

06

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

© Р.В. Гайнутдинов,<sup>1</sup> А.Л. Толстихина,<sup>1</sup> А.К. Лашкова,<sup>1</sup> Н.В. Белугина,<sup>1</sup> В.Н. Шут,<sup>2</sup> С.Е. Мозжаров,<sup>2</sup> И.Ф. Кашевич<sup>2,3</sup>

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

<sup>2</sup> Институт технической акустики НАН Беларуси, 210027 Витебск, Беларусь

<sup>3</sup> 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  $\sim 0.02$ – $0.08$  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  $180^\circ$  — 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.

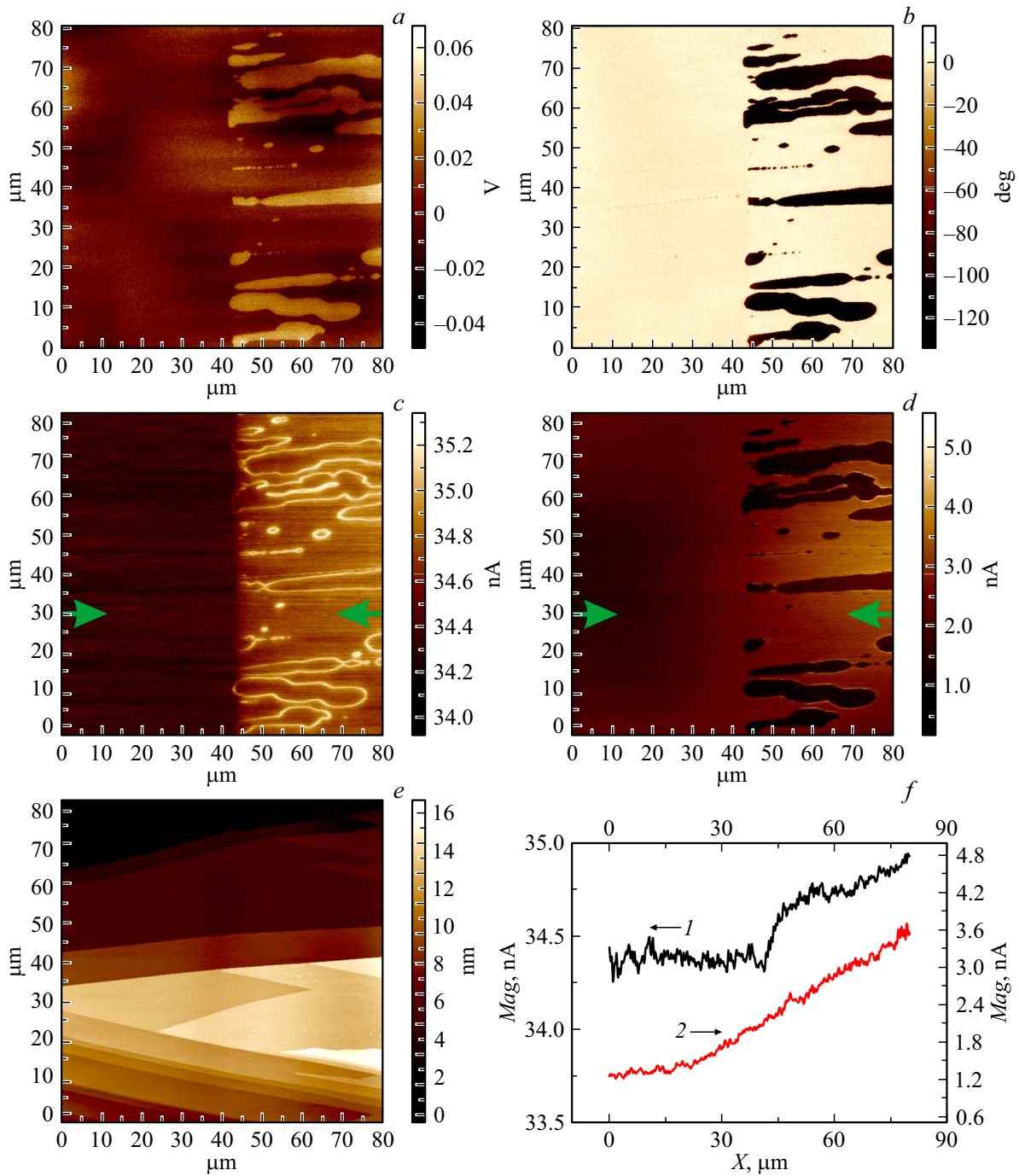
Целью настоящей работы было изучение потенциальных возможностей бесконтактной СЕСМ в исследовании

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  $31.4^\circ\text{C}$  (температура Кюри TGS —  $49.15^\circ\text{C}$ ), пересыщение чистого раствора было  $0.1^\circ\text{C}$ , раствора с примесью —  $0.5^\circ\text{C}$ . Периодическое изменение состава достигалось путем роста затравки попеременно в растворах разного состава — в номинально чистом и содержащем легирующую примесь ионов хрома  $\text{Cr}^{3+}$  [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 ( $2\omega$ ) [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  $3\omega$ -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 ( $3\omega$ ) 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 ( $2\omega$ ) проводились при приложении переменного электрического поля с амплитудой 3–4 V и частотой 70 kHz и  $U_{dc} = 0$ , а на третьей гармонике ( $3\omega$ ) — частотой 46.7 kHz.

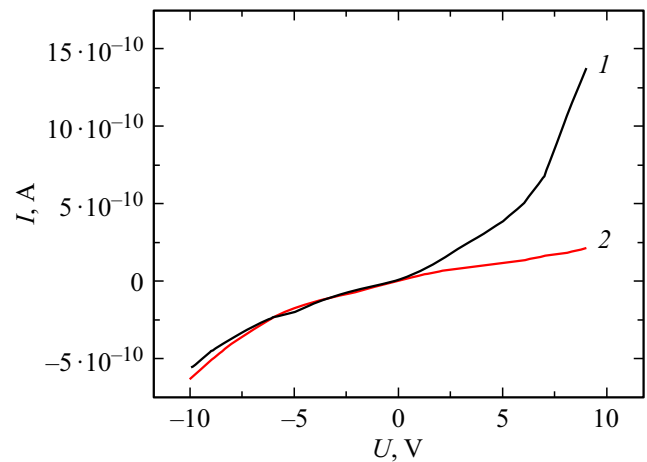
Методом сканирующей микроскопии Кельвина (СМК), также двухпроходным, регистрировали распределение поверхностного потенциала на основе компенсационного принципа (постоянная компонента поданного напряжения  $U_{dc}$  подбиралась таким образом, чтобы колебания кантилевера на частоте  $\omega$  переменной 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  $180^\circ$  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,



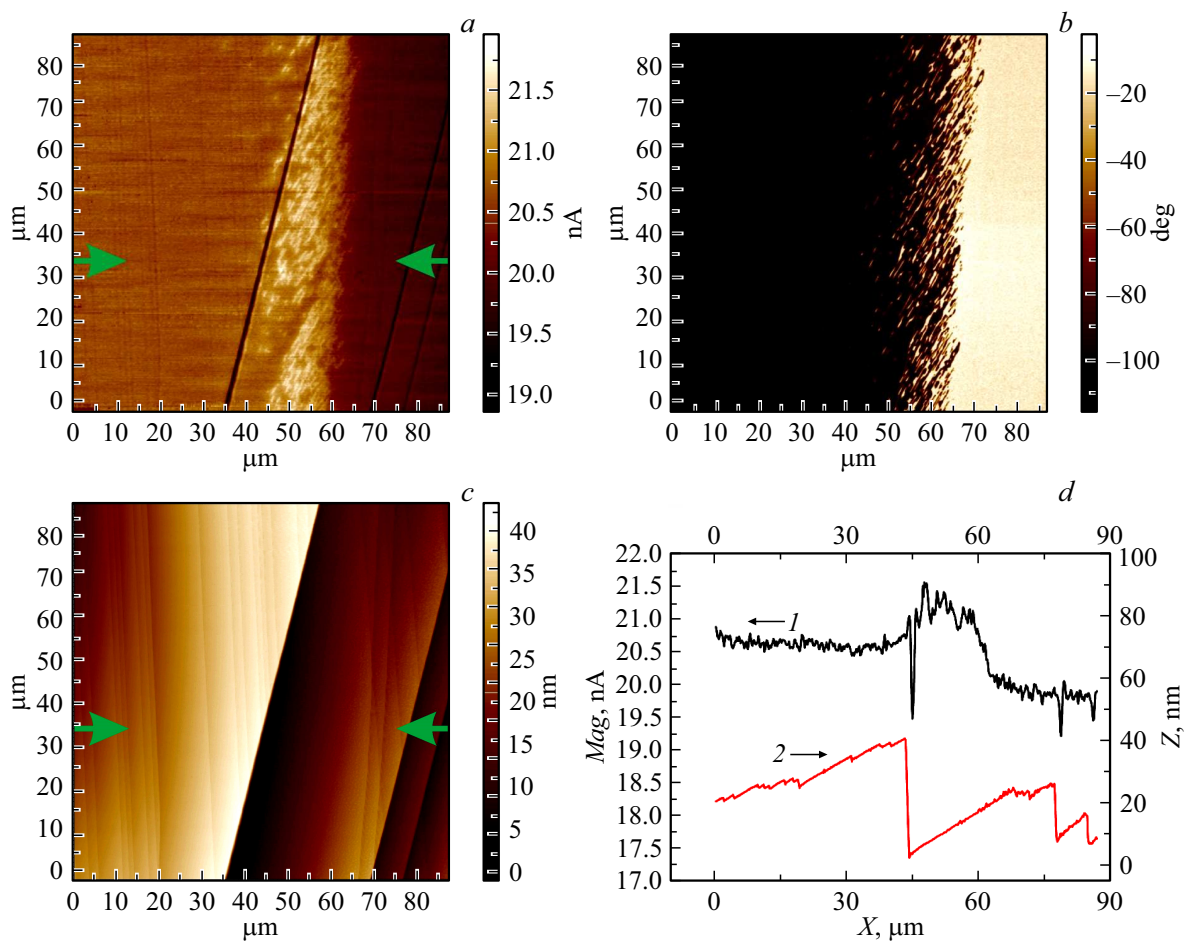
**Рис. 2.** ВАХ кристалла TGS–TGS+Cr (1): 1 — для полосы TGS+Cr, 2 — TGS. Источник тока подключен к платформе зондовой станции.

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  $\sim 0.08$  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 ( $3\omega$ ) 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  $\text{Cr}^{3+}$  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 ( $2\omega$ ), формируется в областях с градиентом примеси и на доменных границах. При использовании третьей гармоники ( $3\omega$ ) 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  $\text{Cr}^{3+}$ , 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](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](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](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>