НАНОМАТЕРИАЛЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО И КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 548.73

ИССЛЕДОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕНТГЕНОВСКОГО И СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЙ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК ZnO, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО ОСАЖДЕНИЯ НА ПОДЛОЖКАХ Al₂O₃, LaMgAl₁₁O₁₉ ОРИЕНТАЦИИ (0001)

© 2024 г. В. А. Жернова^{1,2,*}, Ю. А. Волковский^{1,2}, М. С. Фоломешкин^{1,2}, А. Ю. Серегин^{1,2}, П. А. Просеков^{1,2}, А. Э. Муслимов¹, А. В. Буташин¹, А. М. Исмаилов³, Ю. В. Григорьев¹, Ю. В. Писаревский¹, В. М. Каневский^{1,2}, А. Е. Благов^{1,2}, М. В. Ковальчук^{1,2}

¹Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН, Москва, Россия ²Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия

³Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

**E-mail: jernova.v@yandex.ru* Поступила в редакцию 17.11.2023 г. После доработки 05.12.2023 г. Принята к публикации 05.12.2023 г.

Представлены результаты исследования структурных особенностей образцов пленок оксида цинка, полученных методом магнетронного осаждения на сколах гексаалюмината лантана-магния и поверхности сапфировых подложек с буферным слоем золота. Анализ структуры и морфологии пленок проведен с применением комплекса методов, включая высокоразрешающую ренттеновскую дифрактометрию, метод построения полюсных фигур и просвечивающую электронную микроскопию. Показано, что при использовании сколов гексаалюмината лантана-магния формируется эпитаксиальная пленка ZnO без признаков ростовых поворотных доменов. Использование буферного слоя золота при росте на сапфировых подложках приводит к улучшению кристаллического качества пленок ZnO, однако полного подавления доменного роста не происходит.

DOI: 10.56304/S1992722323600964

введение

В последнее время возрос интерес к пленкам ZnO в связи с возможностью изготовления ультрафиолетовых светоизлучающих и лазерных устройств на их основе [1, 2]. УФ-излучение вызвано рекомбинацией свободного экситона и наблюдается в ZnO при комнатной и даже более высоких температурах [3, 4].

Эффективность световыхода напрямую зависит от структурного совершенства пленок ZnO. Традиционно используемые в светоизлучающих устройствах сапфировые подложки базисной ориентации не полностью удовлетворяют требованиям в связи со значительным рассогласованием решеток пленки и подложки более 18%. Кроме того, азимутально кристаллиты ZnO в базисной плоскости подложки сапфира ориентируются в двух направлениях, образуя ростовые домены, развернутые на 30°. Для повышения кристаллического качества пленок применяются различные методы: подбор подложек, нанесение буферных слоев, подбор параметров синтеза, управление потоками отдельных компонент в процессе роста пленки. В условиях необходимости массового изготовления устройств требуются масштабирование и удешевление процесса синтеза ZnO. С этой точки зрения оптимальными представляются использование буферных слоев и подбор подходящих по параметрам подложек. В связи с этим предлагается использовать буферные слои золота и подложки гексаалюмината лантана-магния LaMgAl₁₁O₁₉. В [5] было показано, что пленка ZnO с буферным слоем золота демонстрирует высокую кристалличность и однородную морфологию поверхности. Монокристалл LaMgAl₁₁O₁₉ имеет совершенную спайность по (0001), что обеспечивает малую шероховатость поверхности скола. При эпитаксии ZnO на сколах LaMgAl₁₁O₁₉ по плоскости (0001) решетка ZnO развернута вокруг общего с LaMgAl₁₁O₁₉ направления [0001] на 30° и рассогласование гексагональных решеток пленки и подложки минимально и составляет ~0.7%.

Эффективными методами исследования особенностей дефектной структуры тонких пленок являются рентгеновские методы [6–9]. Так, в [10] с использованием лабораторного источника рентгеновского излучения проведен анализ пленок ZnO на подложках c-Al₂O₃, и выявлена закономерность изменения латеральной структуры по мере увеличения толщины пленки, зависящая от локального плавающего потенциала в методе магнетронного осаждения.

В данной работе для определения более точных значений параметров структуры был применен метод Вильямсона-Холла, который позволяет разделить вклад в уширение дифракционных пиков от микронапряжений и размеров областей когерентного рассеяния в образце. Для реализации этого метода необходимо знать полуширины трех и более порядков дифракционного отражения. Дифракционные данные, полученные на лабораторном источнике рентгеновского излучения, имеют характерно уширенные кривые дифракционного отражения вследствие влияния инструментальной функции, вклад в которую дают параметры интенсивности соотношения сигнал/шум и расходимости рентгеновского пучка дифрактометра (~350 мкрад). Указанные особенности затрудняют оценку полуширины дальних порядков отражения пленок ZnO. Решением данной проблемы является применение синхротронного излучения (СИ), обладающего ярким источником излучения и низкой угловой расходимостью ~40 мкрал.

В настоящей работе представлены результаты исследования структурных и морфологических особенностей образцов пленок ZnO, полученных методом магнетронного осаждения на сколах гексаалюмината лантана-магния и поверхности сапфировых подложек с буферным слоем золота. Анализ структуры пленок был проведен с использованием как лабораторного источника рентгеновского излучения (аналогично [10]), так и с применением СИ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Подготовка образцов. Пленки ZnO осаждали в камере магнетронного распыления на подложки двух типов: тип I – свежие (полученные непосредственно перед нанесением пленки) сколы монокристаллов LaMgAl₁₁O₁₉ ориентации (0001) [11]; тип II – Al₂O₃ с ориентацией (0001) с буферным подслоем золота [12]. Подложки нагревали до температуры 650°C в атмосфере кислорода при давлении 1.33 Па и постоянном токе (плотность тока j = 10-60 мА см⁻²), скорость роста пленки составляла ~2 нм с⁻¹. В [6] было показано, что рекристаллов LaMgAl₁₁O₁₉ при температуре 650°С не происходит. Буферный подслой золота, в соответствии с [5], использовали для повышения эпитаксиального качества пленки ZnO.

Рентгенодифракционные исследования. Синхротронные дифракционные исследования проводили на станции РКФМ "КИСИ-Курчатов" на энергии 16 кэВ. Монохроматизацию излучения осуществляли с использованием двухкристального монохроматора Si [111]. Кривые дифракционного отражения (КДО) регистрировали в двухкристальной схеме. Регистрацию дифрагированного излучения осуществляли интегральным сцинтилляционным детектором. Размер пучка перед образцом определялся щелями и составлял 0.1×0.1 мм². Подробная информация об оптической схеме и параметрах синхротронной станиии приведена в [13]. Стандартные методики регистрации КДО в режиме 0/20-сканирования и кривых качания путем ω -сканирования описаны в [10, 14].

Лабораторные исследования проводили на рентгеновском дифрактометре, оснащенном источником с вращающимся анодом, излучение $CuK_{\alpha 1}$ ($\lambda = 1.54056$ Å). Регистрацию дифракционных зависимостей осуществляли в двухкристальной рентгенооптической схеме с использованием монохроматора Ge [220] с двукратным отражением при горизонтальном расположении образца в геометрии Брэгга.

Метод построения полюсных фигур ($\Pi \Phi$) позволяет выявить преимущественную ориентацию зерен пленки или распределение их ориентаций (текстура), получить информацию о кристаллографической симметрии в образце [15, 16]. Полюсные фигуры образцов были получены на лабораторном источнике рентгеновского излучения.

В настоящей работе определяли разориентацию выбранных кристаллических плоскостей пленки относительно решетки подложки в латеральной плоскости (плоскости границы раздела пленка/подложка). С этой целью осуществляли сканирование по угловой оси гониометра φ вокруг нормали к поверхности подложки для выбранных асимметричных отражений пленки $11\overline{2}2$ и подложки $11\overline{2}9$.

Расчет кристаллографических параметров структуры проводили в нормальном направлении — вдоль оси q_z (ось регистрации КДО) с помощью метода Вильямсона—Холла, позволяющего разделить вклад микронапряжений в структуре и размера областей когерентного рассеяния (**ОКР**) в уширение дифракционных пиков исследуемых пленок ZnO [17]:

$$(\text{FWHM}(2\theta)\cos(\theta))^2 = (\varepsilon \times 4\sin(\theta))^2 + (\frac{\lambda}{L})^2,$$

где FWHM(2 θ) — полуширина *i*-го дифракционного пика пленки на КДО, построенной в двойных углах, $\theta_{3\kappa cn}$ — экспериментальный угол Брэгга, λ — длина волны используемого излучения, ε — микронапряжения в структуре пленки, L — размер OKP.

Зависимость величины FWHM(2θ)·cos(θ) от 4sin θ для отражений 002, 004, 006 была аппроксимирована линейной функцией и определены *L* и ε .

Исследования методами электронной микроскопии. Пробоподготовку образцов для просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) проводили на растровом электронно-ионном микроскопе (РЭМ) "Scios" (FEI, США). По стандартной методике с помощью фокусированного ионного пучка (ФИП) были приготовлены поперечные срезы структур "пленка/подложка" перпендикулярно центральной оси роста стержневидных отростков тетраподов ZnO. Для защиты поверхности образца при его приготовлении наносили технологический слой Pt толщиной 1-3 мкм со всех сторон образца. Поперечные срезы изучали на ПЭМ "Osiris" (FEI, USA) при ускоряющем напряжении 200 кВ в режимах ПЭМ, высокоразрешающей электронной микроскопии (ВРЭМ), сканирующе-просвечивающей электронной микроскопии (СПЭМ), а также с использованием рентгеновского энергодисперсионного спектрометра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгенодифракционные исследования. На рис. 1а представлена дифрактограмма образца $ZnO/Au/Al_2O_3$ в широком угловом диапазоне, отмечены дифракционные индексы отражений от кристаллографических плоскостей пленки ZnO и подложки Al_2O_3 . На дифрактограмме отмечены порядки отражений для семейства плоскостей (0001) пленки и подложки, а также отражения слоя Au. Дифрактограмма образца ZnO/LaMgAl₁₁O₁₉ имела аналогичный вид. Синхротронные исследования (рис. 16–1д) позволили выявить в образцах пленок ZnO как несовершенство их кристаллической структуры, так и ряд ее особенностей.

На рис. 16, 1в показаны полученные на источнике СИ КДО 0004 ZnO исследуемых образцов ZnO/Au/Al₂O₃ и ZnO/LaMgAl₁₁O₁₉ соответственно. В случае образца ZnO/Au/Al₂O₃ максимум интенсивности соответствует величине угла Брэгга $\theta_{\rm B} = 17.154^{\circ}$, а в случае ZnO/LaMgAl₁₁O₁₉ – $\theta_{\rm B} = 17.275^{\circ}$, что согласуется с данными [18]. С использованием полученных величин полуширины КДО на полувысоте (FWHM) и углов $\theta_{\rm B}$ были определены средние размеры ОКР и микронапряжения в структуре пленок по формуле (1), которые составили: $L = 855 \pm 129$ нм, $\varepsilon_{\rm эксп} = 0.020 \pm$

Таблица 1. Структурные параметры исследуемых пленок ZnO, определенные по экспериментальным данным

| | $\epsilon_{_{ m SKCII}},\%$ | L, нм | δ, град |
|---|-----------------------------|-----------|-----------------|
| Образец ZnO/Au/Al ₂ O ₃ | 0.020 ± 0.003 | 855 ± 129 | 0.44 ± 0.05 |
| Образец ZnO/LaMgAl ₁₁ O ₁₉ | 0.054 ± 0.023 | 170 ± 12 | 0.23 ± 0.02 |

 \pm 0.003% для образца ZnO/Au/Al₂O₃; L = 170 \pm \pm 12 нм, $\epsilon_{_{ЭКСП}}$ = 0.054 \pm 0.023% для образца ZnO/LaMgAl₁₁O₁₉ (табл. 1).

На рис. 1г, 1д представлены зависимости интенсивности отражений 0002, 0004, 0006 исследуемых образцов пленок ZnO, полученные в режиме ω -сканирования. Видно, что для каждого из образцов полуширины кривых отражения указанных рефлексов практически совпадают. По порядку величины уширение указанных кривых свидетельствует о наличии мозаичной структуры и значительном разбросе по углам наклона кристаллитов в пленках ZnO (табл. 1). Поскольку ширина пиков (рис. 1г, 1д) не изменяется в зависимости от порядка отражения, не представляется возможным оценить латеральный размер OKP в соответствии с [19].

Также по экспериментальным синхротронным данным были определены величины разброса по углам наклона кристаллитов δ в структуре исследуемых пленок ZnO (табл. 1). Величина δ соответствует полуширине кривой отражения, полученной в режиме ω -сканирования (рис. 1г, 1д).

Экспериментально определена латеральная разориентация кристаллической решетки пленки ZnO относительно решетки подложки. В направлении [$11\overline{2}0$] кристаллографические элементарные ячейки пленки ZnO образцов ZnO/Au/Al₂O₃ и ZnO/LaMgAl₁₁O₁₉ разориентированы относительно подложки на 30° (рис. 26, 2г), но в структуре пленки образца ZnO/Au/Al₂O₃ также присутствуют кристаллиты, ориентация которых совпадает с ориентацией подложки (рис. 26).

На рис. 2а представлена экспериментальная ПФ образца ZnO/Au/Al₂O₃, дифракционные отражения обозначены стрелками. Уширение отражения (11 $\overline{2}2$) ZnO вдоль азимутального угла сканирования подтверждает вывод о наличии аморфной составляющей слоя и мозаичности структуры. На ПФ образца ZnO/LaMgAl₁₁O₁₉ (рис. 2в) отражения (11 $\overline{2}2$) являются "точечными", из чего можно сделать вывод о малой разориентации кристаллитов в плоскости слоя (относительно направления [11 $\overline{2}2$]).



Рис. 1. Экспериментальные зависимости интенсивности дифракционного отражения образцов пленки ZnO: а – KДO образца ZnO/Au/Al₂O₃ в широком угловом диапазоне, б, в – KДO 0004 образцов ZnO/Au/Al₂O₃ и ZnO/LaMgAl₁₁O₁₉ соответственно, FWHM – полуширина кривой отражения, г, д – зависимости интенсивности отражений 0002 (треугольник), 0004 (квадрат) и 0006 (круг) образцов ZnO/Au/Al₂O₃ и ZnO/LaMgAl₁₁O₁₉ соответственно, полученные в режиме ω -сканирования.

РОССИЙСКИЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ том 19 № 1 2024



Рис. 2. Полюсные фигуры исследуемых образцов ZnO/Au/Al₂O₃ (a) и ZnO/LaMgAl₁₁O₁₉ (б) и их азимутальные сечения (б, г), отражение $11\overline{2}2$; б, г – пунктирной линией показаны отражения подложки Al₂O₃, сплошной линией – пленки ZnO. Результаты получены на лабораторном рентгеновском дифрактометре.

Исследования методами электронной микроскопии. Для исследования образца ZnO/Au/Al₂O₃ методом РЭМ с использованием ФИП были сделаны углубления для наблюдения слоистой структуры образца, а также выполнена полировка грани перпендикулярной поверхности образца для выявления толщины слоя ZnO, а также слоя Аи. На рис. За показана микрофотография такого среза с обозначением толщин пленок, характерных для образца. Толщина измеренного слоя ZnO составила ~8.5 мкм, а слоя Аи ~45 нм. Далее была выполнена пробоподготовка образца методом ФИП для ПЭМ с целью выявления тонкой структуры пленки ZnO. На рис. 3б показано СПЭМизображение пленки ZnO. Средняя ширина кристаллитов ZnO, рассчитанная по секущей параллельно поверхности образца, составила 500 нм. При этом ввиду толщины полученного для ПЭМ тонкого среза образца ~70 нм есть вероятность попадания лишь краев кристаллитов в видимую область на изображении электронной микроскопии, так как охвачена лишь малая область от всей кристаллической пленки. Кристаллиты представляют собой столбчатые структуры, которые растут от поверхности и перпендикулярно пленке Аu на всю толщину слоя ZnO. Получены микрофотографии границы раздела двух кристаллитов ZnO. Расчет межплоскостных расстояний структуры по микрофотографиям и преобразованию Фурье показывает соответствие кристаллитов



Рис. 3. Результаты исследований образцов методами электронной микроскопии: а – РЭМ-изображение среза образца $ZnO/Au/Al_2O_3$, б – ВРЭМ-изображение границы раздела кристаллитов ZnO образца $ZnO/Au/Al_2O_3$, в – ПЭМ-изображение слоистой структуры подложки $LaMgAl_{11}O_{19}$, пленки ZnO и напыленными электронным (Pt-*e*) и ионным (Pt-*i*) защитными слоями платины в образце ZnO/LaMgAl_{11}O_{19}, г – ВРЭМ-изображение границы раздела пленки ZnO и подложки $LaMgAl_{11}O_{19}$, в – ВРЭМ-изображение границы раздела пленки ZnO и подложки $LaMgAl_{11}O_{19}$, г – ВРЭМ-изображение границы раздела пленки ZnO и подложки $LaMgAl_{11}O_{19}$.

структуре ZnO. Кристаллиты ZnO развернуты друг относительно друга на различные углы, что было описано ранее.

Также с помощью ФИП был приготовлен образец ZnO/LaMgAl₁₁O₁₉. Толщина кристаллической пленки ZnO составляет от 250 до 300 нм. Пленка состоит из кристаллитов (столбчатых структур), растущих перпендикулярно поверхности кристалла LaMgAl₁₁O₁₉ и имеющих зачастую

границы неровной формы. Верхняя граница пленки имеет волнообразную форму, что, повидимому, связано с разной скоростью роста отдельных кристаллитов. Как показано в [20], преимущественная ориентация пленки ZnO относительно скола кристалла LaMgAl₁₁O₁₉ в направлении (0001) также (0001), что видно на полученных методом ПЭМ микрофотографиях (рис. 3в, 3г).

Из экспериментальных данных (рис. 2) видно, что пленка ZnO образца ZnO/LaMgAl₁₁O₁₉ образована кристаллитами, латерально повернутыми на 30° относительно решетки подложки (тип кристаллитов А). При этом наличие сравнительно узких (полуширина $0.39^{\circ} \pm 0.01^{\circ}$) и ярких пиков отражений на ПФ свидетельствует о незначительном разбросе значений разориентации различных кристаллитов данного типа.

В структуре более толстой пленки ZnO/Au/ Al₂O₃ проявляется бидоменная структура, где присутствует дополнительный тип кристаллитов (тип B), соответствующих случаю роста, когда их латеральная ориентация совпадает с ориентацией подложки. Для кристаллитов А-типа на ПФ также наблюдаются сравнительно узкие пики отражений ($1.03^{\circ} \pm 0.09^{\circ}$), в то время как для B-типа пики значительно уширены ($19^{\circ} \pm 1^{\circ}$) и менее интенсивны, что говорит о достаточно сильной разориентации и несовершенстве кристаллической структуры. Сравнение интегральных интенсивностей пиков на ПФ, соответствующих двум типам кристаллитов, показывает, что объемная доля кристаллитов А-типа составляет лишь ~10%.

Сравнивая эти данные с результатами, полученными в [10], можно предположить, что в случае более толстой пленки ZnO/Au/Al₂O₃ на начальных стадиях также происходит рост кристал-А-типа. ZnO После достижения литов критической толщины ~200 нм пленки ZnO в структуре формируется В-тип кристаллитов. Таким образом, структура пленки ZnO/Au/Al₂O₃ состоит из двух областей: тонкий эпитаксиальный слой ZnO на подложке и основной, более дефектный слой пленки, образованный преимущественно столбчатыми кристаллитами (зернами).

Поскольку возможно, что толщина пленки оксида цинка на подложке LaMgAl₁₁O₁₉ не является критической для формирования В-типа кристаллитов, как описывалось в [10], прямое сравнение двух образцов сложно провести корректно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены рентгенодифракционные исследования структурных и морфологических особенностей образцов пленок оксида цинка, полученных методом магнетронного осаждения на свежих сколах гексаалюмината лантана-магния и поверхности сапфировых подложек с буферным слоем золота. Анализ структуры пленок был проведен с применением лабораторного источника рентгеновского излучения и на источнике синхротронного излучения "КИСИ-Курчатов". Реализованы рентгенодифракционные методы исследования, такие как высокоразрешающая двухкристальная рентгеновская дифрактометрия с использованием СИ и метод построения полюсных фигур, а также были проведены исследования с применением просвечивающей электронной микроскопии.

Рентгенодифракционными методами получены данные как о микроструктуре (строении) образцов пленок ZnO, так и совершенстве их кристаллической структуры. Определены значения микронапряжений в кристаллической структуре, средний размер ОКР по нормали к поверхности подложки, угловой разброс кристаллитов относительно заданной ориентации, дана оценка структурного совершенства полученных пленок. При этом применение СИ позволило получить параметры структуры дефектных кристаллических пленок ZnO/Au/Al₂O₃ и ZnO/LaMgAl₁₁O₁₉ по методу Вильямсона-Холла. Указанные выводы о микроструктуре пленок согласуются с результатами, полученными методами электронной микроскопии.

Обнаружены два типа кристаллитов (доменов) в образце ZnO на подложке сапфира с буферным слоем золота, имеющие различную латеральную ориентацию относительно кристаллической решетки подложки. Показано, что при использовании свежих сколов LaMgAl₁₁O₁₉ формируется эпитаксиальная пленка ZnO без признаков ростовых поворотных доменов.

Авторы выражают благодарность О.А. Кондратьеву (НИЦ "Курчатовский институт") за помощь в реализации рентгенодифракционных экспериментов.

Работа выполнена в рамках Соглашения с Минобрнауки РФ от "12" октября 2021 г. № 075-15-2021-1362 (продолжение) в части роста пленок ZnO и проведения рентгеновских и синхротронных экспериментов, а также Госзадания НИЦ "Курчатовский институт" в части кристаллохимического анализа, электронной микроскопии и рентгеновского анализа структуры пленок ZnO с использованием оборудования ЦКП "Структурная диагностика материалов" Кристаллография и фотоника" НИЦ Курчатовский Институт".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Xu L., Kuang W., Liu Z., Xian F. // Physica B. 2020.
 V. 583. P. 412010. https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412010
- Tashiro A., Adachi Y., Uchino T. // J. Appl. Phys. 2023.
 V. 133. № 22. P. 221101. https://doi.org/10.1063/5.0142719
- 3. *Li Z., Lu Q., Qi C. et al.* // J. Lumin. 2018. V. 204. P. 5. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.07.020
- Lu T.C., Ke M.Y., Yang S.C. et al. // Opt. Lett. 2010. V. 35. № 24. P. 4109. https://doi.org/10.1364/OL.35.004109
- Zhang Y., Sun G., Zhao H. et al. // Phys. Scripta. 2011.
 V. 84. № 4. P. 045402. https://doi.org/10.1088/0031-8949/84/04/045402

- Kim S.S., Moon J.H., Lee B. et al. // J. Appl. Phys. 2004. V. 95. № 2. P. 454. https://doi.org/10.1063/1.1632547
- Zhou H., Wang H.Q., Li Y. et al. // ACS Appl. Mater. Inter. 2014. V. 6. № 16. P. 13823. https://doi.org/10.1021/am503256p
- Фоломешкин М.С., Волковский Ю.А., Просеков П.А. и др. // Кристаллография. 2022. Т. 67. № 3. С. 317. https://doi.org/10.31857/S0023476122030079
- 9. Благов А.Е., Галиев Г.Б., Имамов Р.М. и др. // Кристаллография. 2017. Т. 62. № 3. С. 355. https://doi.org/10.7868/S002347611703002X
- Волковский Ю.А., Жернова В.А., Фоломешкин М.С. и др. // Кристаллография. 2023. Т. 68. № 2. С. 180. https://doi.org/10.31857/S0023476123020212
- 11. Буташин А.В., Муслимов А.Э., Федоров В.А. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исслед. 2019. № 10. С. 65. https://doi.org/10.1134/S020735281910007X
- 12. *Muslimov A.E., Butashin A.V., Kolymagin A.B. et al.* // Crystallography Reports. 2015. V. 61. № 1. P. 63. https://doi.org/10.1134/s1063774516010156

- 13. Кон В.Г., Просеков П.А., Серегин А.Ю. и др. // Кристаллография. 2019. Т. 64. № 1. С. 29.
- 14. *Bowen D.K., Tanner B.K.* High resolution X-ray diffractometry and topography. CRC press, 1998. 275 p.
- 15. *Birkholz M.* // Thin film analysis by X-ray scattering. John Wiley & Sons, 2006. P. 183.
- Благов А.Е., Васильев А.Л., Дмитриев В.П. и др. // Кристаллография. 2017. Т. 62. № 5. С. 716. https://doi.org/10.7868/S0023476117050034
- Mote V., Purushotham Y., Dole B. et al. // J. Theor. Appl. Phys. 2012. V. 6. P. 1. https://doi.org/10.1186/2251-7235-6-6
- Kisi E.H., Elcombe M.M. // Acta. Cryst. C. 1989. V. 45. № 12. P. 1867. https://doi.org/10.1107/S0108270189004269
- 19. *Moram M.A., Vickers M.E.* // Rep. Prog. Phys. 2009. V. 72. № 3. P. 036502.
- 20. Архарова Н.А., Муслимов А.Э., Буташин А.В. и др. // Кристаллография. 2020. Т. 65. № 3. С. 484. https://doi.org/10.31857/S0023476120030042