

03,07

## Выявление и исследование $60^\circ$ -поворотных доменов в $\alpha$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ методом просвечивающей электронной микроскопии

© А.В. Мясоедов<sup>1</sup>, И.С. Павлов<sup>2</sup>, А.И. Печников<sup>1,3</sup>, В.И. Николаев<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> ООО „Совершенные кристаллы“, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: amyasoedov88@gmail.com

Поступила в Редакцию 23 августа 2022 г.

В окончательной редакции 23 августа 2022 г.

Принята к публикации 6 сентября 2022 г.

Установлены условия обнаружения и распознавания  $60^\circ$ -поворотных доменов в пленках  $\alpha$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3/\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0001). Изображения доменов получены методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Структурные характеристики выявленных доменов установлены путем приготовления образцов в поперечном и планарном сечениях, правильного выбора дифракционных условий и соответствующего режима регистрации изображений. В результате анализа экспериментальных данных определены размеры, пространственное расположение, объемная доля и площадь, занимаемая включениями доменов.

**Ключевые слова:** дефекты структуры, поворотные домены, просвечивающая электронная микроскопия, оксид галлия.

DOI: 10.21883/FTT.2023.01.53921.463

### 1. Введение

Оксид галлия ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) является полупроводниковым материалом, который кристаллизуется в виде различных фаз, отличающихся друг от друга шириной запрещенной зоны и другими физическими свойствами. Эпитаксиальные пленки четырех известных полиморфных модификаций  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  могут быть синтезированы в лабораторных условиях путем варьирования ростовых параметров, таких как температура и давление. Ширина запрещенной зоны между различными модификациями изменяется от 4.5 до 5.3 eV (см., например, обзор [1]). Получение монокристаллов высокого структурного совершенства путем кристаллизации из расплава при нормальных условиях возможно только для термодинамически стабильной  $\beta$ -фазы (4.48 eV [2]), которую уже используют для изготовления электронных приборов [3]. Другие полиморфы  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  являются метастабильными, и о получении монокристаллов этих фаз в литературе имеется очень мало сообщений [4]. В то же время их выращивают низкотемпературной газофазной эпитаксией в виде тонких слоев.

Все известные полиморфы  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  вызывают устойчивый и глубокий интерес исследователей из-за своих уникальных свойств. В частности,  $\alpha$ -фаза обладает наибольшим значением ширины запрещенной зоны: 5.0–5.3 eV [5]. Монокристаллические пленки этой фазы получают гетероэпитаксией, например, методом хлоридной газофазной эпитаксии на подложках сапфира [6].

Пленки используют для экспериментов по разработке приборов с исключительными параметрами [7], которые имеют относительно низкую себестоимость.

Кристаллы  $\alpha$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  имеют структуру корунда, элементарная ячейка которой относится к пространственной группе  $R\bar{3}c$  тригональной сингонии, описываемой ромбоэдрической или гексагональной системами координат. В  $\alpha$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  ионы кислорода образуют структуру чередующихся слабо искаженных плотноупакованных слоев, в то время как ионы галлия занимают две трети октаэдрических пустот между ними [8]. Чередование происходит вдоль направлений [0001] или [111] соответственно в гексагональной или ромбоэдрической системах. В литературе, посвященной исследованию  $\alpha$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , кристаллическая решетка описывается в гексагональной системе координат с параметрами  $a_0 = 4.98 \text{ \AA}$  и  $c_0 = 13.43 \text{ \AA}$ , поэтому в работе для обозначения кристаллографических индексов плоскостей и направлений мы будем придерживаться системы индексов Миллера–Бравэ. На подложках сапфира с ориентацией (0001) получают слои  $\alpha$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  с высокой степенью кристалличности [9]. Однако слои содержат дефекты структуры, в частности, проникающие дислокации, распределенные с плотностью порядка  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$  [5]. Технологические усилия по эпитаксиальному выращиванию фаз  $\gamma$  — и  $\kappa$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  на сапфире в лучших случаях приводят к тому, что в пленках формируются поворотные домены [10]. В худших случаях пленки включают агрегаты мелких кристаллов различных ориентаций.

Устойчиво повторяющейся особенностью доменной структуры является поворот доменов вокруг направления чередования плотноупакованных слоев галлия и кислорода, которые обычно слегка искажены. В частности, в пленках  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> шесть типов различно ориентированных доменов формируются вокруг нормали к плоскости (201) [11,12]. В пленках  $\kappa$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обнаружены три варианта доменов, повернутых относительно направления  $\langle 001 \rangle$  [10,13,14]. Наконец, в пленках  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> выявлены два варианта доменов, повернутых вокруг направления  $\langle 111 \rangle$  [15,16]. Эти особенности можно объяснить более низкой симметрией решеток перечисленных полиморфных модификаций по отношению к поворотам и отражениям, присущим решетке корунда, то есть отсутствием поворотной оси симметрии третьего порядка  $\bar{3}$ .

В отличие от низкосимметричных фаз, полиморф  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на подложках сапфира получают в виде структурно-однородных монокристаллических пленок. Тем не менее, литературные данные [17] и наши собственные результаты позволяют сделать вывод о том, что в пленках могут сформироваться домены, повернутые относительно матрицы на 60° вокруг оси  $c$ . Дополнительный набор пиков рентгеновского дифракционного отражения, характерных для таких доменов, наблюдался для образцов, азимутальное положение которых изменялось на 60°. Слабая интенсивность отражений свидетельствовала о том, что домены присутствовали в качестве включений. В статье [17] проведена оценка интенсивности дополнительных пиков и показано, что объемная доля включений составила 0.4%. Такие домены могут быть охарактеризованы как двойники поворотного типа, однако, для сохранения терминологии, принятой в литературе по Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, мы будем использовать термин „поворотный домен“. Несмотря на актуальность задачи получения пленок  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, не содержащих поворотных доменов [17], структура таких дефектов и условия их возникновения остаются малоизученными.

В настоящей работе приведены результаты анализа условий выявления и исследования свойств включений 60°-поворотных доменов в пленках  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, выполненные методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Пленки синтезированы на базисной плоскости сапфира. Наглядно показано пространственное расположение доменов и определены их характеристики: размеры и объемная доля. Описаны рекомендации по диагностике включений поворотных доменов методом ПЭМ.

## 2. Методика эксперимента

Тонкие пленки  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> были получены методом хлоридной газофазной эпитаксии на подложках сапфира с ориентацией (0001). Синтез проводился при атмосферном давлении в горизонтальном кварцевом реакторе, разработанном в ООО „Совершенные кристаллы“ [6].

Скорость роста варьировалась от 8 до 12  $\mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ , и получение пленок заданной толщины задавалось продолжительностью ростового процесса. Для исследования методом ПЭМ было отобрано четыре образца со слоями толщиной от 0.8 до 1.3  $\mu\text{m}$ . Пленки имели зеркально-гладкую поверхность. В вышеуказанном диапазоне толщин никаких существенных различий в структурных свойствах не было выявлено, а присутствие включений 60° поворотных доменов было подтверждено для всех четырех образцов.

Эксперименты проводились на электронном микроскопе Tecnai Osiris (FEI Technologies Inc.) при ускоряющем напряжении 200 kV. С помощью сфокусированного пучка ионов Ga<sup>+</sup> на установке Scios FEI FIB были вырезаны ламели разной ориентации, а именно, в поперечном сечении и параллельно базисной плоскости эпитаксиальных структур. Для ориентации образца в процессе наблюдений использовался двухнаклонный держатель с наклоном соответственно  $\pm 35$  и  $\pm 27$  градусов по двум осям.

Для идентификации поворотных доменов на изображениях, полученных в ПЭМ, необходимо понимать правила отбора разрешенных дифракционных рефлексов этой структуры. Рассмотрим эти правила подробнее.

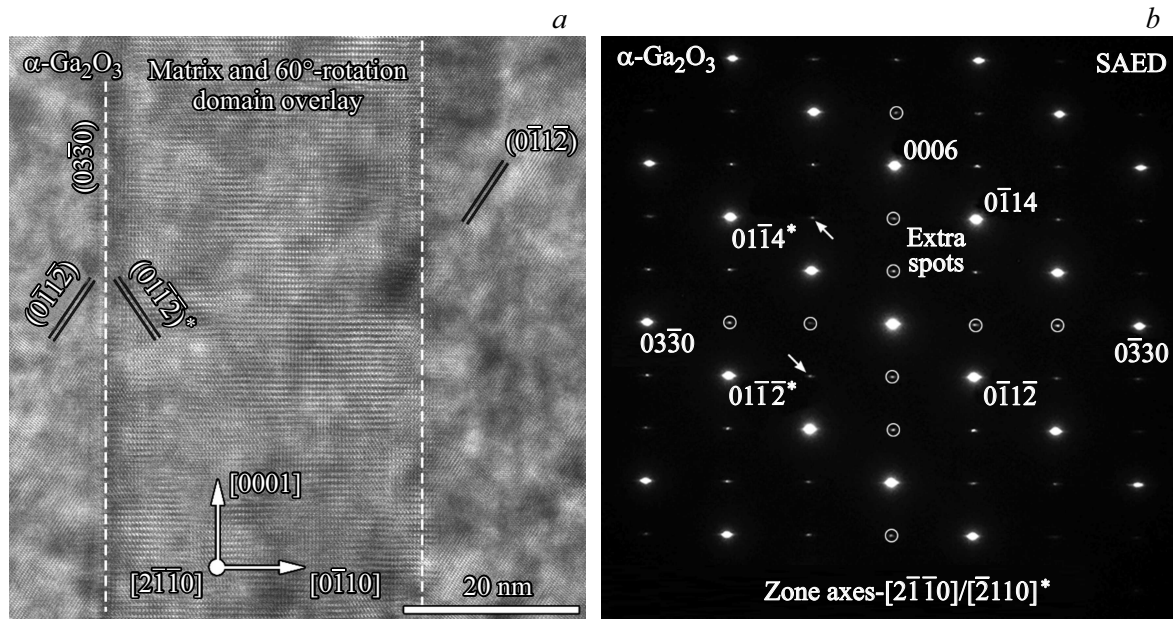
Ниже приводятся условия отражений, разрешенных для пространственной группы симметрии  $R\bar{3}c$  [18]:

$$\begin{aligned} hki\bar{l} : & \quad -h + k + l = 3n, \\ h\bar{h}2\bar{h}l : & \quad l = 3n, \\ h\bar{h}0l : & \quad h + l = 3n, \quad l = 2n, \\ 000l : & \quad l = 6n. \end{aligned} \quad (1)$$

Индексы плоскостей включения, повернутого на 60° вокруг оси  $c$  относительно матрицы, могут быть найдены в системе координат, жестко связанной с матрицей с помощью следующего поворотного преобразования:

$$\begin{pmatrix} h^* \\ k^* \\ l^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ k \\ l \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $h^*$ ,  $k^*$ ,  $l^*$  индексы плоскостей включения, записанные в системе координат матрицы. Здесь мы также воспользовались тем фактом, что поворот на 60° для данной структуры эквивалентен повороту на 180°, так как ось  $\bar{3}$  может быть рассмотрена как независимо действующая ось 3-го порядка и центр симметрии. Правила отбора разрешенных рефлексов также должны быть преобразованы с учетом (2). Нам интересны два условия:  $-h + k + l = 3n$  и  $h + l = 3n$ , где  $l = 2n$ . Воспользовавшись соотношением (2), получаем аналогичные условия для включений:  $h^* - k^* + l^* = 3n$  и  $-h^* + l^* = 3n$ , где  $l^* = 2n$ . Если наблюдаемый в ПЭМ участок будет содержать наложение матрицы и включения, то оба типа рефлексов будут наблюдаться на электронограмме от



**Рис. 1.** *a* — ВРЭМ-изображение и *b* — картина электронной микродифракции, соответствующие области наложения матрицы и включения 60°-поворотного домена при ориентации поперечного сечения образца в оси зоны  $[2\bar{1}10]$ . Запрещенные рефлексы, возникшие вследствие двойной дифракции электронных лучей, обведены в кружки.

этой области. Ниже мы приводим несколько примеров описания таких отражений

$$\begin{aligned}
 -h + k + l &= 3n & 0\bar{1}1\bar{2}, 0\bar{1}14; \\
 h^* - k^* + l^* &= 3n & 01\bar{1}\bar{2}^*, 01\bar{1}4^*; \\
 h + l &= 3n, l = 2n & 2\bar{2}0\bar{2}; \\
 -h^* + l^* &= 3n, l^* = 2n & \bar{2}20\bar{2}^*.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

### 3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1, *a* приведено электронно-микроскопическое изображение высокого разрешения (ВРЭМ) наложения кристаллических решеток матрицы и включения при ориентации вдоль оси зоны  $[2\bar{1}10]$ . Для наглядности область наложения выделена пунктирными линиями на изображении. Наклонными линиями отмечено положение атомных плоскостей  $(0\bar{1}1\bar{2})$ , соответствующих наибольшему межплоскостному расстоянию для рассматриваемой оси зоны. На рис. 1, *b* показана электронограмма, полученная от данной области. Рефлексы, обусловленные включением 60°-поворотного домена, обозначены звездочками и обозначены с учетом дополнительных условий (3). Рефлексы, возникшие из-за двойной дифракции, отмечены кружками.

Из электронограммы видно, что дополнительные рефлексы характеризуются более слабой интенсивностью, чем отражения от матрицы. Обращаем внимание, что при индексировании атомных плоскостей посредством Фурье анализа ВРЭМ-изображения (рис. 1, *a*) для спек-

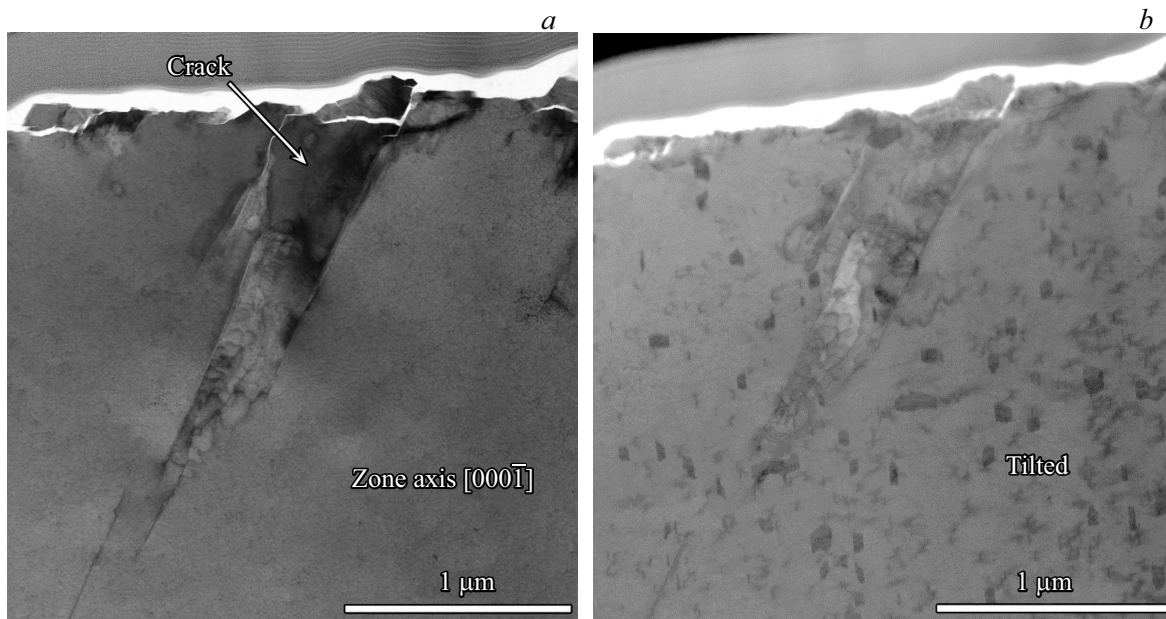
тра Фурье будут утрачены значения интенсивностей отражений матрицы и включения. Большое количество полиморфных модификаций с близкими межплоскостными расстояниями может привести к неверной интерпретации наблюдаемой картины.

Отметим также, что при наблюдении вдоль оси зоны, корректнее будет написать вдоль оси зоны  $[1\bar{1}00]$  плоскости матрицы и включений дублируют друг друга. Поэтому в данной ориентации идентифицировать поворотные домены невозможно. Следовательно, ось зоны типа  $\langle 1\bar{1}00 \rangle$  не может быть использована для выявления включений данного рода.

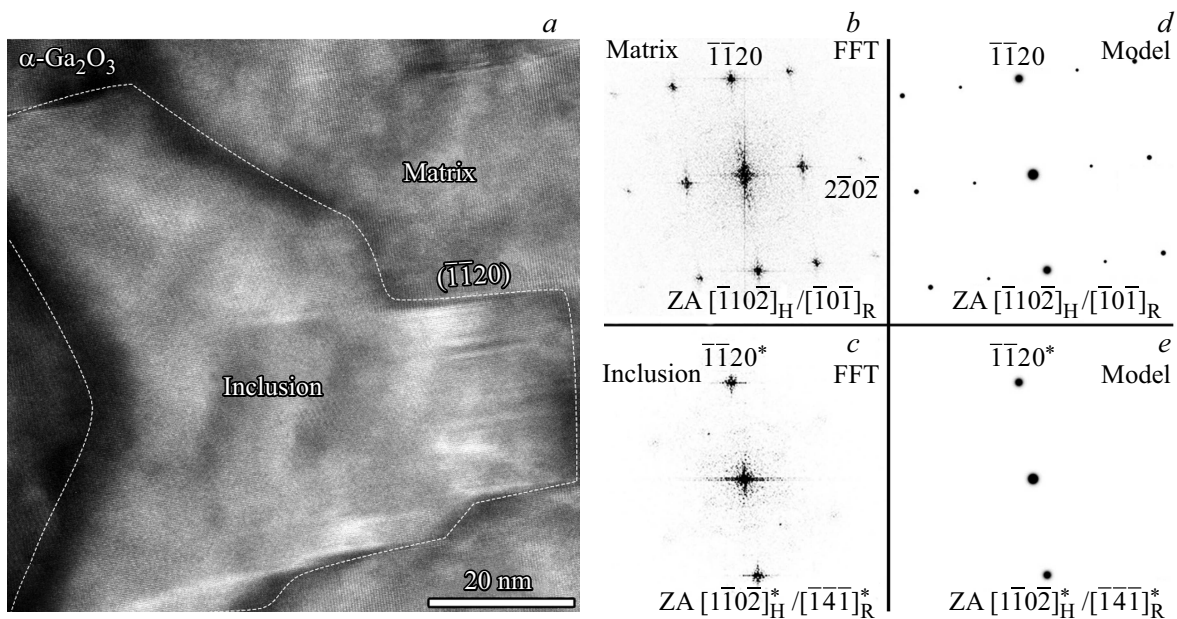
Анализ результатов исследования поперечных сечений образцов позволяет заключить, что включения возникают на интерфейсе с подложкой. Они распространяются в продольном направлении от интерфейса до поверхности пленки. Их размер в поперечном направлении может составлять несколько десятков нанометров. Включения, как правило, имеют плоские вертикальные границы с матрицей.

Сечения образцов в планарной геометрии (0001) были приготовлены с целью определения формы и поперечных размеров поворотных доменов и оценки их распределения. Для наблюдения включений на фоне матрицы оказалось весьма удобным использовать сканирующий режим ПЭМ (СПЭМ) в сочетании с сильным наклоном образца.

Для оси зоны  $[000\bar{1}]$  атомные плоскости матрицы и включений дублируют друг друга, что аналогично случаю с осью зоны  $[1\bar{1}00]$ . Из-за этого включения не проявляются на фоне матрицы на ВРЭМ- и СПЭМ-



**Рис. 2.** Темнопольные СПЭМ-изображения одной и той же области сечения образца, приготовленного в планарной геометрии. *a* — направление  $[000\bar{1}]$  образца  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  параллельно электронному пучку, *b* — снимок сделан при сильном наклоне данного направления относительно электронного пучка. Стрелкой отмечена трещина, возникшая в процессе пробоподготовки.



**Рис. 3.** *a* — ВРЭМ-изображение включения  $60^\circ$ -поворотного домена, на фоне матрицы. Направления  $[1\bar{1}0\bar{2}]$  и  $[1\bar{1}0\bar{2}]^*$  соответственно домена и матрицы ориентированы параллельно электронному пучку. *b, c* — двумерные спектры Фурье, соответствующие областям матрицы и включения на ВРЭМ-изображении. *d, e* — модельные изображения дифракционной картины для осей зон соответственно  $[1\bar{1}0\bar{2}]$  и  $[1\bar{1}0\bar{2}]^*$   $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ .

изображениях образца (рис. 2, *a*). Для выявления включений образец следует ориентировать так, чтобы электроны по-разному дифрагировали на матрице и включениях. С этой целью образец должен быть наклонен относительно положения для наблюдения в оси зоны  $[0001]$ . Данный прием позволил выявить значительное количество включений в пленке (рис. 2, *b*).

В слоях метастабильных фаз оксида галлия зачатую встречаются нежелательные включения других полиморфных модификаций. С целью подтверждения соответствия наблюдаемых включений  $60^\circ$ -поворотным доменам  $\alpha$ -фазы были дополнительно получены ВРЭМ-изображения. На них включения на фоне матрицы представлены в осях зоны, для которых атомные плоскости

Значения угла  $\varphi$  между кристаллографическими направлениями матрицы и включения с осью зоны  $[000\bar{1}]$  при вращении вокруг направления

| Матрица                                    | Включение   | $\varphi, ^\circ$ |
|--|---|-------------------|
| $[000\bar{1}]_H/[1\bar{1}\bar{1}]_R$       | $[000\bar{1}]_H^*/[1\bar{1}\bar{1}]_R^*$          | 0                 |
| $[1\bar{1}0\bar{5}]_H/[2\bar{1}\bar{2}]_R$ | $[1\bar{1}0\bar{5}]_H^*/[4\bar{7}\bar{4}]_R^*$    | 7.3               |
| $[1\bar{1}0\bar{4}]_H/[5\bar{2}\bar{5}]_R$ | $[1\bar{1}0\bar{4}]_H^*/[1\bar{2}\bar{1}]_R^*$    | 9.1               |
| $[2\bar{2}0\bar{5}]_H/[7\bar{1}\bar{7}]_R$ | $[2\bar{2}0\bar{5}]_H^*/[1\bar{3}\bar{1}]_R^*$    | 14.4              |
| $[1\bar{1}0\bar{2}]_H/[1\bar{0}\bar{1}]_R$ | $[1\bar{1}0\bar{2}]_H^*/[1\bar{4}\bar{1}]_R^*$    | 17.8              |
| $[440\bar{5}]_H/[3\bar{1}\bar{3}]_R$       | $[440\bar{5}]_H^*/[1(\bar{1}\bar{3})\bar{1}]_R^*$ | 27.2              |
| $[1\bar{1}0\bar{1}]_H/[2\bar{1}\bar{2}]_R$ | $[1\bar{1}0\bar{1}]_H^*/[0\bar{1}0]_R^*$          | 32.7              |

не полностью дублируют друг друга. Используя линии Кикучи, мы можем вращать образец в двунаклонном держателе вокруг оси параллельной направлению  $[1\bar{1}\bar{2}0]$  образца. Это позволяет значительно упростить получение нужной ориентации образца. Оси зон, использованные для идентификации включений, были выбраны с учетом разрешенных отражений [см. систему уравнений (3)]. Они перечислены в таблице, где рядом с направлениями, записанными в гексагональной системе координат, приведена их запись в ромбоэдрической системе. Это сделано для того, чтобы подчеркнуть отличия между осями зон включений и матрицы.

ВРЭМ-изображение одного из включений приведено на рис. 3, *a*. В данном случае матрица и включение ориентированы соответственно вдоль осей зоны  $[1\bar{1}0\bar{2}]$  и  $[1\bar{1}0\bar{2}]^*$ . На рис. 3 показаны двумерные спектры Фурье решеток включения (*b*) и матрицы (*c*). Второй содержит только пики, соответствующие чередованию плоскостей  $(1\bar{1}\bar{2}0)$ , в плоскости которых и происходило основное вращение. Этот результат согласуется с модельными изображениями на рис. 3, *d* и *e*, построенными согласно условию (3). Аналогичная процедура была проделана для осей зоны  $[1\bar{1}0\bar{1}]$  матрицы и  $[1\bar{1}0\bar{1}]^*$  включения, для которых различия в дифракционной картине носят более явный характер. Кроме того, производился контроль углов поворота гониометра при перемещении от одной оси зоны к другой. Полученные значения соответствуют разнице между углами (таблица).

#### 4. Заключение

Вышеописанный подход к идентификации включений 60°-поворотных доменов в пленках метастабильной фазы  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на подложках  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> состоит в верном выборе осей зон отражающих плоскостей, получении и анализе ВРЭМ- и СПЭМ-изображений. Чтобы судить о типе включений необходимо приготовить ориентированные образцы. Для выявления включений в поперечном сечении образец должен быть ориентирован вдоль

осей зоны типа  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ . Образцы планарной геометрии следует наклонять. Тогда включения проявятся на фоне матрицы в сканирующем режиме из-за разницы дифракционных условий при прохождении различно ориентированных кристаллических структур. Для идентификации их типа необходимо вывести в отражение плоскости, принадлежащие такой оси зоны, которая обеспечивает различие картин электронной микродифракции, и провести сравнение с модельными изображениями.

Установлено, что включения 60°-поворотных доменов возникают на интерфейсе с подложкой и распространяются до поверхности слоя. Их поперечные размеры достигают нескольких десятков нанометров. Доля площади в сечении образца, занятая включениями поворотных доменов, составляет ~ 5%. При условии, что включения имеют плоские вертикальные границы, оценка их объемной доли не превышает 5%.

#### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке РФФИ. Грант № 19-29-12041мк.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] E. Ahmadi, Y. Oshima. J. Appl. Phys. **126**, 160901 (2019). doi: 10.1063/1.5123213
- [2] T. Onuma, S. Saito, K. Sasaki, T. Masui, T. Yamaguchi, T. Honda, M. Higashiwaki. Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 11, 112601 (2015). doi: 10.7567/JJAP.54.112601
- [3] S.J. Pearton, J. Yang, P.H. Cary, F. Ren, J. Kim, M.J. Tadjer, M.A. Mastro. Appl. Phys. Rev. **5**, 1 (2018). doi: 10.1063/1.5006941
- [4] J.P. Remeika, M. Marezio. Appl. Phys. Lett. **8**, 4, 87 (1966). doi: 10.1063/1.1754500
- [5] Y. Oshima, K. Kawara, T. Shinohe, T. Hitora, M. Kasu, S. Fujita. APL Mater. **7**, 2 (2019). doi: 10.1063/1.5051058
- [6] A.I. Pechnikov, S.I. Stepanov, A.V. Chikiryaka, M.P. Scheglov, M.A. Odnobludov, V.I. Nikolaev. Semiconductors **53**, 6, 780 (2019). doi: 10.1134/S1063782619060150
- [7] M. Oda, T. Tokuda, H. Kambara, T. Tanikawa, T. Sasaki, T. Hitora. Appl. Phys. Express **9**, 021101 (2016). doi: 10.7567/APEX.9.021101
- [8] M. Marezio, J.P. Remeika. J. Chem. Phys. **46**, 5, 1862 (1967). doi: 10.1063/1.1840945
- [9] K. Kaneko, H. Kawanowa, H. Ito, S. Fujita. Jpn. J. Appl. Phys. **51**, 020201 (2012). doi: 10.1143/JJAP.51.020201
- [10] Y. Li, X. Xiu, W. Xu, L. Zhang, H. Zhao, Z. Xie, T. Tao, P. Chen, B. Liu, R. Zhang, Y. Zheng. Superlat. Microstruct. **152**, 4, 106845 (2021). doi: 10.1016/j.spmi.2021.106845
- [11] T. Oshima, T. Okuno, S. Fujita. Jpn. J. Appl. Phys. **46**, 11, 7217 (2007). doi: 10.1143/JJAP.46.7217
- [12] V. Gottschalch, K. Mergenthaler, G. Wagner, J. Bauer, H. Paetzelt, C. Sturm, U. Teschner. Phys. Status Solidi **206**, 2, 243 (2009). doi: 10.1002/pssa.200824436

- [13] H. Nishinaka, H. Komai, D. Tahara, Y. Arata, M. Yoshimoto. *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, *11*, 1 (2018).  
doi: 10.7567/JJAP.57.115601
- [14] I. Cora, F. Mezzadri, F. Boschi, M. Bosi, M. Čaplovičová, G. Calestani, I. Dódonny, B. Pécz, R. Fornari. *Cryst. Eng. Commun.* **19**, *11*, 1509 (2017). doi: 10.1039/c7ce00123a
- [15] I. Cora, Z. Fogarassy, R. Fornari, M. Bosi, A. Rečenič, B. Pécz. *Acta Mater.* **183**, *1*, 216 (2020).  
doi: 10.1016/j.actamat.2019.11.019
- [16] D. Shinohara, S. Fujita. *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, *9*, 7311 (2008).  
doi: 10.1143/JJAP.47.7311
- [17] Y. Oshima, E.G. Víllora, K. Shimamura. *Appl. Phys. Express* **8**, *5*, 4 (2015). doi: 10.7567/APEX.8.055501
- [18] *International tables for crystallography*. V.A. / Ed. Th. Hahn. Dordrecht, Reidel (1983). P. 182–189.

*Редактор Д.В. Жуманов*