

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 53.05

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11481>

Аномальное электронное каналирование в тонких пленках ЦТС

М. В. Старицын¹✉

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» – центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», ул. Шпалерная, 49, Санкт-Петербург 191015, Российская Федерация

Аннотация

В ходе исследования поверхности тонких пленок цирконата-титаната свинца (ЦТС) с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ), на поверхности кристаллов фазы перовскита замечены картины электронного каналирования, однако условия их наблюдения совершенно нетипичны и противоречат модельным представлениям. Таким образом, есть достаточные основания утверждать, что наблюдаемые картины электронного каналирования являются аномалией. Для прояснения условий, в которых реализуется данная аномалия, необходимо дополнительное подробное исследование кристалла перовскита в тонкой пленке ЦТС.

В частности, для исследования кристаллографической специфики кристалла использован метод дифракции обратно рассеянных электронов (ДОРЭ) в РЭМ. Данный метод основан на сборе и автоматической обработке картин электронной дифракции, в ходе которой для каждой точки на поверхности кристалла рассчитывается кристаллографическая ориентация.

В результате исследования выявлены экзотические особенности кристаллографической структуры перовскита в тонкой пленке ЦТС, создающие возможность для проявления аномального электронного каналирования. Показано, что кристаллическая решетка перовскита претерпевает аксиально-симметричный монотонный изгиб, определяющий круглую форму кристалла. На примере изучаемой структуры продемонстрирована возможность приготовления тонких сегнетоэлектрических кристаллов с изогнутой кристаллографической поверхностью. Для описания роста круглых кристаллов перовскита из аморфной фазы в тонких пленках ЦТС предложена дислокационная модель, непрерывный изгиб кристаллической решетки перовскита в которой объясняется аккомодацией механических напряжений при уменьшении фазового объема материала пленки. Кроме того, показано, что полосам, наблюдаемым на картинах электронного каналирования, соответствуют кристаллографические плоскости, а любые искажения картины свидетельствуют о локальной деформации решетки в высоко-симметричном однородно изогнутом кристалле перовскита в тонкой пленке ЦТС.

Ключевые слова: аномальное электронное каналирование, каналирование, тонкие пленки, цирконат-титанат свинца, ЦТС, перовскит, деформированные кристаллы, ДОРЭ

Благодарности: Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования научным оборудованием «Состав, структура и свойства конструкционных и функциональных материалов» НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей».

Для цитирования: Старицын М. В. Аномальное электронное каналирование в тонких пленках ЦТС. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(4): 572–580. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11481>

For citation: Staritsyn M. V. Anomalous electron channeling in PZT thin films. *Condensed Matter and Interphases*. 2023;25(4): 572–580. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11481>

✉ Старицын Михаил Владимирович, e-mail: ms_145@mail.ru

© Старицын М. В., 2023



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Одним из основных сегнетоэлектрических материалов со свойствами, подходящими для использования в ИК-детекторах, СВЧ-электронике, микро-электромеханических устройствах, элементах статической и динамической памяти, являются твердые растворы цирконата-титаната свинца (ЦТС) [1–6].

Постоянное совершенствование электронных устройств предполагает развитие и радиоэлектронной компонентной базы в сторону компактности и энергоэффективности. Таким образом, миниатюрные, пленочные и тонкопленочные исполнения сегнетоэлектриков становятся все более востребованными. Однако известно, что при уменьшении толщины пленок, электрофизические характеристики пленок ЦТС становится все сложнее контролировать [7]. Такую тенденцию принято связывать с включением дополнительных факторов при возрастающем влиянии поверхности. Кроме того, на конечные свойства сегнетоэлектрической пленки все большее влияние оказывают характеристики подложки, такие как коэффициент линейного расширения, устойчивость к окислению, барьерные свойства. В этой связи задача исследования тонкопленочных сегнетоэлектриков на основе ЦТС представляется весьма актуальной.

В ходе исследований тонких пленок ЦТС представляют интерес как сплошные перовскитовые пленки, так и обладающие островковой структурой. Термин островок описывает образующиеся в процессе отжига тонких пленок ЦТС кристаллы круглой формы. При малой

концентрации центров кристаллизации одиночные островки фазы перовскита в аморфной матрице растут в виде плоских кристаллов круглой формы, однако, по мере увеличения числа центров кристаллизации, островки фазы перовскита сливаются и образуют сплошную поверхность [8–10].

В ряде работ также описаны наблюдаемые на поверхности островков лучистые узоры (рис. 1), изложены предположения об их природе [9–13].

В данной статье описаны результаты изучения структуры островков перовскита тонких пленок ЦТС, выращенных на подложке Pt-TiO₂-ситалл, которые заслуживают отдельного обстоятельного рассмотрения. Еще на этапе получения электронных изображений (рис. 2) в растровом электронном микроскопе (РЭМ), заметно качественное отличие внешнего вида этих островков от наблюдаемого в пленках ЦТС на подложках Pt-TiO₂-SiO₂-Si (рис. 1). Так, на электронном изображении островка пленки ЦТС на ситалловой подложке (рис. 2), вместо радиально-расходящихся лучистых узоров, различима картина в виде пересекающихся полос, схожая с картиной Кикучи-дифракции. Электронные изображения на рис. 1 и 2 получены при нормальном падении электронного пучка с энергией 12 кэВ.

Наблюдение в РЭМ подобных картин в случае объемных монокристаллов при значительно отличающихся углах падения на образец сканирующего электронного луча объясняется проявлением эффекта электронного каналирования [14]. Пример картины электронного каналирования на крупногабаритном слитке альфа-титанового

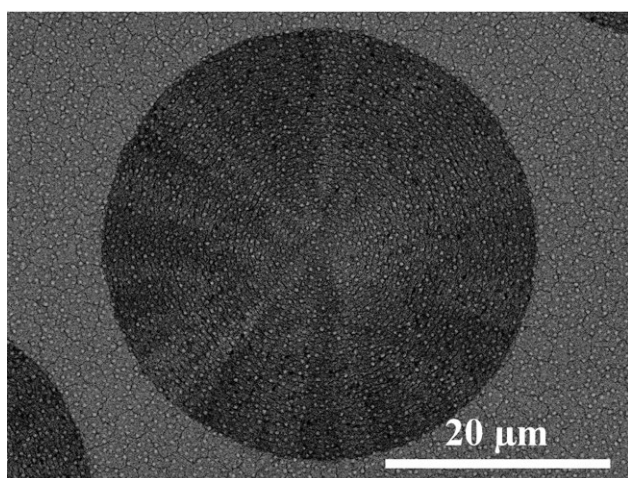


Рис. 1. Электронное изображение островка перовскита в тонкой пленке ЦТС на подложке Pt-TiO₂-SiO₂-Si

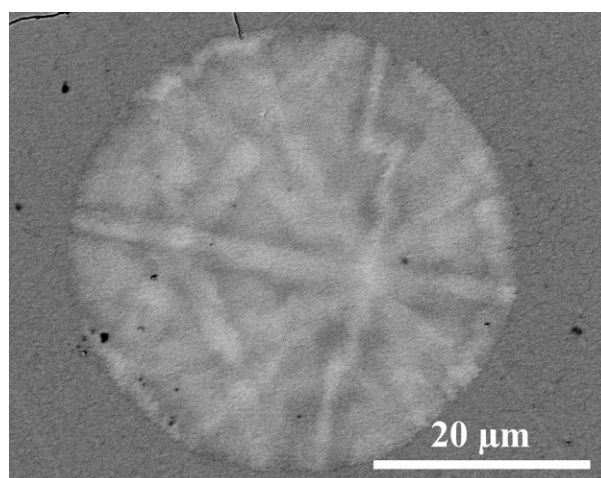


Рис. 2. Электронное изображение островка перовскита в тонкой пленке ЦТС на подложке Pt-TiO₂-ситалл

сплава приведен на рис. 3. Необходимо отметить, что данная картина получена с максимально доступного поля и ограничена кругом объективной апертуры. Разность в углах падения электронного луча на поверхность кристалла для получения приведенной картины составила 30°.

Каналирование заряженных частиц в кристаллах объясняется движением частиц вдоль «каналов», образованных параллельными друг другу рядами атомов (рис. 4а). При этом частицы испытывают скользящие столкновения (импульс почти не меняется) с рядами атомов, удерживающих их в этих «каналах». Если траектория частицы заключена между двумя атомными плоскостями, то говорят о плоскостном каналировании [15, 16]. При падении электронного луча на кристаллическую решетку под значительно отличающимися углами (рис. 4б), на его пути встречаются плоскости с низкой атомной плотностью, вдоль которых электроны каналируют перед тем, как рассеяться [16, 17].

Как можно убедиться, сравнивая между собой масштабные маркеры на рис. 2 и 3, условия наблюдения картин электронного каналирования на островках перовскита далеки от описанных выше. Островок перовскита мал и сканируется с очень малым расхождением практически параллельными электронными лучами (величина угла, на который отклоняется электронный луч при сканировании островка по диаметру, не превосходит 0.15°). Эффект, при котором карти-

на каналирования наблюдается при облучении параллельными лучами, является аномалией, противоречащей модельным представлениям. Таким образом, наблюдаемые на островках перовскита в тонких пленках ЦТС, приготовленных на подложке Pt-TiO₂-ситалл, картины электронного каналирования являются аномалией.

Целью настоящей работы является исследование структурных особенностей островков перовскита, формирующих условия для наблюдения аномального электронного каналирования в тонком слое пленок ЦТС.

2. Экспериментальная часть

Тонкую пленку ЦТС, на которой наблюдаются картины аномального электронного каналирования, наносили на слоистую подложку. Слоистая подложка представляет собой систему из текстурированной платины (с выходом на поверхность кристаллографической плоскости (111)) толщиной около 0.2 мкм, которая нанесена на подслой диоксида титана (около 20 нм), находящейся на толстой (порядка 0.5 мм) подложке из ситалла СТ-50. Пленки наносились методом высокочастотного магнетронного распыления керамической мишени ЦТС с составом, соответствующим морфотропной фазовой границе. После осаждения аморфные пленки для кристаллизации в них фазы перовскита подвергались отжигу в печи. После нагрева со скоростью 300 °С/час до 570 °С и выдержки в течение 1 часа пленки охлаждались до комнатной температуры вместе с печью.

Использование при анализе пленочных структур таких распространенных исследовательских методик, как оптическая, растровая

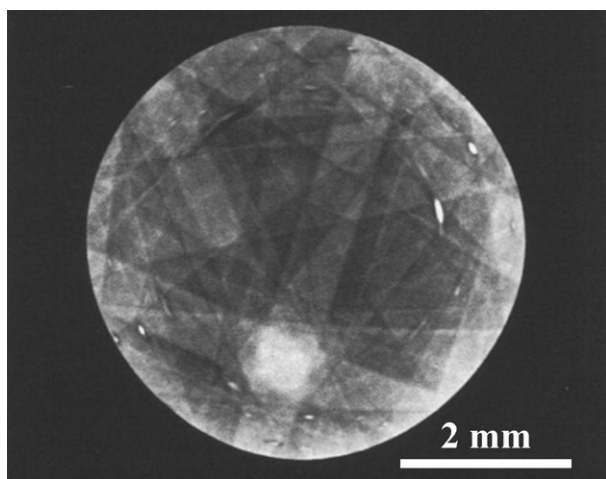


Рис. 3. Пример картины электронного каналирования, полученной на крупногабаритном слитке альфа-титанового сплава. Наблюдение картины ограничено объективной апертурой РЭМ. Масштабный маркер позволяет оценить характерные условия наблюдения картины электронного каналирования

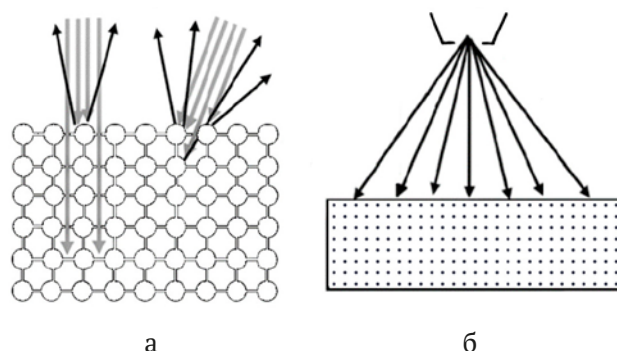


Рис. 4. Принципиальная схема, показывающая происхождение эффекта каналирования как проникновения электронов пучка вдоль плоскостей кристалла (а). Сканирование при малом увеличении РЭМ сопряжено с существенным изменением углов падения электронов на поверхность кристалла (б)

электронная и атомно-силовая микроскопия, не дает информации о кристаллографической специфике материала [18]. Однако дифракция обратно рассеянных электронов (ДОРЭ), которая сочетает возможность локального анализа ориентаций кристаллов и высокое пространственное разрешение РЭМ, является подходящей методикой для исследования особенностей кристаллических фаз в тонких пленках.

Таким образом, отожженные в печи пленки ЦТС изучали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Tescan Lyra 3, оснащенного приставкой регистрации картин ДОРЭ. Метод ДОРЭ основан на поточечном сканировании образца, регистрации и обработке получаемых картин электронной дифракции. Недостаток точности при определении методом ДОРЭ ориентировок кристалла относительно макроскопической, связанной с РЭМ системы координат (погрешность 1–2°), не сказывается на угловом разрешении при анализе относительных ориентировок между двумя близкими точками [19]. Накопленные с помощью метода ДОРЭ карты кристаллографических ориентаций способны прояснить характер структурных особенностей кристаллов и приблизить понимание механизмов их образования.

В ходе работы экспериментально подтверждено, что изменение параметров электронного луча при сканировании исследуемой поверхности не приводит к физической деградации или фазовым превращениям на поверхности тонкой пленки ЦТС. Поэтому ускоряющее напряжение

и ток пучка подбирались сообразно достижению приемлемой скорости картирования при достаточном разрешении картин Кикучи-дифракции и их экспозиции. Шаг сканирования и цифровое разрешение накапливаемой карты определялись репрезентативностью отображения интересующих структурных особенностей при конкретном увеличении РЭМ. Индексация получаемых дифракционных картин проводилась с учетом взаимного расположения 10–12 полос Кикучи, чтобы избежать проблем «псевдосимметрии», которые приводят к ошибочным выводам в работе [20]. В серии пробных исследований по аналогии с [20] в программное обеспечение для анализа картин дифракции были внесены данные о характерных для ЦТС кристаллических решетках тетрагональной, моноклинной и ромбоэдрической сингонии. Однако, как показали результаты, в силу близости параметров и углов решеток (отклонение не более 0.4°), их различение с помощью данной методики не представляется возможным. Поэтому для описания реальной кристаллографической системы было решено использовать приближение деформированной псевдокубической решетки.

3. Результаты и обсуждение

Накопленная методом ДОРЭ карта кристаллографических ориентаций островка перовскита в тонкой пленке ЦТС на подложке Pt(111)-TiO₂-ситалл представлена на рис. 5 слева. Ориентация решетки в каждой точке карты кодируется по стандартному распределению цвета

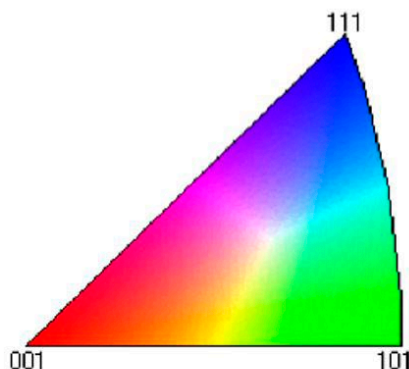
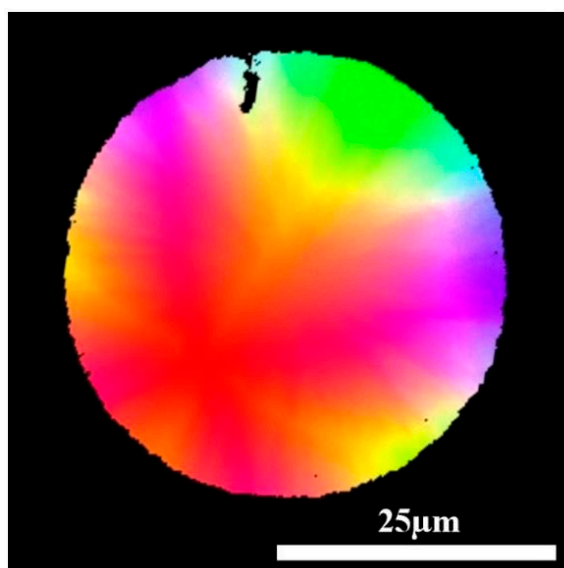


Рис. 5. Карта кристаллографических ориентаций кристалла перовскита ЦТС и треугольник цветокодирования к ней

на обратной полюсной фигуре (IPF), построенной для макроскопического направления, совпадающего с нормалью к плоскости поверхности образца. IPF цветового кодирования для псевдокубической решетки перовскита представлен на рис. 5 справа. Черным цветом на карте кристаллографических ориентаций отмечены области, при сканировании которых получены картины Кикучи-дифракции, непригодные к обработке.

Как видно, структура островка кодирована плавно-разлитыми цветовыми градиентами, без выраженного дробления на радиально-расходящиеся «лучики», которые характерны для островков перовскита в тонких пленках ЦТС на Pt(111)-TiO₂-SiO₂-Si [9].

Программное обеспечение для обработки ориентационных карт позволило получить информацию о кристаллографических разориентациях, достигаемых в пределах изучаемого островка. Таким образом, на основе ориентационной карты (рис. 5) построены карты распределения углов отклонений ориентаций кристаллической решетки от некоторой средней ориентации, рассчитанной в пределах данного островка (grain reference orientation deviation или GROD, рис. 6). Величины углов отклонений ориентаций кристаллической решетки в каждой точке на карте GROD закодированы цветами легенды.

Полученная карта GROD (рис. 6) свидетельствует о наличии однородной аксиально-симме-

тричного деформации кристаллической решетки островка фазы перовскита. Хорошо видно, что кристаллическая решетка островка равномерно деформирована во всех радиальных направлениях относительно центра островка, ориентация которого очевидно совпадает с зародышем роста. Профиль изменения углов кристаллографической ориентации, посчитанный вдоль радиальных направлений (рис. 7), демонстрирует линейный монотонно-непрерывный характер разворота решетки от начальной точки к конечной. Рассчитанный по профилю градиент разворота решетки составляет 1.4 °/мкм.

Принимая во внимания выявленную однородность поворота кристаллической решетки во всех возможных радиальных направлениях (рис. 5–7), появляются основания интерпретировать наблюдаемый на рис. 2 эффект, как электронно-оптическую аномалию, связанную с особенностями кристаллографического строения островков перовскита тонкой пленки ЦТС, выращенной на платинированной ситалловой подложке. Таким образом, наблюдение картин аномального электронного каналирования реализуется из-за однородного аксиально-симметричного изгиба кристаллической решетки. В силу монотонного и непрерывного изгиба кристаллографических плоскостей, проиллюстрированного моделью на рис. 8 [21], изменяются и углы входа электронов в кристаллическую решетку, становится возможным наблюдение картины электронного каналирования в параллельных электронных лучах.

Кроме того, замечено, что картина электронного каналирования, наблюдаемая на поверхности островков перовскитовой фазы (рис. 2, 9а) при наклоне (10°) образца в камере РЭМ изменяется; смещается расположение системы взаимно-пересекающихся линий в рамках островка (рис. 9б). Такое смещение объясняется изменением положения кристаллографических плоскостей относительно падающего на них электронного пучка, то есть угла входа электронов в кристаллическую решетку.

Легко показать, что наблюдаемым на картинах электронного каналирования линиям соответствуют кристаллографические плоскости [14–17]. Таким образом, на рис. 2 и 9 можно непосредственно наблюдать положение кристаллографических плоскостей. Любые дополнительные напряжения, оказываемые на пленку, проявляют себя искажением картины каналирования электронов. В частности, по «надлому» вертикальной линии на рис. 2 можно судить о

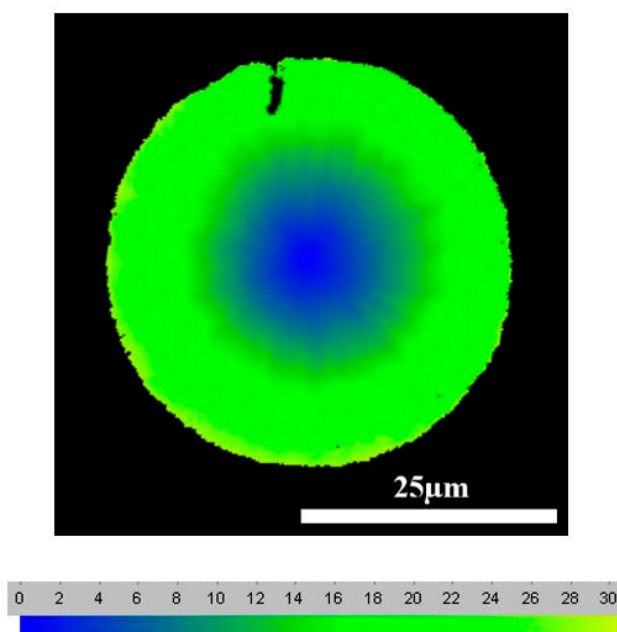


Рис. 6. GROD-карта островка перовскита ЦТС и цветовая легенда к ней

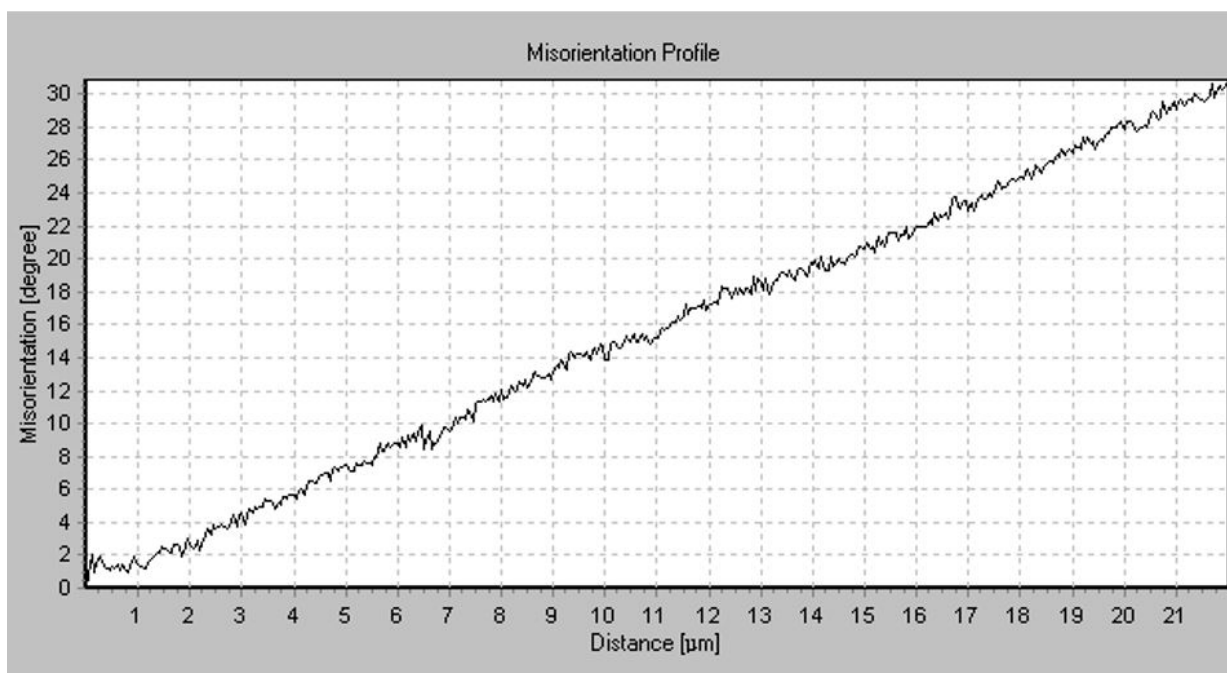


Рис. 7. Профиль изменения угла ориентации кристаллической решетки островка перовскита измеренный радиально

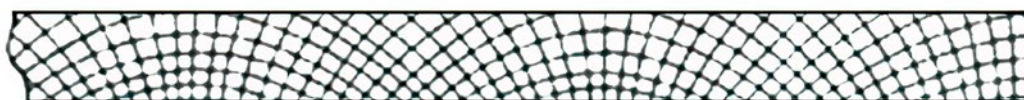
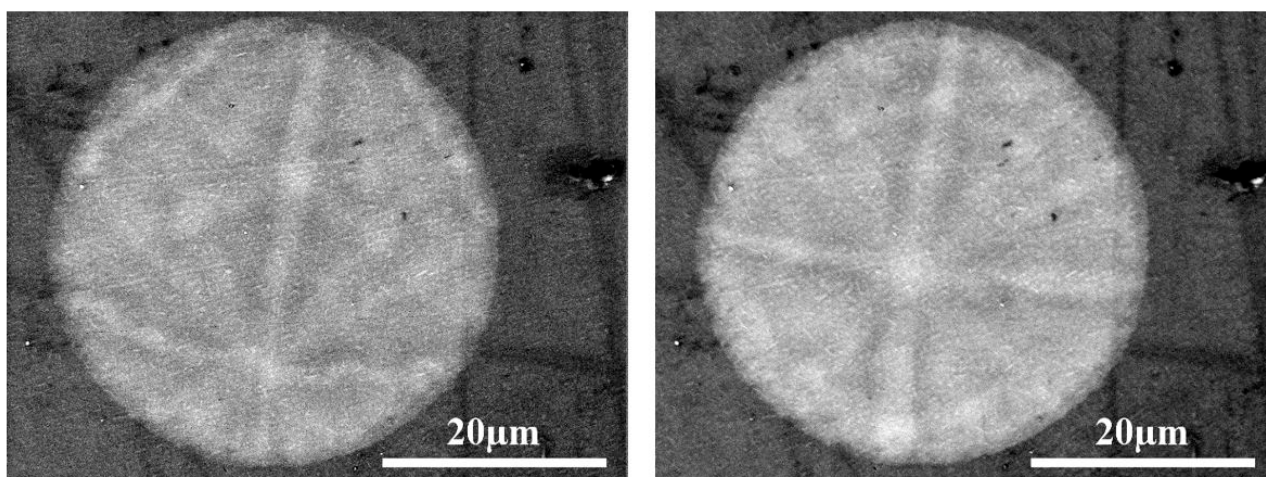


Рис. 8. Утрированная модель изгиба плоскостей кристаллической решетки



а

б

Рис. 9. На электронных изображениях островка перовскита видно сочетание пересекающихся полос. На изображении а) угол падения сканирующего электронного пучка в центре кадра близок к нормали. Изображение б) получено после физического поворота образца вокруг горизонтальной оси на 10 градусов

локальных деформациях кристаллической решетки в высокосимметричном однородно изогнутом кристалле перовскита.

Для описания роста островков перовскита из аморфной фазы в тонком слое пленки ЦТС может быть предложена дислокационная модель, поворот решетки в которой происходит в результате аккомодации механических напряжений при изменении фазового объема. Эта модель является переложением на случай тонких пленок ЦТС модели приведенной в [18, 22, 23]. Модель содержит допущения, что фронт кристаллизации вблизи поверхности находится впереди фронта вблизи подложки и этот фронт распространяется в целом в направлении, параллельном границе раздела пленка-подложка.

Итак, в процессе кристаллизации происходит существенное уплотнение материала за счет усадки вдоль границы раздела пироксид-перовскит. Для тонкой пленки увеличение плотности, в частности, происходит перпендикулярно свободной поверхности, потому что только в этом направлении изменение формы является неограниченным [22]. На стороне кристалла появляется дополнительная полуплоскость из-за меньшего расстояния между атомами (более высокой плотности) кристаллического состояния. Эти неспаренные дислокации, первоначально появляющиеся на границе раздела перовскит-пироксид, остаются в объеме растущего кристалла, образуют облако геометрически необходимых дислокаций, ответственных за «изгиб» всей кри-

сталлической решетки внутри кристалла. Данная модель проиллюстрирована на рис. 10 с помощью набора изогнутых плоскостей решетки, первоначально параллельных поверхности (левая часть рис. 10) и постепенно изгибающихся к подложке в процессе роста кристалла. Из модели следует, что ось разворота решетки в процессе роста островка должна лежать в плоскости пленки, перпендикулярно направлению движения фронта кристаллизации. Такое положение оси разворота при постоянстве величины угла разворота является условием формирования наблюдаемых кристаллов круглой формы.

Предложенную дислокационную модель можно экспериментально верифицировать, оценив предсказываемую ей плотность дислокаций. Относительно простая формула может быть использована для теоретической оценки локальной плотности дислокаций, если предположить однородное распределение [24,25]:

$$\rho_{\text{hom}} = \frac{\theta_{\text{tot}}}{|b|\Delta X},$$

где θ_{tot} – угол изгиба решетки на расстоянии ΔX , реализуемый с помощью дислокаций с вектором Бюргерса b .

Подставляя значения из профиля изменения угла ориентации (рис. 7): $\theta_{\text{tot}} = 28^\circ$, $\Delta X = 20$ мкм и $|b|$, который приравняем к периоду псевдокубической решетки $a = 4.05 \text{ \AA}$, получаем предсказанную моделью среднюю плотность дислокаций вдоль радиального направления островка

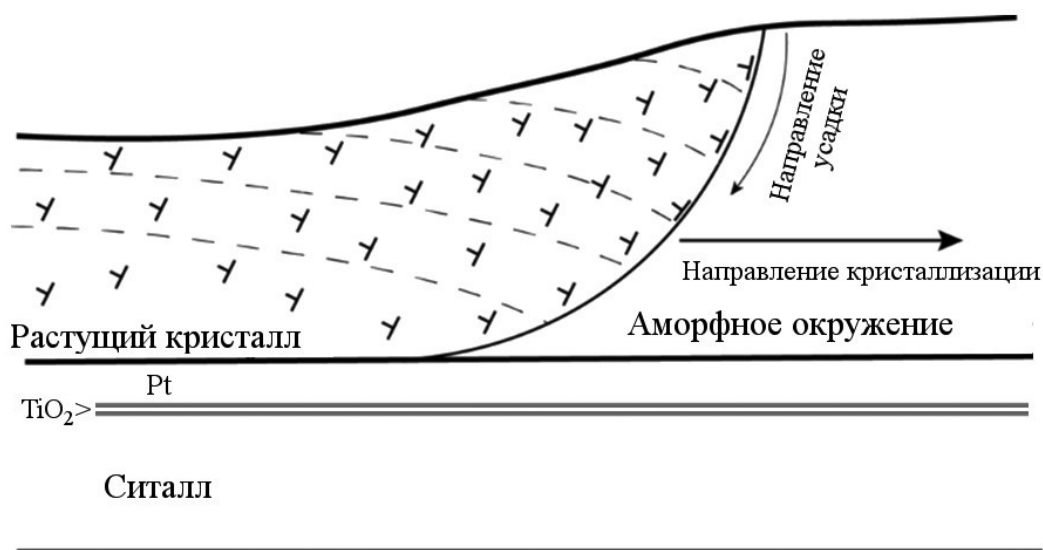


Рис. 10. Иллюстрация дислокационной модели изгиба кристаллической решетки островка перовскита в процессе роста из квазиаморфного окружения пироксидора

перовскита около $3.5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$. Экспериментальная проверка данной величины является предметом дальнейшей работы.

4. Заключение

В тонких пленках ЦТС на ситалловой подложке открыто новое явление: аномальное электронное каналирование. Наблюдение картин электронного каналирования на поверхности островков перовскита при облучении параллельными электронными лучами становится возможным благодаря экзотической кристаллографической структуре. На примере отдельного островка установлено, что кристаллическая решетка островков перовскита имеет аксиально-симметричный изгиб, увеличивающийся с расстоянием от центра по линейному закону. Таким образом, показана возможность изготовления тонкопленочных кристаллов с симметрично-изогнутой кристаллографической поверхностью. Предложена верифицируемая дислокационная модель роста островков перовскита с изогнутой кристаллической решеткой из квазиаморфного окружения в тонких пленках ЦТС.

Заявленный вклад авторов

Старицын М. В. – концепция исследования, проведение исследования, написание текста, итоговые выводы.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Wang Y., Yan J., Ouyang J., Cheng H., Chen N., Yan P. Microstructure evolution with rapid thermal annealing time in (001)-oriented piezoelectric PZT films integrated on (111) Si. *Materials*. 2023;16(5): 2068. <https://doi.org/10.3390/ma16052068>
2. Бухараев А. А., Звездин А. К., Пятаков А. П., Фетисов Ю. К. Стрейнтроника – новое направление микро- и наноэлектроники и науки о материалах. *Успехи физических наук*. 2018;188: 1288–1330. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.01.038279>
3. Ma Y., Son J., Wang X., Liu Y., Zhou J. Synthesis, microstructure and properties of magnetron sputtered lead zirconate titanate (PZT) thin film coatings. *Coatings*. 2021;11(8): 944 <https://doi.org/10.3390/coatings11080944>
4. Song L, Glinsek S., Defay E. Toward low-temperature processing of lead zirconate titanate thin

films: Advances, strategies, and applications. *Applied Physical Review*. 2021;8: 041315. <https://doi.org/10.1063/5.0054004>

5. Picco A., Ferrarini P., Ferrarini P., ... Lazzari M. Piezoelectric materials for MEMS. In: Vigna B., Ferrari P., Villa F. F., Lasalandra E., Zerbini S. (eds). *Silicon Sensors and Actuators*. Springer. Cham.; 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80135-9_10

6. Teuschel M., Heyes P., Horvath S., Novotny C., Cleric A. R. Temperature stable piezoelectric imprint of epitaxial grown PZT for zero-bias driving MEMS actuator operation. *Micromachines*. 2022;13(10): 1705. <https://doi.org/10.3390/mi13101705>

7. Scott J. F. Future issues in ferroelectric miniaturization. *Ferroelectrics*. 1998;206(1): 365–379. <https://doi.org/10.1080/00150199808009170>

8. Валеева А. Р., Пронин И. П., Сенкевич С. В., ... Немов С. А. Микроструктура и диэлектрические свойства тонких поликристаллических пленок PZT с неоднородным распределением состава по толщине. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2022;3: 16–22. <https://doi.org/10.31857/S1028096022010186>

9. Старицын М. В., Федосеев М. Л., Каптелов Е. Ю., Сенкевич С. В., Пронин И. П. Изменение структуры субмикронных пленок ЦТС при тонком варьировании состава в области морфотропной фазовой границы. *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2021;13: 400–410. <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2021.13.400>

10. Elshin A. S., Staritsyn M. V., Pronin I. P., Senkevich S. V., Mishina E. D. Nonlinear optics for crystallographic analysis in lead zirconate titanate. *Coatings*. 2023;13(2): 247. <https://doi.org/10.3390/coatings13020247>

11. Старицын М. В., Федосеев М. Л., Киселев Д. А., Каптелов Е. Ю., Пронин И. П., Сенкевич С. В., Пронин В. П., Сегнетоэлектрические свойства тонких пленок цирконата-титаната свинца, полученных методом высокочастотного магнетронного распыления, в области морфотропной фазовой границы. *Физика твердого тела*. 2023;65(2): 296. <https://doi.org/10.21883/FTT.2023.02.54305.531>

12. Pronin V. P., Dolgintsev D. M., Osipov V. V., Pronin I. P., Senkevich S. V., Kaptelov E. Yu. The change in the phase state of thin PZT layers in the region of the morphotropic phase boundary obtained by the RF magnetron sputtering with varying target-substrate distance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;387: 012063. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/387/1/012063>

13. Елшин А. С., Пронин И. П., Сенкевич С. В., Мишина Е. Д. Нелинейно-оптическая диагностика

поликристаллических тонких пленок цирконата-титаната свинца. *Письма в ЖТФ*. 2020;46(8): 32. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.08.49306.18142>

14. Goldstein J. I., Newbury D. E., Echlin P., ... Michael J. R. Special topics in scanning electron microscopy. In: *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. Springer, Boston, MA; 2003. pp. 247–256. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0215-9_5

15. Туликов А. Ф., Влияние кристаллической решетки на некоторые атомные и ядерные процессы. *Успехи физических наук*. 1965;87(4): 585 <https://doi.org/10.3367/UFNr.0087.196512a.0585>

16. Линдхард Й. Влияние кристаллической решетки на движение быстрых заряженных частиц. *Успехи физических наук*. 1969;99: 249–296 <https://doi.org/10.3367/UFNr.0099.196910c.0249>

17. Thompson M. W. The channelling of particles in crystals. *Contemporary Physics*. 1968;9(4): 375–398. <https://doi.org/10.1080/00107516808220091>

18. Lutjes N. R.; Zhou S.; Antoja-Lleonart J.; Noheda B., Ocelík V. Spherulitic and rotational crystal growth of quartz thin films. *Scientific Reports*. 2021;11(1): 14888. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94147-y>

19. Wright S. I., Nowell M. M., De Kloe R., Chan L. Orientation precision of electron backscatter diffraction measurements near grain boundaries. *Microscopy and Microanalysis*. 2014;20(3): 852–863. <https://doi.org/10.1017/S143192761400035X>

20. Пронин В. П., Канарейкин А. Г., Долгинцев Д. М., Каптелов Е. Ю., Сенкевич С. В., Пронин И. П. Микроструктура, фазовый анализ и диэлектрический отклик пленок $Pb(Zr,Ti)O_3$ в области морфотропной фазовой границы. Поверхности. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017;2: 40–46. <https://doi.org/10.7868/S0207352817020123>

21. Kolosov V. Y., Thölen A. R. Transmission electron microscopy studies of the specific structure of crystals formed by phase transition in iron oxide amorphous films. *Acta Materialia*. 2000;48(8): 1829–1840. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00471-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00471-1)

22. Kooi B. J., De Hosson J. Th. M. On the crystallization of thin films composed of $Sb_3.6Te$ with Ge for rewritable data storage. *Journal of Applied Physics*. 2004;95(9): 4714–4721. <https://doi.org/10.1063/1.1690112>

23. Savytskii D., Jain H., Tamura N., Dierolf V. Rotating lattice single crystal architecture on the surface of glass. *Scientific Reports*. 2016;6: 36449. <https://doi.org/10.1038/srep36449>

24. Konijnenberg P. J., Zaefferer S. Raabe D. Assessment of geometrically necessary dislocation levels derived by 3D EBSD. *Acta Materialia*. 2015;99: 402–414. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.051>

25. Pantleon W. Resolving the geometrically necessary dislocation content by conventional electron backscattering diffraction. *Scripta Materialia*. 2008;58(11): 994–997. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.01.050>

Информация об авторе

Старицын Михаил Владимирович, инженер 2-й категории, Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт» – Центральный Научно-Исследовательский Институт Конструкционных Материалов «Прометей» (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-0088-4577>
ms_145@mail.ru

Поступила в редакцию 09.10.2023; одобрена после рецензирования 12.10.2023; принята к публикации 16.10.2023; опубликована онлайн 25.12.2023.