

06

Применение сканирующей емкостной силовой микроскопии для выявления примесных фаз в сегнетоэлектрике триглицинсульфат

© Р.В. Гайнутдинов,¹ А.Л. Толстихина,¹ А.К. Лашкова,¹ Н.В. Белугина,¹ В.Н. Шут,² С.Е. Мозжаров,² И.Ф. Кашевич^{2,3}

¹ Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН, 119333 Москва, Россия

² Институт технической акустики НАН Беларуси, 210027 Витебск, Беларусь

³ Витебский государственный университет им. П.М. Машерова, 210032 Витебск, Беларусь
e-mail: alla@ns.crys.ras.ru

Поступило в Редакцию 28 марта 2019 г.

В окончательной редакции 28 марта 2019 г.

Принято к публикации 15 апреля 2019 г.

Представлены результаты исследования неоднородного сегнетоэлектрика — монокристалла триглицинсульфата с ростовой периодической примесной структурой TGS–TGS+Cr методом сканирующей емкостной силовой микроскопии (СЕСМ). Рассмотрены особенности отображения вариаций емкости при детектировании электростатической силы на удвоенной и утроенной резонансной частоте. Проведены измерения пьезоотклика, поверхностного потенциала и топографии поверхности. Показано, что емкостной контраст формируется как на доменных границах, так и на полосах TGS и TGS+Cr. Продемонстрировано, что СЕСМ на удвоенной резонансной частоте электростатической силы позволяет наблюдать пространственное распределение примеси в сегнетоэлектрической структуре при разнице в концентрации хрома на уровне ~ 0.02 – 0.08 mass.%.

Ключевые слова: сканирующая емкостная микроскопия, сегнетоэлектрики, кристалл триглицинсульфата, примесь хрома.

DOI: 10.21883/JTF.2019.11.48330.119-19

Введение

Сканирующая емкостная силовая микроскопия (СЕСМ) — одна из электрических модификаций атомно-силовой микроскопии (АСМ), которая является косвенным методом измерения пространственных вариаций электрической емкости системы зонд–образец. Она позволяет получать емкостные изображения поверхности проводящих и диэлектрических образцов в нанометровом масштабе и извлекать информацию о скрытых структурах и неоднородностях в этих материалах [1,2]. СЕСМ, следуя классическому макроскопическому способу определять степень легирования полупроводников на основе зависимости электрической емкости от напряжения $C(U)$, стала методом контроля двумерного распределения легирующей примеси в устройствах микроэлектроники [3–5]. В полупроводниковой индустрии этот метод нашел применение для анализа работы и отказов устройств, визуализации эффектов ионной имплантации [6] и характеристики локальных электрических параметров эпитаксиальных полупроводниковых гетероструктур [7]. Применительно к диэлектрикам круг задач для СЕСМ можно очертить как связанный с количественными измерениями толщины и статической диэлектрической проницаемости на наноразмере. С помощью емкостных измерений

оценивают вариации толщины очень тонких оксидных пленок с высокой диэлектрической проницаемостью для использования последних в качестве подзатворного диэлектрика в МОП-структурах [8–12]. Отдельными группами ученых в последнее время ведутся работы по определению величин диэлектрической проницаемости различных нанообъектов, в том числе диэлектрических пленок, наночастиц оксидов Si и Al, биологических мембран и вирусов [13–19]. В основу развиваемого метода положено одновременное измерение расстояний и емкости в системе зонд–образец с аттофарадным разрешением с помощью емкостного датчика, построение аналитической модели системы и сопоставление экспериментальных данных с результатами численного моделирования. Очевидно, что точность получаемой при этом информации критически зависит от адекватности моделей, которые используются при интерпретации данных, и емкостного разрешения современных микроскопов.

К сегнетоэлектрикам, насколько можно судить по ограниченному количеству публикаций, метод СЕСМ пока применялся редко, и потенциал его в данном плане еще не раскрыт. Наблюдаемый контраст емкостных изображений в литературе интерпретируется по-разному. Так, авторы [20], исследовавшие PZT-пленки, приписали его вариациям диэлектрической проницаемости. Напротив, обнаруженную в [21,22] на емкостных изображениях

тонких пленок $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ смену контраста со светлого на темный авторы связали с переменной знака полярности 180° — доменов. Хотя природа наблюдаемого контраста до конца авторами не была установлена (был еще и промежуточный серый контраст), полученный результат свидетельствует о возможности визуализации сегнетоэлектрических доменных структур СЕСМ.

Различают две вариации метода, реализованного на базе атомно-силового микроскопа, — контактная и бесконтактная (динамическая) СЕСМ. На данном этапе для анализа полупроводников и диэлектриков наиболее разработан контактный метод, в котором емкость в системе регистрируется с помощью электрических измерительных цепей, а малые изменения емкости в системе фиксируются, например, с помощью резонансного емкостного СВЧ-датчика [23]. Бесконтактная СЕСМ по своей сути является производной от электростатической силовой микроскопии [24]. По электромеханическому отклику кантилевера определяется модулированная электростатическая сила, генерированная переменным полем, и связанная с ней емкость и градиент емкости в системе зонд—образец [25–27]. Основная трудность применения СЕСМ связана с отсутствием возможности проведения количественных измерений емкости с аттофарадным разрешением во многих коммерческих микроскопах. Тем не менее существует круг задач, для которых она могла бы быть успешно использована, например, для визуализации пространственного распределения примеси в полупроводниковых и диэлектрических материалах. В [25–27] была продемонстрирована высокая чувствительность бесконтактного метода для тестовых полупроводниковых образцов при проведении измерений в воздушной среде. СЕСМ показала 10%-ную погрешность визуализации распределения примеси в интервале $10^{15}–10^{20} \text{ cm}^{-3}$ для Si *n* типа, легированного бором [27]. По чувствительности к степени легирования данный метод отвечает основным требованиям при характеристике современных устройств микроэлектроники (дает точность не хуже порядка величины в диапазоне концентраций примесей $10^{16}–10^{20} \text{ cm}^{-3}$ [28]).

Возможными кандидатами в круг объектов СЕСМ могут также стать неоднородные сегнетоэлектрики. Для эффективного управления характеристиками сегнетоэлектрика крайне актуальны получение и изучение свойств легированных примесью кристаллов. Искусственное создание дефектных зон, распределенных в объеме кристалла по определенному закону благодаря внедрению специальных примесей, качественно изменяет свойства и характер доменной структуры и во многих случаях приводит к формированию регулярной доменной структуры в процессе роста кристалла [29]. Для решения указанных задач требуется развитие комбинированных методов исследования доменной структуры и распределения примеси в кристалле на основе АСМ.

Целью настоящей работы было изучение потенциальных возможностей бесконтактной СЕСМ в исследовании

неоднородных сегнетоэлектриков на примере полосчатых монокристаллов триглицинульфата с ростовой периодической примесной структурой TGS–TGS+Cr. В работе обсуждаются методические аспекты визуализации пространственного распределения легирующей примеси, особенности получения емкостных изображений высокого разрешения при использовании второй и третьей гармоник детектируемого сигнала, интерпретации природы наблюдаемого контраста и оценки чувствительности метода к количеству введенной примеси хрома. Для извлечения дополнительной информации измерялись поверхностный потенциал, пьезоэлектрический отклик и топографический рельеф поверхности, а также вольт-амперные характеристики.

Методика эксперимента

Кристаллы были выращены скоростным методом при постоянной температуре роста 31.4°C (температура Кюри TGS — 49.15°C), пересыщение чистого раствора было 0.1°C , раствора с примесью — 0.5°C . Периодическое изменение состава достигалось путем роста затравки попеременно в растворах разного состава — в номинально чистом и содержащем легирующую примесь ионов хрома Cr^{3+} [29]. Были изучены два типа полосчатых кристаллов с разным содержанием примеси: первый был выращен при концентрации хрома в растворе 5 mass.%, второй — при 1.6 mass.%. Из пирамиды роста грани *m* кристаллов вырезали бруски с большой осью, параллельной сегнетоэлектрической оси, которые затем раскалывали на образцы толщиной 1.5–2 mm. Эксперименты по подготовке и исследованию поверхности образцов проводились в контролируемых условиях измерительного комплекса „TRACKPORE ROOM-05“, класс чистоты 5 ИСО(100) с поддержанием относительной влажности $35 \pm 1\%$ и температуры $24 \pm 0.05^\circ\text{C}$. Образцы изучали на сканирующем зондовом микроскопе NTEGRA Prima (НТ-МДТ) по стандартным методикам электрической АСМ с использованием кремниевых кантилеверов (НА_NC/Pt, балка В, Tipsnano, Эстония), покрытых Pt, со следующими характеристиками: резонансная частота 140 kHz, жесткость 3.5 N/m, радиус закругления острия < 30 nm.

Для измерения поверхностной емкости применялась двухпроходная бесконтактная методика, в которой при первом проходе в процессе сканирования регистрируется рельеф, а при повторном, проводимом на постоянном расстоянии кантилевера от поверхности при поданном переменном напряжении $U = U_{dc} + U_{ac} \cdot \sin(\omega t)$, измеряется амплитуда колебаний кантилевера на второй гармонике (2ω) [27]. Электростатическая сила, с которой зонд взаимодействует с поверхностью, $F = -1/2U^2 \cdot dC/dZ$, где *C* — емкость, *Z* — расстояние от кончика зонда до данной точки поверхности по вертикали, измеренное в процессе первого прохода [24]. Вторая гармоника емкост-

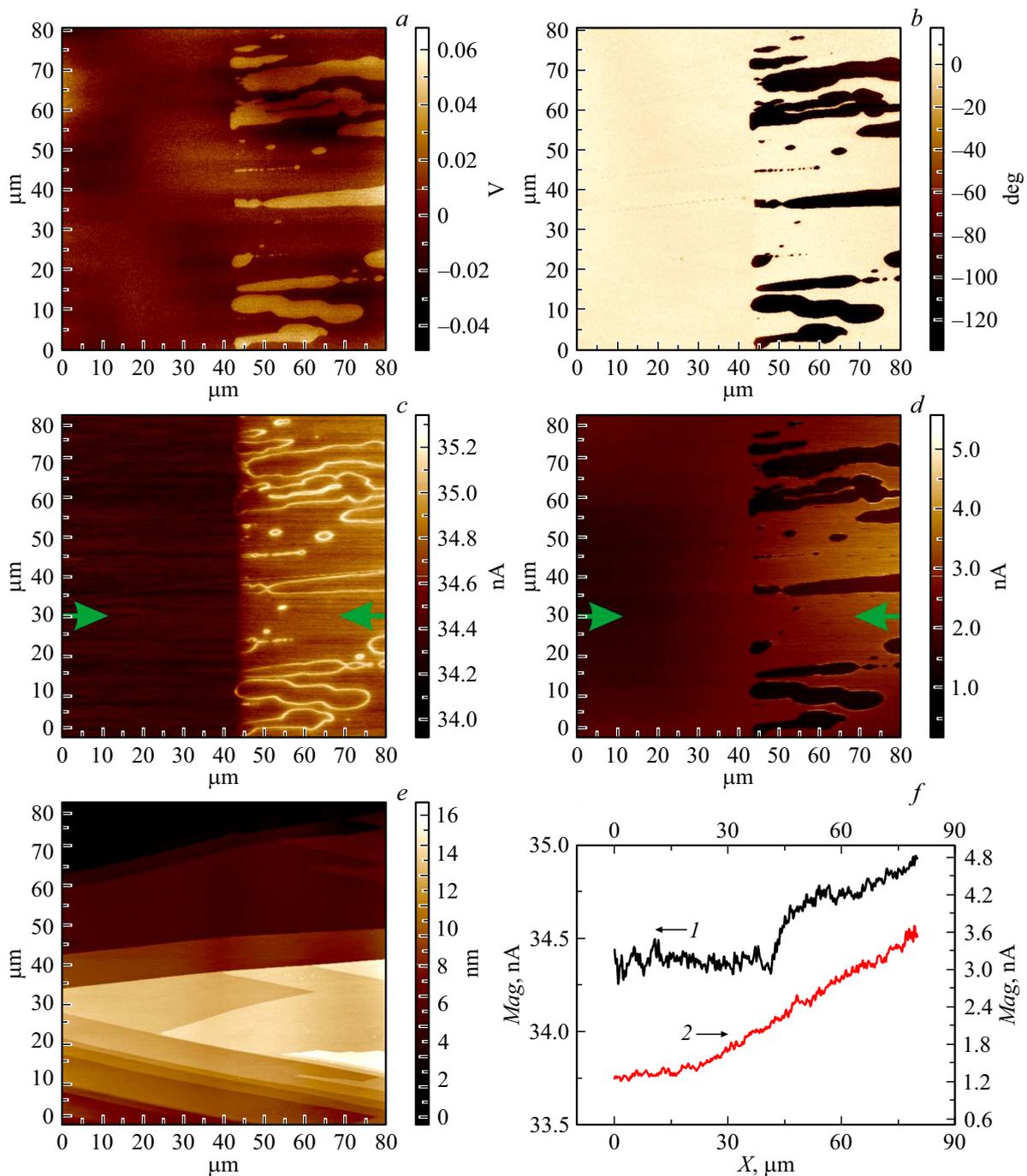


Рис. 1. Изображение одного и того же участка полярной поверхности кристалла TGS–TGS+Cr (1) с границей между полосами TGS и TGS+Cr: поверхностный потенциал (a), пьезотклик (b), емкость (dC/dZ) (c), дифференциальная емкость (dC/dU) (d), топография (e). Профили сечения dC/dZ (1) и dC/dU (2) (f).

ной силы $F_{2\omega} = -1/4 \cdot dC/dZ \cdot U_{ac}^2 \cdot \cos(2\omega t)$, амплитуда колебания кантилевера $A_{2\omega} \sim U_{ac}^2/4 \cdot dC/dZ$. Полученное при этом в процессе сканирования изображение отображает распределение поверхностной емкости. Индуцируемая электростатическая сила F содержит также 3ω -компоненту $F_{3\omega} = 1/8 \cdot d^2C(U_{dc,z})/dZdU \times U_{ac}^3 \cdot \cos(3\omega t)$ [25]. Пропорциональность периодической компоненты на третьей гармонике (3ω) величине

$d^2C/dZdU$ позволяет получать информацию о распределении дифференциальной емкости dC/dU , измеряемой при модулировании расстояния зонд — образец [25,26]. В наших экспериментах измерения емкостной силы на второй гармонике (2ω) проводились при приложении переменного электрического поля с амплитудой 3–4 V и частотой 70 kHz и $U_{dc} = 0$, а на третьей гармонике (3ω) — частотой 46.7 kHz.

Методом сканирующей микроскопии Кельвина (СМК), также двухпроходным, регистрировали распределение поверхностного потенциала на основе компенсационного принципа (постоянная компонента поданного напряжения U_{dc} подбиралась таким образом, чтобы колебания кантилевера на частоте ω переменной компоненты напряжения отсутствовали). Измерения проводились при частоте 140 Hz, $U_{ac} = 3$ V.

Доменную структуру изучали в контактном режиме микроскопии пьезоэлектрического отклика (МПО) путем измерения сигнала электромеханического отклика (к проводящему зонду прикладывалось переменное электрическое поле с амплитудой 1 V и частотой 735 kHz).

Локальные ВАХ измеряли с помощью петаомметра B2987A на зондовой станции „Cascade Microtech Tesla“. Площадь контактной площадки зонда составляла $1 \mu\text{m}^2$.

Результаты и их обсуждение

Методами МПО, СМК и СЕСМ были получены контрастные изображения (размером $80 \times 80 \mu\text{m}$) одного и того же участка полярной поверхности кристалла 1 с границей между полосами: чистой (TGS) и примесной (TGS+Cr). На МПО-изображении (рис. 1, b) разница в контрасте (светлый, темный) обусловлена только переменной знака полярности 180° доменов. Местоположение примесной полосы предположительно можно определить по наличию мелкодисперсных доменов противоположного знака, выстроившихся вдоль линии границы и в самой полосе. Отчетливо различимы те же домены и на изображении поверхностного потенциала (рис. 1, a), на основе которого определяется знак доменов. В нашем эксперименте светлый контраст на СМК-изображении соответствует доменам положительного знака. Как хорошо видно, на емкостном изображении (dC/dZ) (рис. 1, c) снова повторяются те же детали, что служит прямым доказательством существования емкостного контраста, связанного с присутствием доменов. В данном случае наблюдаются три варианта контраста: светлый, соответствующий доменным границам, темный — полосе чистого TGS, и еще один промежуточный серый — полосе с примесью хрома. Серый контраст в нашем случае связан с присутствием примеси — в этом отношении метод СЕСМ оказывается более информативным, чем методы МПО и двухпроходный СМК (рис. 1, b, a), не обладающие чувствительностью к примесному составу TGS и при отсутствии характерной мелкодисперсной доменной структуры не способные визуализировать примесную полосу. В принципе СМК должна чутко реагировать на состав образца, однако в нашем эксперименте сказывается работа на воздухе — вклад в измеряемый потенциал поверхностных состояний превалирует над составляющей, вносимой наличием примеси. В этой связи следует упомянуть результаты [30], согласно которым однопроходная СМК может применяться для композиционной визуализации многокомпонентных полимерных систем,

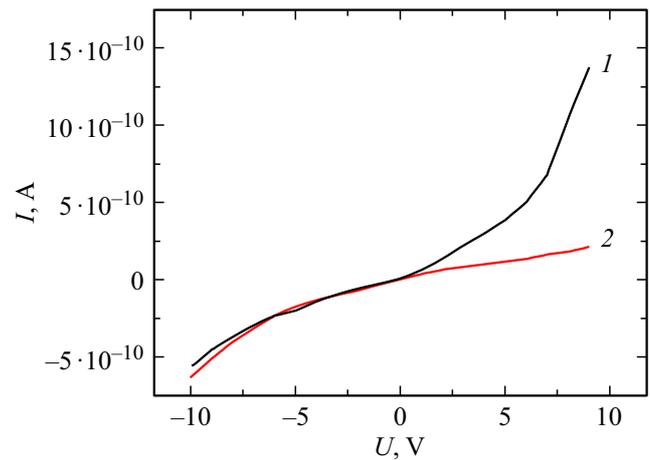


Рис. 2. ВАХ кристалла TGS–TGS+Cr (1): 1 — для полосы TGS+Cr, 2 — TGS. Источник тока подключен к платформе зондовой станции.

а наблюдающийся контраст градиента емкости dC/dZ коррелирует с изменениями диэлектрической проницаемости. Однако в нашей работе и в [30] исследуются принципиально разные объекты.

Согласно данным рентгенофлуоресцентного анализа (данные получены Б.С. Рошиным), оценочная концентрация хрома в полосе TGS+Cr кристалла 1 составила 0.12–0.14 mass.%, в полосе TGS 0.04–0.06 mass.%. Разница в концентрации хрома в „чистых“ и примесных полосах составила ~ 0.08 mass.%, что дало ощутимое различие в сигнале, формирующем емкостное изображение полос.

На рис. 1, f показан профиль сечения емкостного изображения dC/dZ вдоль оси абсцисс, на котором отображается ступень, соответствующая примесной полосе. При данных условиях измерения (рис. 1, c) разница в абсолютной величине емкостного сигнала между чистой полосой (темной) и примесной (серой) составляет $\sim 1.5\%$. На рис. 1, e в нижней части изображения показан характерный рельеф поверхности с мелкими остроугольными ступенями скола. Место, где были проведены профили сечения (рис. 1, f), достаточно гладкое (размах высот 1.2 nm). Следует отметить, что на емкостном изображении (рис. 1, c) отсутствуют следы ступеней скола, что говорит о возможности снижения вклада артефактов топографической природы — обычных спутников емкостных изображений, при правильном подборе режимов сканирования (например, при уменьшении скорости сканирования).

На рис. 1, d представлено емкостное изображение, полученное на третьей гармонике (3ω) детектируемого сигнала и содержащее информацию об изменении дифференциальной емкости (dC/dU). На этом изображении контраст также формируется и на доменах, и на примесной полосе, хотя он менее отчетливый в последнем случае. Профиль дифференциальной емкости (кривая 2, рис. 1, f) дает дополнительную информацию о характере

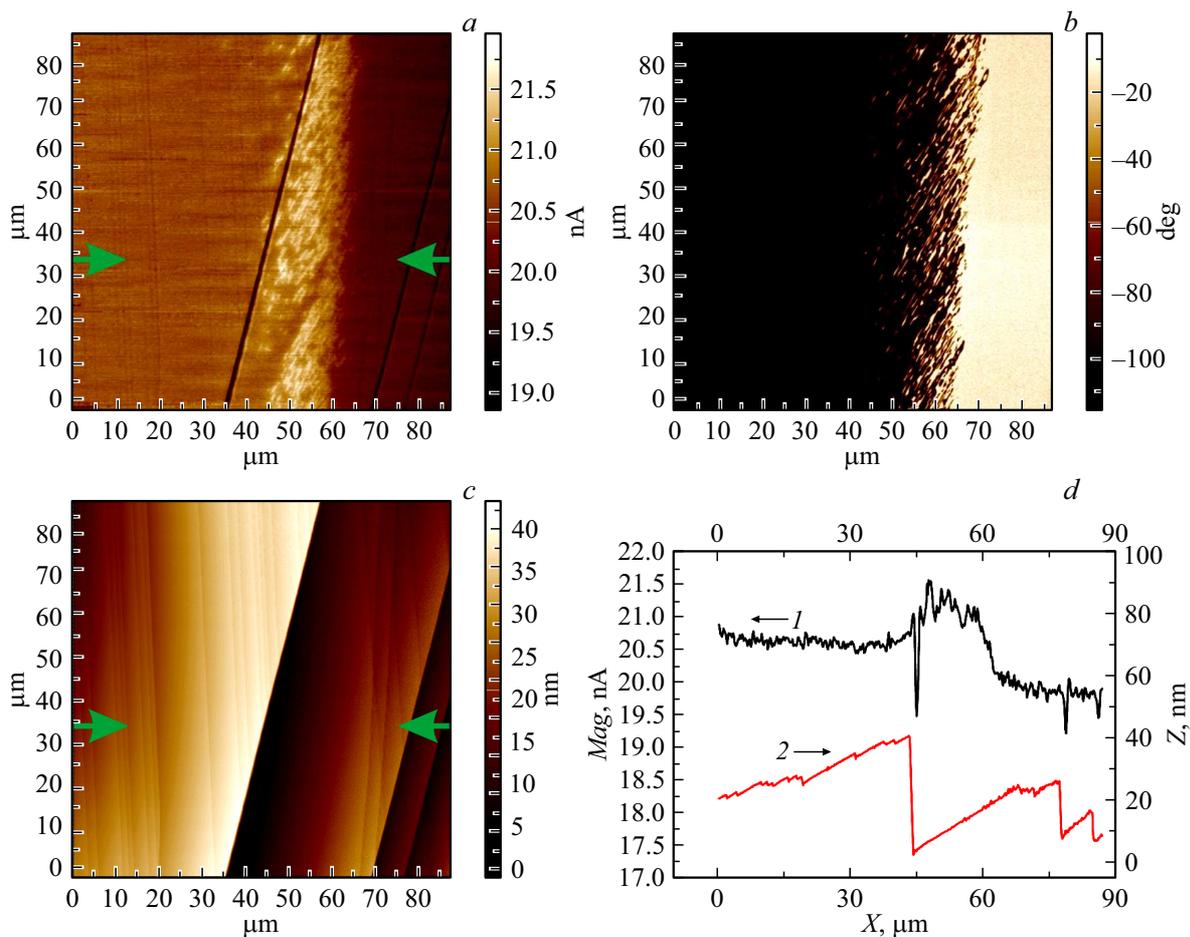


Рис. 3. Изображение одного и того же участка полярной поверхности кристалла TGS–TGS+Cr (2) с границей между полосами TGS и TGS+Cr: емкость (dC/dZ) (a), пьезоотклик (b), топография (c). Профили сечения dC/dZ (1), рельеф поверхности (2) (d).

распределения примеси. Стрелки на изображениях на рис. 1, c, d указывают на местоположение соответствующих профилей сечения. На профиле dC/dU ступень на расстоянии по оси абсцисс от начала координат до $20\ \mu\text{m}$ выражена слабее, но после $30\ \mu\text{m}$ на кривой изменяется наклон. Предположительно такой ход кривой dC/dU свидетельствует об увеличении концентрации носителей в примесной полосе. То есть контраст на примесной полосе обусловлен не только разницей в концентрации примеси хрома, но и тем, что она электрически заряжена и неоднородно распределена. По поводу визуализации доменных границ следует отметить, что на рис. 1, c они видны, а на рис. 1, d нет: контраст формируется на самих доменах.

Представлялось интересным оценить разницу проводимости чистых и примесных полос кристалла TGS–TGS+Cr другим зондовым методом. Сравнительное исследование проводимости чистых и примесных полос кристалла 1 на зондовой станции (рис. 2) демонстрирует в 1.5–3 раза большую величину тока на омических интервалах ВАХ на примесных участках поверхности (кривая 1) по сравнению с чистыми (кри-

вая 2). В нашем случае наиболее естественно рост проводимости в примесных слоях с Cr^{3+} объяснить за счет сквозной электронной проводимости и повышенной плотности доменных стенок. Это небольшое различие в электронной проводимости полос способно привести к изменению амплитуды сигнала, пропорционального емкости зонд–образец, и соответственно быть причиной формирования емкостного контраста в диэлектрике. С другой стороны, диэлектрическая проницаемость в примесных областях поверхности падает примерно в 4–6 раз по сравнению с чистыми участками [31]. Таким образом, наблюдаемый емкостной контраст коррелирует с изменениями диэлектрической проницаемости и проводимости, что говорит о его сложной природе.

Нами была сделана попытка оценить предельную концентрацию хрома, при которой еще наблюдается емкостной контраст на примесных полосах. Для этого был изучен другой кристалл 2, выращенный при меньшем в 3–4 раза содержании хрома. На рис. 3 приведено изображение одного и того же участка полярной поверхности кристалла 2 с границей между полосами, полученное методами СЕСМ (dC/dZ), МПО и АСМ. За счет простран-

ственного изменения емкости на изображении (рис. 3, *a*) также обнаруживается примесная полоса с промежуточным серым контрастом. На рис. 3, *d* показан профиль сечения емкостного изображения dC/dZ , на котором отображается ступень, соответствующая примесной полосе. При данных условиях измерения (рис. 3, *a*) разница в абсолютной величине сигнала между чистой полосой (темной) и примесной (серой) составляет $\sim 3.5\%$; ее можно связать с различием в концентрации примеси соответствующих слоев. Хотя на МПО-изображении можно видеть, что граница между полосами является также границей между двумя монодоменными участками разного знака (рис. 3, *b*). Если бы емкостной контраст определялся бы наличием доменов, он существовал бы только на границе, а не на поверхности всей полосы. В области границы вдоль нее видны скопления мелкодисперсных доменов. Скол в данном случае не был идеальным (разница высот ступеней составляет около 35 nm) — рельеф поверхности скола представлен на рис. 3, *c*. Частично очертания ступеней скола проявляются на емкостном изображении. Результат предсказуемый, так как в общем случае емкость зонд–образец зависит от геометрии зонда, рельефа поверхности и величины зазора зонд–образец.

Таким образом, можно сделать заключение, что при более низком содержании примеси хрома (при разнице в концентрации хрома на уровне 0.02 mass.%) могут быть также получены контрастные емкостные изображения примесных полос. Эти предварительные оценки говорят о высокой чувствительности СЕСМ к изменению поверхностной емкости сегнетоэлектрического кристалла, хотя в данном эксперименте и не был достигнут порог чувствительности метода.

Относительно оценки контраста в областях с градиентом примеси емкостных изображений по изменению амплитуды емкостного сигнала в 1–3.5% следует заметить, что они носят приближенный характер, так как в каждом отдельном случае определяются шероховатостью поверхности и качеством полученного изображения, которое зависит от параметров сканирования и наличия артефактов топографической природы. Ранее проведенный в [32] систематический анализ различных источников шума показал, что стационарный шум в основном создается изменением толщины образца, коррелирует с топографической шероховатостью и отличается от изображения к изображению.

Заключение

Метод СЕСМ в комбинации с МПО, СМК, АСМ применен к изучению сегнетоэлектрического кристалла, в котором была сформирована ростовая структура чередующихся полос TGS и TGS+Cr. Показано, что СЕСМ на второй гармонике электростатического отклика является перспективным методом визуализации примесных участков поверхности сегнетоэлектрика с нанораз-

мерным пространственным разрешением, способным к выявлению очень малых величин градиента примеси (на уровне 0.02–0.08 mass.%). Контраст емкостного изображения dC/dZ , полученного на второй гармонике (2ω), формируется в областях с градиентом примеси и на доменных границах. При использовании третьей гармоники (3ω) контраст изображения дифференциальной емкости не столь отчетливый как поверхностной емкости на второй гармонике, и он формируется в областях с градиентом примеси и на самих доменах. Промежуточный серый контраст изображения dC/dU на примесных полосах может быть обусловлен электрически активным состоянием примеси Cr^{3+} , входящей в решетку кристалла и дающей разницу в проводимости. Как недостаток метода следует назвать присутствие артефактов топографической природы на емкостных изображениях, от которых затруднительно избавиться и которые необходимо учитывать. Что касается практического использования, следует указать на высокую чувствительность СЕСМ к наличию примеси в кристалле, возможность наблюдать сегнетоэлектрические структуры с периодически послойным изменением концентрации примеси и градиентом концентрации вдоль длины образца вне связи с доменной структурой и изучать профили распределения концентрации носителей заряда.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН. Эксперименты проводились с использованием оборудования ЦКП ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Lányi Š. Application of Scanning Capacitance Microscopy to Analysis at the Nanoscale. In Bhushan B., Fuchs H., Tomitori M. Applied Scanning Probe Methods VIII: Scanning Probe Microscopy Techniques (NanoScience and Technology) Springer, 2008. P. 377–420. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74080-3_11
- [2] Oliver R.A. // Rep. Prog. Phys. 2008. Vol. 71. P. 076501. doi:10.1088/0034-4885/71/7/076501
- [3] Williams C.C., Slinkman J., Hough W.P., Wickramasinghe H.K. // Appl. Phys. Lett. 1989. Vol. 55. P. 1662–1664.
- [4] Kopanski J.J. Scanning Capacitance Microscopy for Electrical Characterization of Semiconductors and Dielectrics. In: Kalinin S., Gruverman A. (eds) Scanning Probe Microscopy. Springer, NY.: 2007. P. 88–112. https://doi.org/10.1007/978-0-387-28668-6_4
- [5] Сорокина К.Л., Толстихина А.Л. // Кристаллография. 2004. Т. 49. № 3. С. 541–565.

- [6] Nakakura C.Y., Tangyonyong P., Anderson M.L. Scanning Capacitance Microscopy. Applications in Failure Analysis, Active Device Imaging, and Radiation Effects. In Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale. Kalinin S.V., Gruverman A. (Eds.) N.Y.: Springer, 2007. P. 634–662. 10.1007/978-0-387-28668-6_24
- [7] Szyszka A., Oblak M., Szymanski T., Wosko M., Dawidowski W., Paszkiewicz R. // Materials Science-Poland. 2016. Vol. 34. N 4. P. 84–850. DOI: 10.1515/msp-2016-0104
- [8] Lee D.T., Pelz J.P., Bhushan B. // Nanotechnology. 2006. Vol. 17. P. 1484–1491. doi:10.1088/0957-4484/17/5/054
- [9] Brezna W., Harasek S., Bertagnolli E., Gornik E., Smoliner J., Enichlmair H. // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 92. N 4. P. 2144–2148. <https://doi.org/10.1063/1.1495075>
- [10] Rommel M., Yanev V., Paskaleva A., Erlbacher T., Lemberger M., Bauer A.J., Frey L. // ECS Trans. 2010. Vol. 28. N 2. P. 139–156.
- [11] Yanev V., Rommel M., Bauer A.J. // J. Vacuum Sci. Technol. 2011. B. 29. N 1. P. 01A401. <https://doi.org/10.1116/1.3532822>
- [12] Naitou Y., Ando A. // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 87. N 25. P. 252908. <https://doi.org/10.1063/1.2149222>
- [13] Naitou Y., Ogiso H. // Jpn. J. Appl. Phys. 2006. Vol. 45. Part 1. N 3B. P. 1922–1925. DOI: 10.1143/JJAP.45.1922
- [14] Fumagalli L., Ferrari G., Sampietro M., Gomila G. // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 91. N 24. P. 243110 (1–3). DOI: 10.1063/1.2821119
- [15] Gomila G., Toset J., Fumagalli L. // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 104. N 2. P. 024315 DOI: 10.1063/1.2957069
- [16] Fumagalli L., Ferrari G., Sampietro M., Casuso I., Martínez E., Samitier J., Gomila G. // Nanotechnology. 2006. Vol. 17. P. 4581–4587. doi:10.1088/0957-4484/17/18/009
- [17] Fumagalli L., Ferrari G., Sampietro M., Gomila G. // Nano Lett. 2009. Vol. 9. N 4. P. 1604–1608.
- [18] Fumagalli L., Esteban-Ferrer D., Cuervo A., Carrascosa J.L., Gomila G. // Nature Materials. 2012. P. 1–9. DOI:10.1038/NMAT3369
- [19] Kumar B., Bonvallet J.C., Crittenden S.R. // Nanotechnology. 2012. Vol. 23. P. 025707 (1–6). doi:10.1088/0957-4484/23/2/025707
- [20] Revilla R.I., Li X.-J., Yang Y.-L., Wang Ch. // J. Phys. Chem. C. 2014. Vol. 118. N 10. P. 5556–5562. doi.org/10.1021/jp411951h
- [21] Leu Ch.-Ch., Chien Ch.-H., Chen Ch.-Y., Chang M.-N., Hsu F.-Yi, Hu Ch.-T. // Electrochem. Solid-State Lett. 2004. Vol. 7. N 10. P. A327–A330. DOI: 10.11499/1.17899811
- [22] Leu Ch.-Ch., Chen Ch.-Y., Chien Ch.-H., Chang M.-N., Hsu F.-Y., Hu Ch.-T. // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82. P. 3493–3495. <https://doi.org/10.1063/1.1576308>
- [23] Поляков В.В. // Научное приборостроение. 2009. Т. 1. № 3. С. 62–66.
- [24] Girard P. // Nanotechnology. 2001. Vol. 12. P. 485–490. PII: S0957-4484(01)26780-4
- [25] Kimura K., Kobayashi K., Yamada H., Matsushige K. // Appl. Surf. Sci. 2003. Vol. 210. P. 93–98. doi:10.1016/S0169-4332(02)01486-1
- [26] Kobayashi K., Yamada H., Matsushige K. // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 81. N 14. P. 2629–2631. doi:10.1063/1.1510582
- [27] Быков В.А., Лосев В.В., Саунин С.А. Емкостная методика сканирующей силовой микроскопии в исследовании распределения легирующей примеси в кремнии. Труды Всерос. совещ. „Зондовая микроскопия-99“. Нижний Новгород. 1999. С. 135–140. https://www.ntmdt-si.ru/data/media/files/publications/1999/03.10_v.a._bykov_v.v._los_russian.pdf
- [28] Рау Э.И., Тагаченков А.М. // Известия РАН. Сер. физическая. 2013. Т. 77. № 8. С. 1041–1046. DOI: 10.7868/S0367676513080358
- [29] Шут В.Н., Кашиевич И.Ф., Вомтс Б.Э. // Кристаллография. 2004. Т. 49. № 2. С. 257–261.
- [30] Magonov S., Alexander J. // Beilstein J. Nanotechnol. 2011. Vol. 2. P. 15–27. doi:10.3762/bjnano.2.2
- [31] Белугина Н.В., Гайнутдинов Р.В., Толстихина А.Л., Иванова Е.С., Кашиевич И.Ф., Шут В.Н., Мозжаров С.Е. // Кристаллография. 2015. Т. 60. № 4. С. 609–615. DOI:10.7868/S0023476115040086
- [32] Zavyalov V.V., Mc Murray J.S., Williams C.C. // J. Vacuum Sci. Technol. B. 2000. Vol. 18. P. 1125–1133. <https://doi.org/10.1116/1.591476>