяконьких²,
А. А. Ломов², К. В. Руденко²

¹Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

²Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН,
117218, Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

E-mail: ava@isp.nsc.ru

Проведены структурные, электрофизические и оптические исследования подложек кремний-на-сапфире с нанослоями кремния и диоксида гафния в зависимости от толщины подложки. Показано, что наведённое в результате термообработок таких структур двухосное напряжение растяжения в промежуточном слое HfO_2 из-за большой разницы в коэффициентах теплового расширения между слоями кремния, сапфира и диоксида гафния стимулирует гистерезис тока в канале КНС-псевдо-МОП-транзистора. Выявлено, что уменьшение механического напряжения в диоксиде гафния приводит к увеличению коэрцитивного поля и сегнетоэлектрического переключения при слабых полях в нанослоях диоксида гафния.

Ключевые слова: водородный перенос, кремний-на-сапфире, диоксид гафния, межслойные механические напряжения, сегнетоэлектричество.

DOI: 10.15372/AUT20220602

Введение. В настоящее время стандарты связи 5G и активно развивающийся 6G требуют производства новых поколений микросхем субтерагерцовых приёмников и «цифрового радио» смартфонов. Для изготовления таких сверхвысокочастотных (СВЧ) интегральных схем применяются пластины кремний-на-изоляторе (КНИ) с подложками из высокоомного (HR — high-resistivity) кремния с ловушками заряда (TR — trap-rich) в поликристаллическом слое толщиной 2 мкм. Такие структуры HR-TR-КНИ эффективно применяются в современной полупроводниковой промышленности, поскольку совместимы с тепловым бюджетом промышленных КНИ-КМОП-структур и процессами кремниевой технологии [1]. Однако HR-TR-КНИ-структуры обладают рядом недостатков, среди которых сниженный теплоотвод и высокие паразитные ёмкости.

Этих недостатков лишены слои кремния нанометровой толщины на сапфировых диэлектрических пластинах (структуры кремний-на-сапфире (КНС)), которые могут использоваться в качестве подложек при производстве вышеуказанных СВЧ интегральных схем.

Благодаря диэлектрическим свойствам сапфировой подложки удаётся добиться снижения паразитных ёмкостей и повысить быстродействие элементов, практически исключить токи утечки интегральных схем и уменьшить энергопотребление. Отсутствие необходимости в дополнительной изоляции элементов друг от друга позволяет увеличить степень интеграции элементов.

Для формирования КНС-подложек с нанометровыми бездефектными слоями кремния был использован метод водородно-индуцированного переноса слоя Si при повышенных температурах [2]. Отжиг, необходимый для удаления постимплантационных водородных дефектов в приборном слое кремния, стимулирует диффузию приграничных ионов кислорода

из сапфира в кремний. Это приводит к образованию промежуточного слоя диоксида кремния и, как следствие, к возникновению кислородных вакансий в сапфире. Таким образом, на границе кремний — сапфир формируется большой положительный встроенный заряд и высокое отрицательное пороговое напряжение $V_{th,n}$, что обуславливает большие электронные токи в КНС-псевдо-МОП-транзисторе [3]. Даже при толщине сапфировой подложки 100 мкм и менее это напряжение превышает 10 кВ. Для компенсации такого эффекта встроенного заряда было предложено вводить на границу раздела кремний — сапфир барьерные слои, препятствующие диффузии ионов кислорода. Первоначально в качестве таких барьеров использовались слои SiO_2 толщиной 300 нм с поэтапным её уменьшением. Это помогало подавлять диффузию кислорода, но при этом наблюдалось смещение значений порогового напряжения в отрицательную область, и уже промежуточный слой SiO_2 50 нм создавал неприемлемо низкое значение $V_{th,n} < -6,0$ кВ [4]. Кроме того, наличие аморфного слоя SiO_2 резко ухудшает отвод тепла от приборного слоя Si. Поэтому было предложено вместо аморфного SiO_2 использовать тонкие поликристаллические слои высокотемпературного диоксида гафния в качестве барьера для диффузии кислорода. Также кристаллические оксиды гафния и алюминия являются перспективными диэлектрическими подложками, обеспечивающими высокие диэлектрическую проницаемость ($\epsilon \sim 11,5$ и 25 соответственно) и теплопроводность.

Полученные структуры с диоксидом гафния в качестве захороненного диэлектрика после технологических термообработок имели практически бездефектную границу раздела с сапфировой подложкой и обеспечивали $V_{th,n} > -0,5$ кВ [3].

Целью данного исследования была разработка метода подавления диффузии кислорода из сапфира и снижения положительного заряда с использованием слоя диоксида гафния. Этот промежуточный слой был сформирован путём плазменно-стимулированного атомно-слоевого осаждения (PEALD — plasma-enhanced atomic layer deposition) аналогично [4] на кремниевую донорную пластину до облучения водородом и последующего срачивания.

Эксперимент. Для формирования исследуемых КНС-структур применялся метод водородно-индуцированного переноса слоёв Si и HfO_2 на сапфировую подложку при повышенных температурах, как в [5], с использованием промежуточных слоёв диоксида кремния.

На подготовительном этапе пластины монокристаллического кремния (100) и C-сапфира диаметром 100 мм подвергались следующим технологическим операциям. На пластинах кремния выращивался слой PEALD HfO_2 толщиной 20 нм при температуре 250 °С. Затем эти пластины подвергались ионной имплантации H_2^+ при комнатной температуре мишени с флюенсом $3 \cdot 10^{16}$ см⁻² и энергией ионов 130 кэВ для создания жертвенного слоя, по которому в дальнейшем будет происходить водородное скалывание. Часть пластин сапфира была облучена ионами N^+ с энергией 50 кэВ и дозой 10^{16} см⁻² или обработана в азотной плазме с диэлектрическим барьерным разрядом (DBD — dielectric barrier discharge) со средней энергией ионов азота ~ 10 эВ. Такие обработки создавали в сапфире включения кислородных вакансий и нитрида алюминия, которые являлись центрами захвата носителей заряда [6], при этом край зоны проводимости AlN располагался вблизи дна аналогичной зоны кремния.

Затем следовал этап срачивания (бондинга) пластин рабочими сторонами при температуре 200 °С и отжиг соединённой пары при температуре 450 °С для осуществления процесса скалывания кремниевой пластины по водородсодержащему слою. Полученные таким образом КНС-структуры подвергались поэтапному отжигу при температурах 650–1100 °С.

Электрические свойства КНС-структур оценивались по стокзатворным вольт-амперным характеристикам (ВАХ) методом КНС-псевдо-МОП-транзистора [7]. При этом измеряемая структура располагалась подложкой на медном основании, выполнявшем

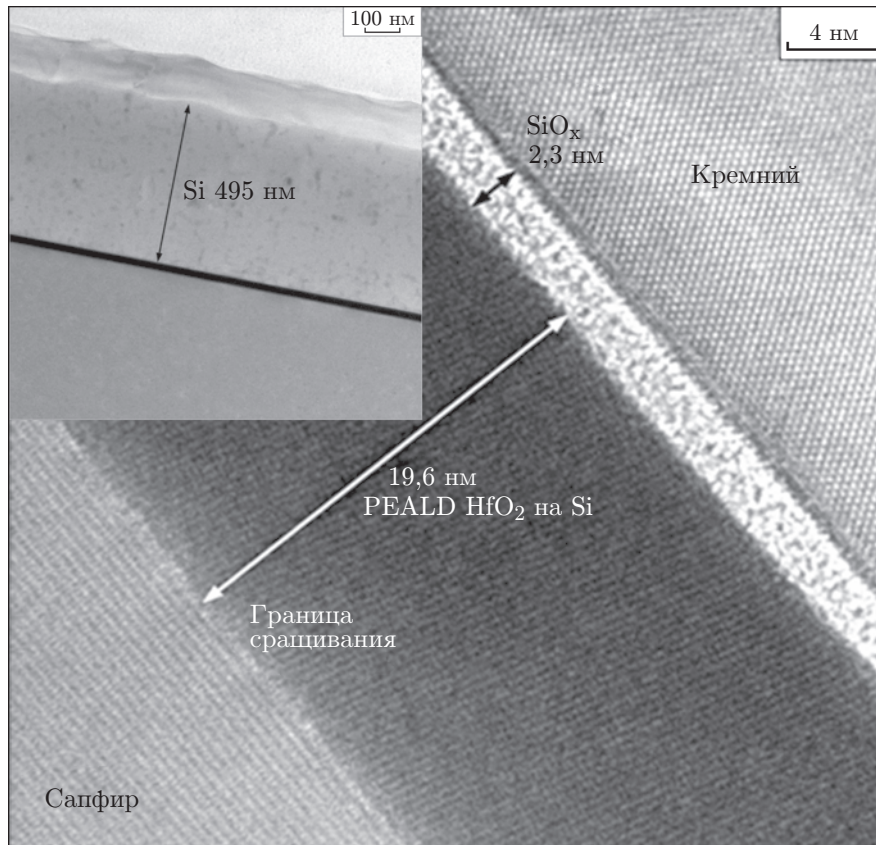


Рис. 1. Изображения поперечного сечения КНС-структуры со скрытым слоем HfO_2 толщиной 20 нм, полученные методом сканирующей электронной микроскопии высокого разрешения, в масштабе 4 и 100 нм

функцию электрического затвора, а вольфрамовые зонды с радиусом острия 20 мкм размещались на расстоянии 100 мкм друг от друга, прижимались к приборному слою кремния с силой 0,5 Н и играли роль истока и стока псевдо-МОП-транзистора.

Анализ полученных стокзатворных характеристик и расчёт электрофизических параметров осуществлялись методом Y -функций [7].

Результаты и обсуждение. Для выявления степени совершенства гетерограниц кремний — скрытый диэлектрик и скрытый диэлектрик — сапфировая подложка были изготовлены поперечные сечения образцов КНС методом ионно-лучевой резки. Первые измерения методом сканирующей электронной микроскопии высокого разрешения (HRTEM — high-resolution transmission electron microscopy) подтвердили наличие равномерных слоёв приборного кремния и скрытого диэлектрика, а также совершенство границ раздела в областях, длины которых на порядки больше, чем толщины этих слоёв (рис. 1).

Для изучения эволюции кристалличности плёнки диоксида гафния после отжига были проведены рентгеноструктурные исследования (рис. 2). Сравнивались свойства КНС-структур с промежуточным слоем оксида гафния толщиной 20 нм с имплантацией N^+ (НИ — nitrogen ion implantation) в сапфировые подложки и без имплантации N^+ (без НИ). На рентгенограммах всех образцов, термически обработанных при 450–1100 °С, наблюдается множество дифракционных пиков. На большинстве рентгенограмм слой Si был химически удалён, но если на структуре он присутствует, то для фазы кремния наблюдаются узкие пики. Качественный анализ пиков диоксида гафния свидетельствует о наличии кристаллитов в двух фазах: неполярной моноклинной фазе $\text{P}2_1/\text{c}$ и орторомбической полярной фазе $\text{Pca}2_1$.

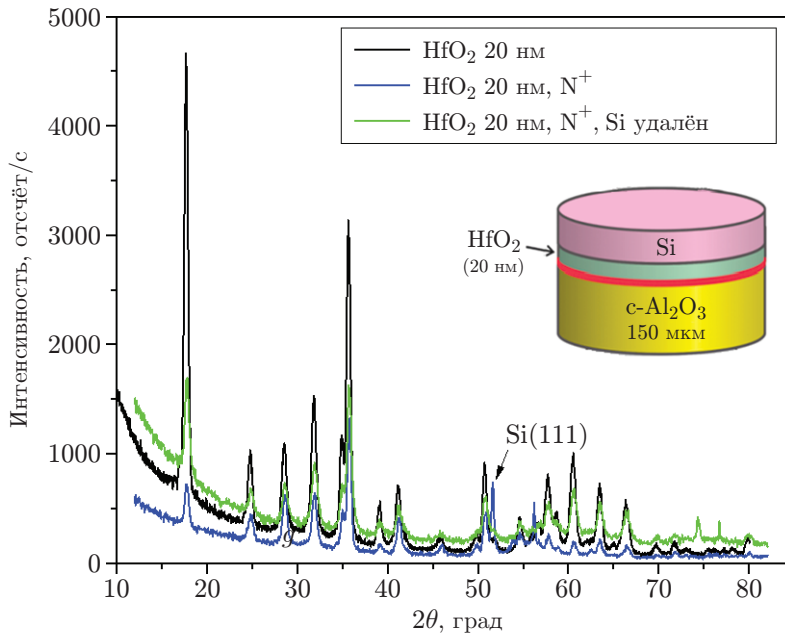


Рис. 2. Картина дифракции рентгеновских лучей при скользящем падении (GIXRD — grazing incidence X-ray diffraction) от образцов КНС со слоем оксида гафния толщиной 20 нм с НИИ или без неё. На вставке схема измеряемой КНС-структуры

Измерения КНС-псевдо-МОП-транзисторов в квазистатическом электрическом режиме проводились на вышеописанной установке при ступенчатой развёртке напряжения на затворе (до ± 5500 В) с шагом ± 50 В. КНС-структуры без промежуточного слоя SiO₂ или с тонким слоем оксида кремния толщиной 50 нм показывали режим обогащения из-за большого встроенного положительного заряда в сапфире. КНС-структура со слоем SiO₂ 310 нм давала начало режима обеднения, структуры с тонким слоем оксида кремния 50 нм с НИИ или с прослойкой диоксида гафния толщиной 20 нм демонстрировали приборные ВАХ с режимом полного обеднения.

Электрофизические параметры КНС-структур с толстым и тонким оксидом кремния [3, 5] и тонкой прослойкой диоксида гафния рассчитаны методом Y-функций [7] из стокзатворных ВАХ и представлены в таблице: значения подвижности носителей заряда μ , встроенного заряда Q_{ox} и плотности интерфейсных состояний D_{it} для электронов (e)/дырок (h) в слоях Si для различных КНС-структур.

Помимо этого, наблюдался эффект гистерезиса на зависимостях $I_{ds}-V_g$, снятых на структурах КНС с промежуточным слоем HfO₂ толщиной 20 нм. Этот гистерезис аналогичен переключению сегнетоэлектрических доменов в диоксиде гафния, но также может быть связан с перезарядкой центров, переполаризацией диполей на гетерограницах или образованием двойного электрического слоя (ДЭС) [8, 9]. Но при этом, например, в рабо-

Таблица

КНС-структура	$\mu_e/\mu_h, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$Q_{ox}, \text{см}^{-2}$	$D_{it,e}/D_{it,h}, \text{см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$
с толстым слоем SiO ₂ (310 нм)	250/50	$4,7 \cdot 10^{11}$	$6,3 \cdot 10^{11}/4,1 \cdot 10^{11}$
с тонким слоем SiO ₂ (50 нм) и НИИ (50 нм)	105/37	$2,1 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^{12}/3,8 \cdot 10^{11}$
с тонким слоем HfO ₂ (20 нм)	230/33	$1,2 \cdot 10^{12}$	$7,0 \cdot 10^{11}/2,4 \cdot 10^{12}$

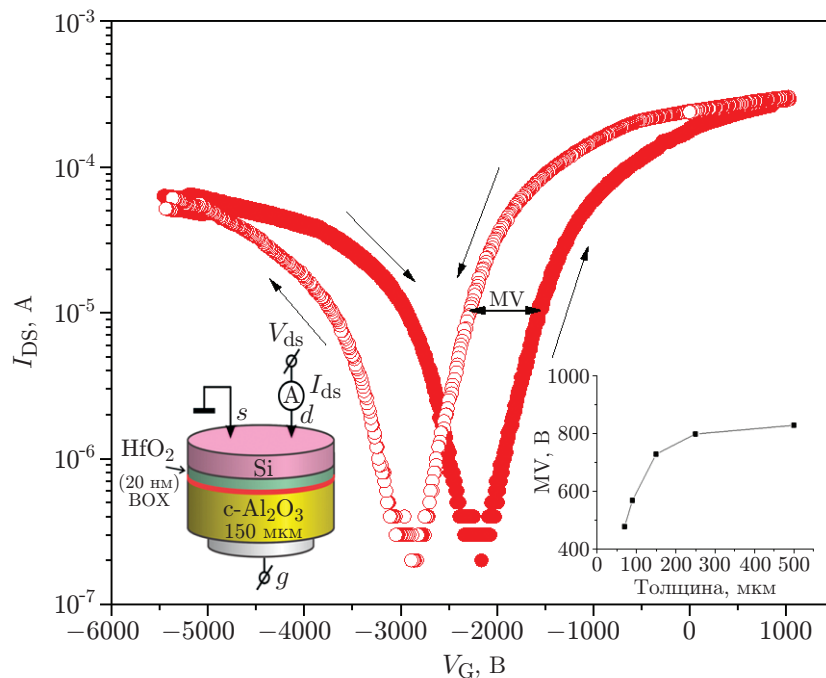


Рис. 3. Стокозатворные характеристики КНС-псевдо-МОП-транзистора с промежуточным слоем оксида гафния толщиной 20 нм без НИ. На вставках: слева — схема измерений КНС методом псевдо-МОП-транзистора, справа — зависимость ширины окна памяти от толщины сапфировой подложки

тах [10, 11] методами HRTEM и GIXRD обнаружено формирование кристаллических фаз с сегнетоэлектрическими свойствами в тонких плёнках HfO_2 . Плёнки оксида гафния кристаллизуются на свободной поверхности как смесь моноклинной и тетрагональной фаз. Отмечено, что образование моноклинной фазы подавляется, если кристаллизация происходит при механическом инкапсулировании плёнки оксида гафния слоем кремния и формируется орторомбическая фаза, проявляющая сегнетоэлектрические свойства.

Следует отметить, что в КНС-структурах, содержащих прослойку из диоксида гафния, диэлектрики с высоким значением k демонстрируют типичный гистерезис для сегнетоэлектрических транзисторов FEFET как функцию поляризации P электрического поля $E = V_g/d$, где d приблизительно равна толщине сапфира (рис. 3).

Только измеряя заряд Q как функцию приложенного электрического поля E , практически нельзя различить сегнетоэлектричество и поляризацию P из-за наличия области дрейфа ионов в окисле и, следовательно, формирования ДЭС. Поэтому важно получить дополнительные данные, однозначно характеризующие материал, используемый в качестве сегнетоэлектрика [12]. Например, такие различия можно установить, измерив диэлектрическую проницаемость ϵ . Температурная зависимость $\epsilon(T)$ в случае сегнетоэлектрика должна описываться законом Кюри — Вейса. Кроме того, в низкочастотном диапазоне не должно быть ярко выраженной зависимости ϵ от толщины сегнетоэлектрика, что фиксируется в ДЭС ионных проводников. Также сегнетоэлектрическое поведение КНС-МОП-транзистора может быть подтверждено методом измерения пьезоэлектрических откликов инкапсулированного слоя диоксида гафния.

На этом же высоковольтном стенде фиксировалась релаксация тока стока I_{ds} путём измерения тока 50 раз: по 1, 2 или 4 с на каждом этапе с изменением скорости развёртки от 3 до 300 В/с. Образец с толстым слоем SiO_2 показал, что ширина окна гистерезиса оста-

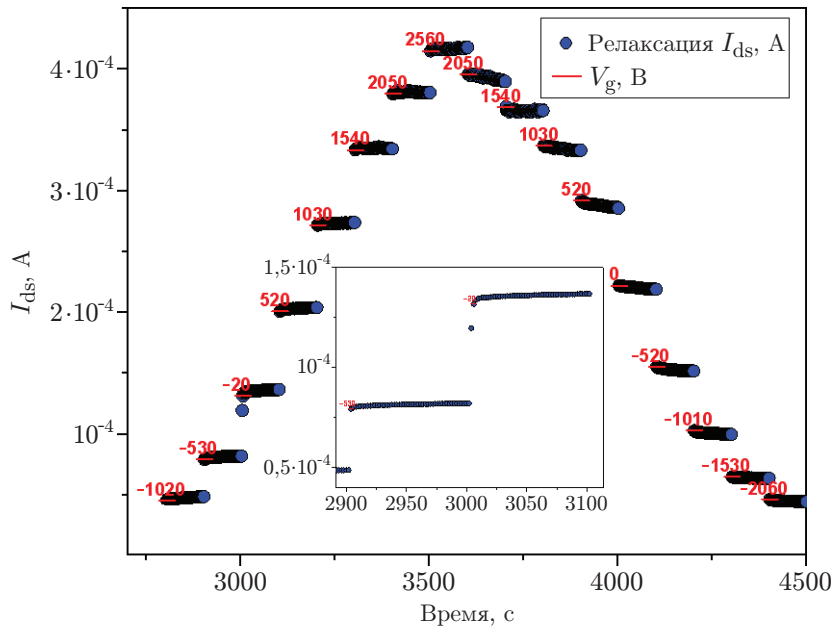


Рис. 4. Релаксационные характеристики электронного тока в КНС-псевдо-МОП-транзисторе с тонким слоем HfO_2 толщиной 20 нм на подложке толщиной 150 мкм. На вставке показано отсутствие релаксации тока при двух ступенях повышения (+500 В) развёртки напряжения

лась прежней при изменении скорости развёртки напряжения на затворе. При увеличении диапазона напряжения обнаружено изменение соотношения максимальных токов для медленной и быстрой развёрток, что, по-видимому, связано с наличием на границе раздела SiO_2 различного типа ловушек носителей заряда и дрейфом ионов в сильном поле [5].

Для электронов в КНС-структурах с промежуточным слоем HfO_2 релаксационные измерения показали медленный рост тока на ступенях прямой ветви, при условии положительного смещения и, следовательно, не за счёт протонов, а за счёт поляризации или прыжкового переноса электронов, захваченных объёмными ловушками диоксида гафния к границе раздела HfO_2 — Al_2O_3 (рис. 4).

Гораздо более резкое падение тока проявлялось на ступенях с уменьшением потенциала затвора за счёт деполяризации, а не захвата электронов ловушками на границе HfO_2 — Al_2O_3 . Это означает, что основной вклад в гистерезис для образца с промежуточным слоем HfO_2 вносит поляризация/деполяризация. Для дырочной проводимости в этой КНС-псевдо-МОП транзисторной структуре наблюдался постоянный ток на ступенях прямой ветви. Это свидетельствует об отсутствии дрейфа протонов с ловушек в объёме оксида гафния в сторону сапфировой подложки и смещения электронов, захваченных в HfO_2 , к границе раздела Si — HfO_2 , а также о слабом падении тока при уменьшении по модулю отрицательного потенциала затвора из-за деполяризации сегнетоэлектрических доменов в HfO_2 . Падение тока на ступенях при уменьшении потенциала на затворе может проявляться и за счёт захвата электронов, вылетевших из ловушек на границе раздела HfO_2 — Al_2O_3 в объём HfO_2 , но для этого нужно предположить дрейф электронов против поля [13].

Дополнительно были получены спектры комбинационного рассеяния, снятые в направлении луча УФ-лазера вдоль поверхности слоя Si по оси [110] для структур КНИ (серый спектр) и КНС (чёрный спектр), содержащие технологически аналогичные промежуточные слои HfO_2 после отжига при 1100°C (рис. 5). Пик от кремния в структуре КНС сдвинут на $3,1 \text{ см}^{-1}$ вправо относительно аналогичного пика от кремния в структуре КНИ,

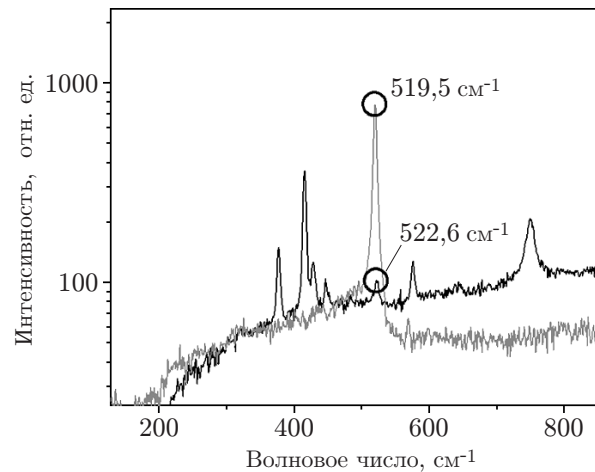


Рис. 5. Спектры комбинационного рассеяния, снятые в направлении луча УФ-лазера вдоль поверхности слоя Si по оси [110] для структур КНИ (серый спектр) и КНС (чёрный спектр) после отжига при 1100 °С

что свидетельствует о наличии сильных сжимающих двухосных напряжений в кремнии. Они связаны с тем, что коэффициент температурного расширения (КТР) сапфира более чем в 2 раза превышает КТР кремния, и после скалывания при повышенной температуре и остывания КНС-структура остаётся механически напряжённой.

Известно, что в кристаллах типа алмаза при двухосных механических напряжениях трижды вырожденный в центре зоны Бриллюэна оптический фонон расщепляется на синглет и дублет [14]. Оценки, аналогичные приведённым в указанной работе, позволили установить, что в спектрах на рис. 5 наблюдаются пики, обусловленные рассеянием света на дублетных фононах в слое кремния, который сжат до значений давления около 0,9 ГПа. В диоксиде гафния, КТР которого в 2 раза больше, чем у сапфира, остаются механические биаксиальные напряжения растяжения, что, по-видимому, обеспечивает благоприятные условия для формирования орторомбической фазы в диоксиде гафния, инкапсулированном в структуре КНС, и переключения проводимости в канале псевдо-МОП-транзистора при слабом для диоксида гафния электрическом поле ($E < 10^5$ В/см) [15, 16].

Было предположено, что механическое напряжение в КНС-структуре может быть частично снято путём ослабления влияния сапфировой подложки при уменьшении её толщины механической шлифовкой (полировкой). Изготовлена серия образцов с различной толщиной сапфировой подложки, полученных из КНС-пластины с промежуточным слоем диоксида гафния толщиной 20 нм. Была установлена зависимость ширины окна гистерезиса (MW — memory window), измеренная в одинаковых электрофизических условиях на стокзатворных кривых $I_{ds}-V_g$ от толщины подложки. На графике (см. рис. 3, вставка) видно нелинейное быстрое падение значения ширины окна гистерезиса при уменьшении толщины сапфировой подложки. Такое поведение ВАХ КНС-псевдо-МОП-транзистора дополнительно свидетельствует о влиянии механических напряжений на структуру диоксида гафния и доминировании сегнетоэлектрического эффекта, поскольку эффекты, связанные с границами раздела HfO_2-Si и $HfO_2-Al_2O_3$ оставались в неизменных условиях. Можно предположить, что основной причиной уменьшения окна памяти с уменьшением толщины сапфира является увеличение коэрцитивного поля. Это уменьшение толщины снижает величину биаксиального напряжения сжатия кремния. Соответственно уменьшение двухосного механического напряжения растяжения в оксиде гафния приводит к увеличению коэрцитивного поля с уменьшением толщины сапфира, необходимого для переключения поляризации сегнетоэлектрических подзатворных слоёв КНС-псевдо-МОП-транзисторов.

Заключение. Физической причиной гистерезисного переключения тока в канале КНС-псевдо-МОП-транзистора с прослойками из диоксида гафния является двухосное напряжение растяжения в промежуточном слое HfO_2 из-за большой разницы в коэффициентах теплового расширения между кремнием, сапфиром и диоксидом гафния, наведённое в результате высокотемпературных термообработок. Механические напряжения растяжения стимулируют сегнетоэлектрическое переключение при слабых полях в нанослоях диоксида гафния. Требуется проведение дополнительных измерений для того, чтобы подтвердить основной вклад орторомбической фазы HfO_2 в сегнетоэлектрическое поведение КНС-псевдо-МОП-транзистора, например, методом измерения пьезоэлектрических откликов инкапсулированного слоя диоксида гафния и/или зависимости $\sigma(T)$, для которой должен выполняться закон Кюри — Вейса.

Благодарности. Авторы благодарят А. В. Шереметьева, Н. В. Дудченко, Э. Д. Жанаева (ИФП СО РАН) за помощь в изготовлении КНС-структур.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-29-01063), а также частично Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 0242-2021-0003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Scheen G., Tuyaertsa R., Rack M. et al.** Post-process porous silicon for 5G applications // *Solid State Electronics*. 2020. **168**. 107719. DOI: 10.1016/j.sse.2019.107719.
2. **Пат. № 2538352 РФ.** Способ изготовления структуры кремний-на-сапфире /В. П. Попов, Э. Д. Жанаев, Н. В. Дудченко, В. А. Антонов, А. И. Попов. Опубл. 10.01.2015, Бюл. № 1.
3. **Попов В. П., Антонов В. А., Вдовин В. И.** Положительный заряд в КНС-гетероструктурах с межслойным оксидом кремния // *Физика и техника полупроводников*. 2018. **52**, № 10. С. 1220–1227. DOI: 10.21883/FTP.2018.10.46465.8844.
4. **Сидоров Г. Ю., Горшков Д. В., Сидоров Ю. Г. и др.** Влияние обработки поверхности на плотность заряда на границе раздела эпитаксиальных плёнок GdHgTe и Al_2O_3 , выращенного методом атомно-слоевого осаждения // *Автоматрия*. 2020. **56**, № 5. С. 52–57.
5. **Antonov V., Tarkov S., Popov V.** Current hysteresis in SOS heterostructures with interlayer silicon oxide // *Proc. of the Joint Int. EUROSIOI Workshop and Int. Conf. on Ultimate Integration on Silicon (EUROSIOI-ULIS 2020)*. Caen, France, 01-30 Sept., 2020. DOI: 10.1109/EUROSIOI-ULIS49407.2020.9365505.
6. **Zhao S., Tian F., Xu H. et al.** Experimental extraction and simulation of charge trapping during endurance of FeFET with $\text{TiN}/\text{HfZrO}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (MFIS) gate structure // *arXiv:2106.15939*. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2106.15939.
7. **Cristoloveanu S., Ionica I., Diab A., Liu F.** The pseudo-MOSFET: Principles and recent trends // *ECS Transactions*. 2012. **50**, N 5. P. 249–258. DOI: 10.1149/05005.0249ecst.
8. **Miyata N.** Low temperature preparation of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ stack structure for interface dipole modulation // *Appl. Phys. Lett.* 2018. **113**, N 25. 251601. DOI: 10.1063/1.5057398.
9. **He Y., Nie S., Liu R. et al.** Indium–Gallium–Zinc–Oxide Schottky synaptic transistors for silent synapse conversion emulation // *IEEE Electron Device Lett.* 2019. **40**. P. 139–142. DOI: 10.1109/LED.2018.2883442.
10. **Popov V. P., Antonov V. A., Gutakovskiy A. K. et al.** Hafnia and alumina stacks as UTBOXs in silicon-on insulator structures // *Sol. State Electron.* 2020. **168**. 107734. DOI: 10.1016/j.sse.2019.107734.
11. **Böscke T. S., Müller J., Bräuhäus D. et al.** Ferroelectricity in hafnium oxide thin films // *Appl. Phys. Lett.* 2011. **99**, Iss. 10. P. 102903. DOI: 10.1063/1.3634052.

12. **Cliem H., Martin B.** Pseudo-ferroelectric properties by space charge polarization // Journ. Phys.: Condensed Matter. 2008. **20**. 321001. DOI: 10.1088/0953-8984/20/32/321001.
13. **Alam Md. N. K., Kaczer B., Ragnarsson L.-Å. et al.** On the characterization and separation of trapping and ferroelectric behavior in HfZrO FET // IEEE Journ. Electron Devices Soc. 2019. **7**. P. 855–862. DOI: 10.1109/JEDS.2019.2902953.
14. **Volodin V. A., Sachkov V. A.** Anisotropy of optical phonons in biaxially stressed zinc-blende- and diamond-type semiconductors and alloys // Phys. B: Condensed Matter. 2021. **614**. 413008. DOI: 10.1016/j.physb.2021.413008.
15. **Kruv A., McMitchell S. R. C., Clima S. et al.** Impact of mechanical strain on wakeup of HfO₂ ferroelectric memory // Proc. of the IEEE Int. Reliability Physics Symposium (IRPS), IEEE Xplore. Monterey, USA, 21-25 March, 2021. DOI: 10.1109/IRPS46558.2021.9405159.
16. **Liu Y., Clima S., Hiblot G. et al.** Investigation of the impact of externally applied out-of-plane stress on ferroelectric FET // IEEE Electron Device Lett. 2021. **42**, N 2. P. 264–267. DOI: 10.1109/LED.2020.3049093.

Поступила в редакцию 23.09.2022

После доработки 14.10.2022

Принята к публикации 21.10.2022
