

УДК 548.4+535.341+535.37

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ДЕФЕКТЫ И СОСТАВ КРИСТАЛЛОВ $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$

© 2017 г. О. А. Бузанов¹, М. И. Воронова², Е. В. Забелина², А. П. Козлова^{2, *},
Н. С. Козлова², Е. А. Скрылева², Д. А. Спасский^{2, 3}, К. Д. Щербачев²

¹ОАО “Фомос-Материалс”, Россия, 107023 Москва, ул. Буженинова, 16

²Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, Россия
119049 Москва, Ленинский пр. 4

³Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Россия, Москва, 119234 Ленинские горы, 1
e-mail: ane4kot@mail.ru

Поступила в редакцию 27.08.2016 г.

В атмосферах аргона и аргона с двумя процентами кислорода выращены кристаллы $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$. Показано, что атмосфера роста оказывает значительное влияние на соотношения основных элементов, формирующих структуру кристаллов, их окраску, наличие и интенсивность полос поглощения в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах спектра. Установлено, что в кристаллах присутствуют дефекты двух типов: плоские межзельные дефекты и вакансионные дефекты с формой, близкой к сферической.

Ключевые слова: лангатаг, атмосфера выращивания, спектры пропускания, дефекты, полосы поглощения, состав, структура, диффузное рассеяние рентгеновских лучей, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, анизотропия

DOI: 10.7868/S0002337X17050049

ВВЕДЕНИЕ

Лантан-галлиевый танталат (лангатаг, ЛГТ, $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$) – кристалл со структурой кальций-галлогерманата, точечная группа симметрии 32, пр. гр. $P321$. Кристаллы с данной структурой обладают уникальной комбинацией термических, электрохимических и оптических свойств, что открывает для них возможность практического применения в различных областях. В силу строения и симметрии кристаллы с данной структурой относятся к пьезоэлектрическим материалам и при этом не проявляют пиро- и сегнетоэлектрических свойств [1, 2]. ЛГТ не гигроскопичен [1, 2], фазовый переход $P321 \rightarrow A2$ наблюдается только при условиях высокого давления (~12 ГПа) [3].

Температурная стабильность пьезоэлектрических коэффициентов ЛГТ позволяет использовать его для высокотемпературных сенсоров различных физических величин [4, 5].

Кристаллы ЛГТ являются синтетическими и были впервые выращены в 80-е годы для применения в области лазерной физики. Недостаточное оптическое качество выращиваемых кристаллов и небольшой размер получаемых буль стали причинами, по которым использование ЛГТ в данной сфере не развивалось. В последнее десяти-

летие было достигнуто существенное улучшение оптического качества выращиваемых ЛГТ, что позволяет рассматривать их в качестве нелинейных кристаллов для перестраиваемых лазеров с характеристиками, сравнимыми с широко используемым для этих целей KTiOPO_4 [6], фосфоров, легированных РЗЭ, ап-конверсионных материалов, лазеров, а также сцинтилляционных кристаллов.

Как правило, кристаллы ЛГТ растут в защитной атмосфере аргона с добавлением кислорода или в чистом аргоне. При выращивании в инертной атмосфере наблюдается испарение оксида галлия с поверхности расплава, что приводит к нарушению его стехиометрии [7, 8]. Добавление в атмосферу ростовой камеры кислорода подавляет это испарение, при этом полученные кристаллы имеют желтоватую окраску из-за наличия полосы поглощения с максимумом в области 480–490 нм, что неприемлемо для оптических применений. Кроме этой полосы, при комнатной температуре в области прозрачности кристалла также наблюдается несколько полос в УФ-области [6, 9, 10].

Свойства кристаллов, полученных в кислородсодержащей атмосфере, достаточны для их пьезо-

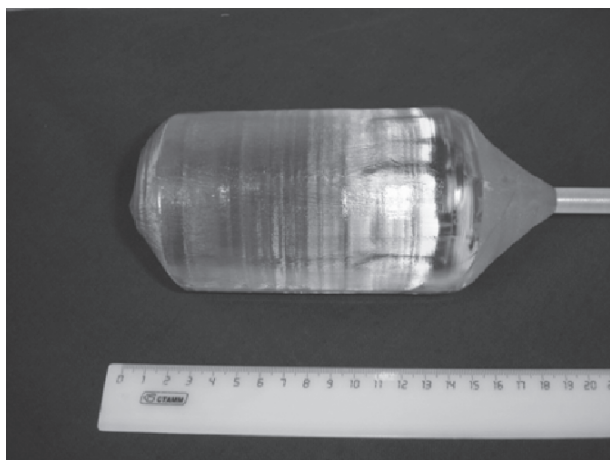


Рис. 1. Кристалл ЛГТ, полученный в атмосфере аргона с 2 об. % кислорода.

применений при температурах вплоть до 600°C, однако величина электросопротивления кристаллов, полученных в инертной атмосфере, превышает электросопротивление кристаллов, полученных в кислородсодержащей атмосфере, по крайней мере в 10–15 раз в диапазоне температур 350–600°C, что более предпочтительно при применении данных кристаллов в качестве рабочих элементов высокотемпературных датчиков давления [11].

Несмотря на интенсивные исследования оптических и электрических свойств ЛГТ [12, 13], природа дефектов, отвечающих за появление полос поглощения в области прозрачности кристалла, до сих пор не выяснена.

Основной целью настоящей работы является исследование оптических свойств, состава и структурных особенностей нелегированных кристаллов $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$, выращенных в разных атмосферах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Выращивание кристаллов. Кристаллы $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ выращивались в компании “Фомос-Материалс” методом Чохральского в усовершенствованных установках “Кристалл–3м” с индуктивно нагреваемым иридиевым тиглем цилиндрической формы.

Исходная шихта была подготовлена методом твердофазного синтеза. В качестве исходных компонентов использованы Ta_2O_5 , La_2O_3 и Ga_2O_3 чистотой не хуже 99.99% (4Н). Данные оксиды смешивали с учетом стехиометрических пропорций компонентов согласно формуле $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$, нагревали до температуры синтеза и спекали на воздухе при 1420°C в течение 8 ч. Полноту протекания процесса контролировали с помощью рентгенофазового метода. Основная фаза конечного продукта в виде профилированной таб-

летки с плотностью, близкой к плотности кристалла, содержала не менее 95% фазы ЛГТ от исходной массы компонентов.

Плавление исходной шихты и рост кристалла осуществляли в защитной атмосфере чистого аргона или аргона с добавлением кислорода (2 об. % O_2).

Ориентация затравки – вдоль кристаллографической оси $[11\bar{2}0]$, скорость вытягивания кристалла – 2 мм/ч, скорость вращения затравки – 10–15 об./мин.

В инертной атмосфере аргона были получены кристаллы ЛГТ массой не менее 2 кг, с диаметром и длиной цилиндрической части 60 и 120 мм соответственно. Вес кристаллов, выращенных в кислородсодержащей атмосфере, составлял 6 кг, диаметр и длина цилиндрических частей – 120 и 130 мм соответственно.

Цвет кристалла варьируется в зависимости от содержания кислорода в атмосфере ростовой камеры от бесцветного (содержание кислорода 0%) до янтарного (содержание кислорода 2%). Все кристаллы прозрачные, однородно окрашенные по всему объему, без трещин и других видимых дефектов, при исследовании с использованием гелий-неонового лазера рассеивающие центры не наблюдались.

Характерный кристалл ЛГТ, полученный в атмосфере аргона с 2% кислорода, показан на рис. 1.

Методы исследования и образцы. Использовали образцы в виде полированных пластин полярного X-среза толщиной порядка 2 мм (ось X совпадает с осью 2-го порядка).

Спектры оптического пропускания измеряли на спектрофотометре Cary-5000 (Agilent Technologies) в аккредитованной межкафедральной учебно-испытательной лаборатории полупроводниковых материалов и диэлектриков “Монокристаллы и заготовки на их основе” (НИТУ “МИСиС”).

Состав и дефекты изучали в Центре коллективного пользования (НИТУ “МИСиС”) с помощью следующих методов:

- диффузное рассеяние рентгеновских лучей (ДРРЛ) на рентгеновском дифрактометре D8 Discover (Bruker-AXS, Германия) с трехкристалльной схемой,

- рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) на рентгеновском фотоэлектронном спектрометре PHI 5500 ESCA (Physical Electronics),

- энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (EDS) на полевом эмиссионном растровом электронном микроскопе JSM-6700F с приставкой для энергодисперсионной спектроскопии JED-2300F (JEOL, Япония).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние условий выращивания на вид спектров поглощения. Известно [8, 12, 14, 15], что атмосфера роста существенно влияет на окраску кристаллов и, как следствие, на вид спектров поглощения кристаллов ЛГТ: бесцветные кристаллы ЛГТ получают в бескислородной аргоновой атмосфере, а окрашенные кристаллы – в атмосфере с добавлением кислорода.

В спектрах поглощения ЛГТ в ультрафиолетовом и видимом диапазонах (рис. 2а) наблюдаются три полосы поглощения в окрашенных кристаллах (290, 370 и 480 нм) и только одна полоса в бесцветных кристаллах (290 нм).

В кристалле, полученном в атмосфере $\text{Ar} + 2\% \text{O}_2$, в ИК-области обнаружены две полосы поглощения при 1750–1950 и 2920 нм (рис. 2б, 2в). Причем полоса в области 1750–1950 нм двойная, с максимумами при ~1835 и ~1870 нм.

В аргоновых кристаллах в ИК-области спектра наблюдается интерференция, по всей видимости, связанная с отклонением поверхностей образца от параллельности (рис. 2б).

До настоящего времени природа полос поглощения в данных кристаллах остается неясной. Анализ литературных данных показал, что полосы в ближней ультрафиолетовой и видимой областях наблюдаются приблизительно на тех же диапазонах длин волн во всех кристаллах со структурой кальций-галлогерманата независимо от катионов, формирующих эту структуру, и материала тигля [10, 15, 16]. Интенсивность данных полос напрямую связана с концентрацией кислорода в атмосфере роста, однако это нелинейная зависимость [15].

Полоса поглощения при 480 нм устойчиво ассоциируется с кислородными вакансиями и их комплексами [15]. Полосу при 2920 нм связывают с OH^- -группой [17]. Природа полос при 290, 370 и 1850 нм не определена.

Элементный состав кристаллов. Различия оптических свойств может свидетельствовать о различиях в составе кристаллов, выращенных в разных атмосферах [18]. В связи с этим был проведен анализ элементного состава кристаллов в зависимости от атмосферы выращивания методами РФЭС и полевой эмиссионной растровой электронной микроскопии. Данные испытания проводились для образцов 1 (атмосфера роста Ar) и 2 (атмосфера роста $\text{Ar} + 2\% \text{O}_2$).

При исследованиях образцов методом РФЭС для возбуждения фотоэмиссии использовали излучение AlK_α ($h\nu = 1486.6$ эВ) мощностью 300 Вт. Давление остаточных газов в камере составляло 6×10^{-8} Па. Атомные концентрации элементов определяли по обзорным спектрам методом факторов относительной чувствительности, исполь-

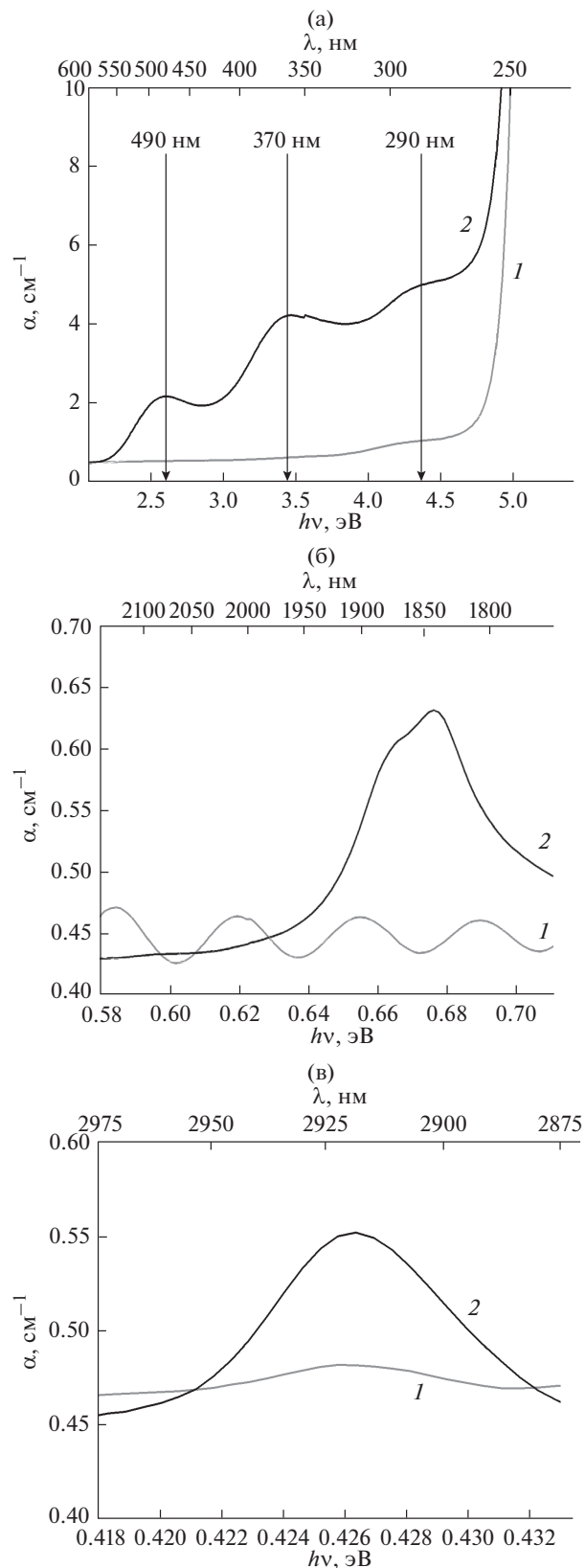


Рис. 2. Характерные полосы поглощения для кристаллов ЛГТ, полученных в различных атмосферах (1 – Ar , 2 – $\text{Ar} + 2\% \text{O}_2$) в диапазонах длин волн: 250–600 (а), 1750–2100 (б), 2875–2975 нм (в).

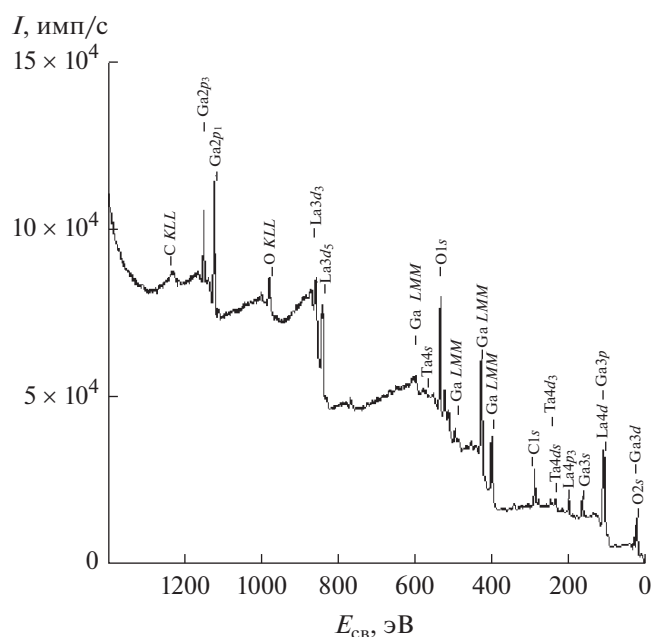


Рис. 3. Обзорный спектр образца 1.

зую возможности программного обеспечения PC ACCESS ESCA V7.2c. Спектры высокого разрешения (ВР) снимали при энергии пропускания анализатора 29.35 эВ и плотности сбора данных 0.25 эВ/шаг.

Для проведения эксперимента на воздухе откальвалась часть образца. Диаметр области анализа по поверхности составлял 600 мкм.

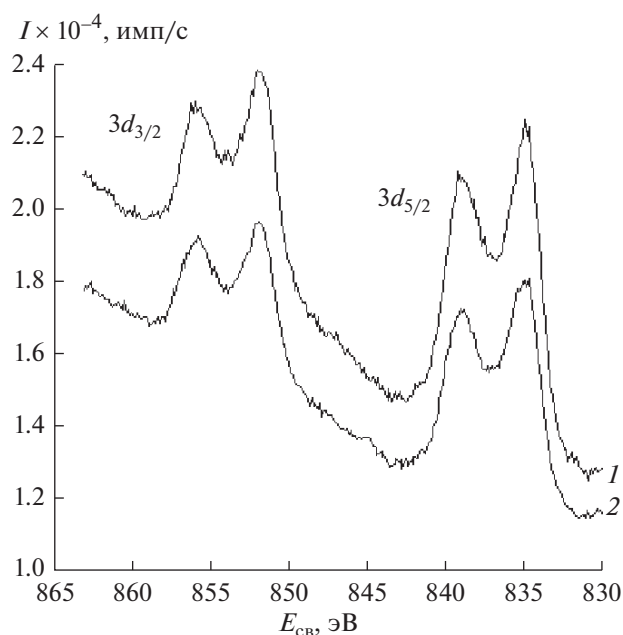
При исследовании образцов в исходном состоянии (до очистки) было обнаружено большое количество адсорбированного углерода (рис. 3). Слой адсорбированных примесей уменьшает интенсивность линий основных компонентов; чем меньше средняя длина свободного пробега фотоэлектронов λ , тем сильнее это уменьшение.

Для расчета отношений атомных концентраций катионов использовали интегральные интенсивности линий $La3d_5$, $Ga2p_3$ и $Ta4d$. Значения λ для линий $Ga2p_3$, $La3d_5$ и $Ta4d$ отличаются и составляют 0.9, 1.3 и 2.2 нм соответственно.

Для устранения влияния адсорбированных примесей на результаты количественного анали-

Таблица 1. Отношения концентраций катионов, полученные методом РФЭС, в образцах кристаллов, выращенных в различных атмосферах

| Образец (атмосфера выращивания) | Ga/La | Ga/Ta | La/Ta |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 (Ar) | r_1 | r_2 | r_3 |
| 2 (Ar + 2% O ₂) | $0.95r_1$ | $0.98r_2$ | $1.02r_3$ |

Рис. 4. Спектры $La3d$ поверхности сколов образцов 1 и 2.

за была проведена очистка поверхностей сколов путем бомбардировки поверхности ионами аргона низких энергий (150–200 эВ).

Установлено, что образцы кристаллов ЛГТ, выращенных в разных атмосферах, отличаются соотношением катионов (табл. 1): соотношение Ga/La в образцах различается в 1.05 раза, а Ga/Ta – в 1.02 раза, в обоих случаях оно выше в образце 1.

Данные РФЭС свидетельствуют о том, что в зависимости от атмосферы выращивания в кристаллах наблюдается различное отношение концентраций катионов Ga/La и Ga/Ta. Таким образом, отличие в оптических свойствах кристаллов может быть связано с различием их составов.

Спектры ВР $La3d$, $Ga2p_3$ и $Ta4d$ образцов 1 и 2 при наложении друг на друга показаны на рис. 4–6.

Видно, что отличий в спектрах практически нет. Энергии связи попадают в диапазон справочных значений [19] соответствующих оксидов и соответствуют химическому состоянию ионов La^{3+} , Ga^{3+} , Ta^{5+} в координации кислородом: $La3d_{5/2} - 834.9 \pm 0.25$ эВ, $Ga3p - 1117.9 \pm 0.25$ эВ и $Ta4d_{5/2} - 230.1 \pm 0.25$ эВ.

В спектрах $La3d$ (рис. 4) слева от основных пиков дублета присутствуют линии сателлитов, что характерно для спектров $La3d$ в оксидах. Это показано при исследовании порошка La_2O_3 . Исходная поверхность порошка представляет собой слой LaO_xOH_y , что видно по спектру кислорода O1s, который состоит из двух пиков: 1 – оксидный, 2 – гидроксидный (рис. 7). После очистки

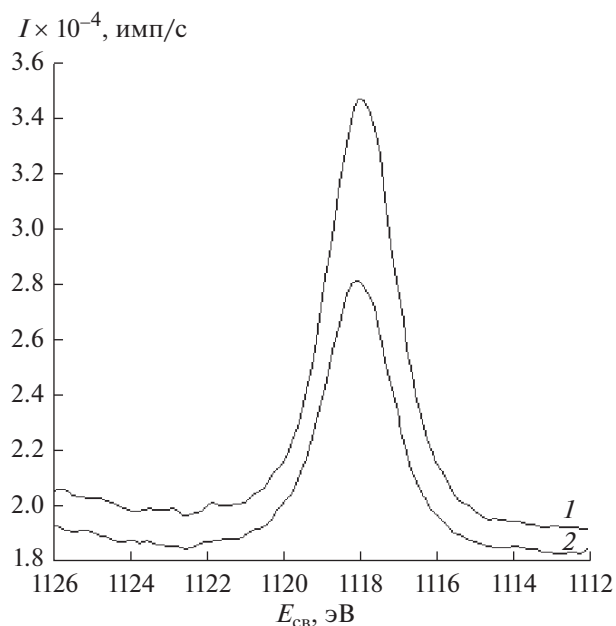


Рис. 5. Спектры Ga2p₃ поверхности сколов образцов 1 и 2.

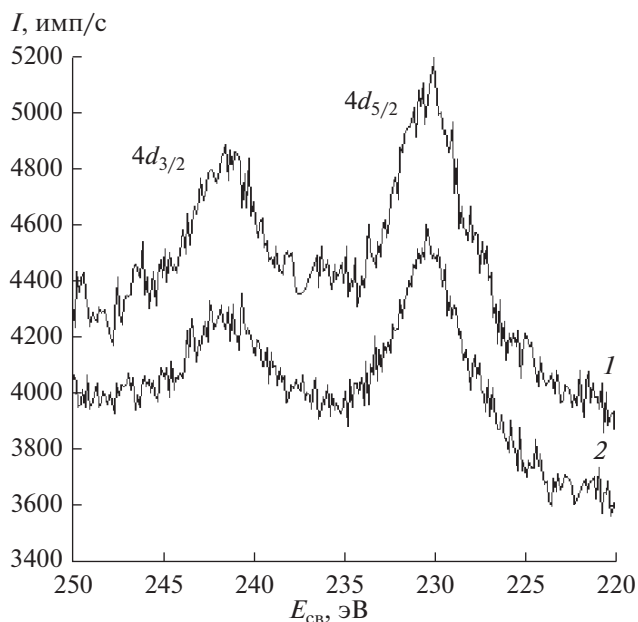


Рис. 6. Спектры Ta4d поверхности сколов образцов 1 и 2.

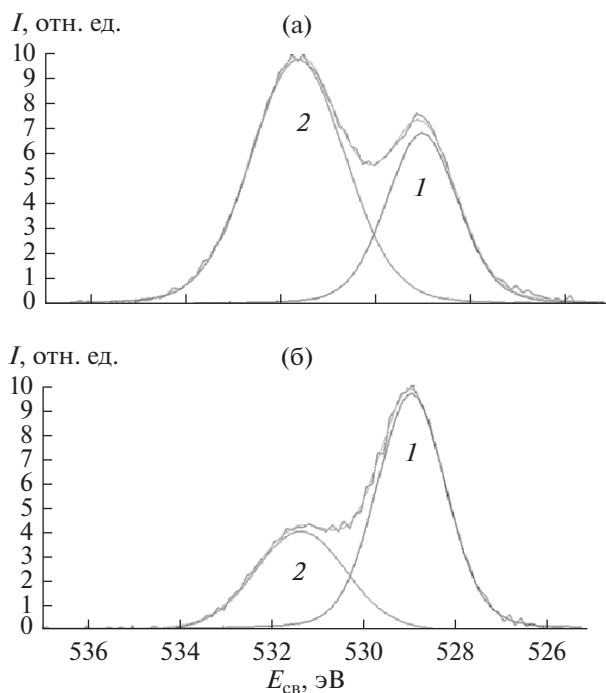


Рис. 7. Спектры O1s порошка La₂O₃: до (а), после очистки (б): 1 – оксидный, 2 – гидроксидный.

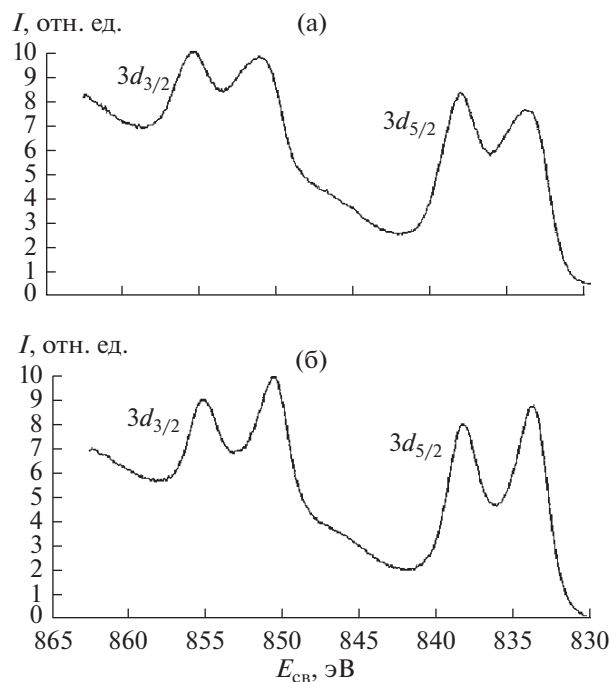


Рис. 8. Спектры La3d порошка La₂O₃: до (а), после очистки (б).

доля гидроксидного пика значительно уменьшилась, спектр La3d имеет те же характерные черты, что и образцы 1, 2 – сателлиты с высокоэнергетической стороны от пиков 3d_{5/2} и 3d_{3/2} (рис. 8).

Поскольку РФЭС позволяет изучать элементный состав в приповерхностных областях

глубиной в несколько элементарных ячеек, с целью получения информации о более глубоких слоях образца были проведены исследования методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, который позволяет получать информацию об элементном составе кристалла на глубине 10⁴ Å (1 мкм). Анализ проводили в

Таблица 2. Отношения концентраций катионов, определенные методом EDS, в образцах кристаллов, выращенных в различных атмосферах

| Образец (атмосфера выращивания) | Ga/La | Ga/Ta | La/Ta |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| <i>I</i> (Ar) | r_1 | r_2 | r_3 |
| 2 (Ar + 2% O ₂) | $0.95r_1$ | $0.93r_2$ | $0.98r_3$ |

трех различных областях скола, площадь области анализа 60×40 мкм².

В связи с тем, что концентрация кислорода оказалась завышенной из-за наложения с пиком лантана, концентрации катионов соединения оказались заниженными, и точный элементный состав установить не удалось.

Для сопоставления элементного состава образцов, полученных в разных атмосферах, были рассчитаны соотношения концентраций катионов (табл. 2). Данные по соотношению концентраций катионов Ga/La и Ga/Ta, полученные методом EDS (табл. 2), так же, как и данные, полученные методом РФЭС (табл. 1), свидетельствуют о том, что в зависимости от атмосферы выращивания в кристаллах наблюдается различие в соотношении основных элементов. Однако если соотношение концентраций Ga/La остается постоянным как на глубине в десятки ангстрем (РФЭС), так и на глубине порядка 10^4 Å (EDS), то величина соотношений Ga/Ta и La/Ta убывает с увеличением глубины. Это, по-видимому, связано с процессами, проходящими в приповерхностных слоях образца, в частности, с абсорбцией элементов из окружающей атмосферы, что может приводить к возникновению градиента состава.

Таким образом, методами РФЭС и EDS показано, что атмосфера выращивания влияет на элементный состав образцов, при этом наблюдается изменение состава образцов от поверхности вглубь.

Дефектная структура кристаллов. Исследование дефектной структуры кристаллов проводилось методом ДРПЛ, который позволяет определять наличие и тип кластеров дефектов размером от сотен Å (десятков нм). Для данных измерений образцы были ориентированы таким образом, что нормаль к поверхности (110) и направление (001) располагались в плоскости дифракции. Распределение интенсивностей $I(q_x, q_z)$ рентгеновского диффузного рассеяния измеряли вокруг обратного узла решетки (220). Параметры q_x и q_z — проекции вектора q на плоскость дифракции в направлениях (001) и (110) соответственно; вектор $q = Q - H$ описывает отклонения вектора дифракции Q от узла обратной решетки, задаваемого вектором обратной решетки H . Распределение

интенсивности ДРПЛ $I(q_x, q_z)$ (изодиффузные контуры), измеренное вокруг обратного узла решетки (220), в кристаллах ЛГТ, выращенных в атмосфере аргона и аргона с добавлением 2% кислорода, показано на рис. 9а, 9б.

Асимметричная часть ДРПЛ, которая определяет направление сдвига центра тяжести изодиффузных контуров вдоль q_z в соответствии со знаком изменения объема матрицы ΔV при введении в нее дефекта, вычисляется следующим образом:

$$I_{as}(q) = \frac{I_{exp}(q) - I_{exp}(-q)}{2}. \quad (1)$$

Форма изодиффузных контуров зависит от симметрии поля смещения ($u(r)$) и знака, вызванного дефектом изменения объема кристалла ΔV . Так, для микродефектов, образованных из межузельных атомов, $\Delta V > 0$ и смещение распределения диффузного рассеяния происходит в направлении положительных q_z ; для дефектов вакансионного типа ($\Delta V < 0$) — в направлении отрицательных q_z . Полученные результаты представлены на рис. 9в и 9г.

Расширение контура в направлении q_x свидетельствует о низкой симметрии поля смещения за счет плоской формы дефектов, а вытянутость вдоль q_z означает, что дефект имеет более изотропное поле смещения, что характерно для дефектов сферической формы.

Таким образом, на основании анализа рис. 9 можно сделать вывод, что в обоих образцах есть дефекты двух типов: плоские дефекты межузельного типа с низкосимметричным полем смещения и дефекты сферической формы вакансионного типа с изотропным полем смещения.

Данные, полученные в результате измерений методом ДРПЛ, свидетельствуют о наличии анизотропных кластеров дефектов.

Ранее [20] параметр решетки образцов ЛГТ был рассчитан исходя из положения пика 220, измеренного в трехкристалльной схеме [21]. Для окрашенного кристалла ЛГТ, выращенного в атмосфере Ar + 2% O₂, величина параметра решетки a меньше, чем для бесцветного кристалла, выращенного в аргоне:

$$a(\text{Ar}) = 8.2345 \pm 0.0001 \text{ \AA} > \\ > a(\text{Ar} + 2\% \text{ O}_2) = 8.2341 \pm 0.0001 \text{ \AA}.$$

Эти результаты хорошо согласуются с данными оптической спектроскопии: полосы поглощения при 290 и 480 нм в образце 2 кристалла ЛГТ связаны, по-видимому, с дефицитом ионов (предположительно, галлия и кислорода), что вызывает сжатие решетки и, следовательно, уменьшение ее параметров.

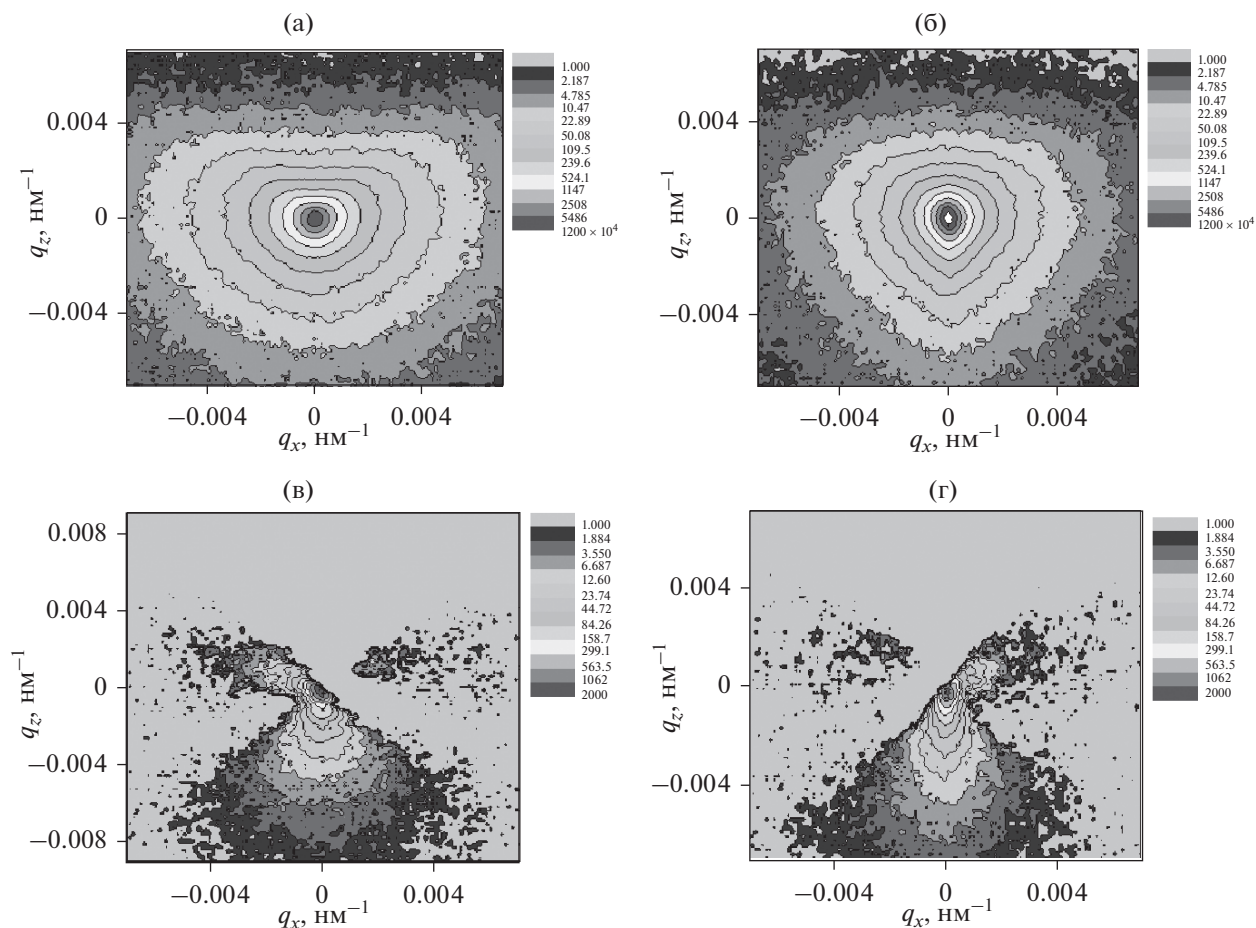


Рис. 9. Изодиффузные контуры, измеренные вокруг узла обратной решетки (220): а и б – измеренные контуры, в и г – асимметричная часть ДРРЛ в ЛГТ(Ar) и ЛГТ(Ar + 2% O₂), соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кристаллы $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ выращены в атмосфере чистого аргона или аргона с добавлением кислорода (2 об. % O₂). Все кристаллы прозрачные, без видимых включений и трещин.

Оптические свойства и элементный состав кристаллов различаются в зависимости от атмосферы выращивания.

Спектры поглощения окрашенных кристаллов характеризуются наличием двух ярковыраженных полос в УФ-области спектра (~290 и ~370 нм), одной в видимой области (~480 нм), двух в ИК-области (1750–1950 и ~2920 нм). В спектрах бесцветных кристаллов наблюдается слабая полоса при ~290 нм.

Данные, полученные методами РФЭС и EDS, свидетельствуют о том, что в зависимости от атмосферы выращивания в кристаллах наблюдается различие в соотношении основных элементов. При этом наблюдается изменение состава образцов от поверхности вглубь. Полученные методом РФЭС энергии связи попадают в диапазон спра-

вочных значений соответствующих оксидов и отвечают химическому состоянию ионов La^{3+} , Ga^{3+} , Ta^{5+} в координации кислородом.

Методом ДРРЛ показано, что в кристаллах присутствуют дефекты двух типов: плоские межзельные дефекты и вакансионные дефекты с формой, близкой к сферической.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Н.С. Козлова, Е.В. Забелина, А.П. Козлова и Д.А. Спасский благодарят за финансовую поддержку Министерство образования и науки Российской Федерации в рамках программы повышения конкурентоспособности НИТУ “МИСиС” (№ КЗ-2015-010).

Н.С. Козлова, Е.В. Забелина, А.П. Козлова благодарят за финансовую поддержку Министерство образования и науки РФ (НИР № 278 тема № 3035023 и 3316023).

Авторы благодарят И.В. Гонтаря за определение элементного состава кристаллов методом энерго-дисперсионной рентгеновской спектроскопии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каминский А.А. Физика и спектроскопия лазерных кристаллов. М.: Наука, 1986. 271 с.
2. Гринева Б.В., Дубовик М.Ф., Толмачев А.В. Оптические монокристаллы сложных оксидных соединений. Харьков: Институт монокристаллов, 2002. 251 с.
3. Mill' B.V., Maximov B.A., Pisarevsky Yu.V., Danilova N.P., Markina M.P., Pavlovska A., Werner S., Schneider J. Phase Transitions in Langasite Family Crystals // (Frequency Control Symposium and Exposition, 2004) Proc. the 2004 IEEE International. 2004. P. 52–60.
4. Bohm J., Heimann R.B., Hengst M., Roewer R., Schindler J. Czochralski Growth and Characterization of Piezoelectric Single Crystals with Langasite Structure: $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ (LGS), $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_{14}$ (LGN) and $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ (LGT): Part I // J. Cryst. Growth. 1999. V. 204. P. 128–136.
5. Takeda H., Tanaka S., Izukawa S., Shimizu H., Nishida T., Shiosaki T. Effective Substitution of Aluminum for Gallium in Langasite-Type Crystals for a Pressure Sensor Use at High Temperature // IEEE Ultrasonics Symp. 2005. V. 1. Iss. 18–21. P. 560–563.
6. Boursier E., Segonds P., Boulanger B., Félix C., Debray J., Jegouso D., Ménaert B., Roshchupkin D., Shoji I. Phase-Matching Directions, Refined Sellmeier Equations, and Second-Order Nonlinear Coefficient of the Infrared Langasite Crystal $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ // Opt. Lett. 2014. V. 39. Issue 13. P. 4033–4036.
7. Uda S., Wang S.Q., Konishi N., Inaba H., Harada J. Growth Habits of 3- and 4-inch Langasite Single Crystals // J. Cryst. Growth. 2002. V. 237–239. P. 707–713.
8. Busanov O.A., Zabelina E.V., Kozlova N.S. Optical Properties of Lanthanum-Gallium Tantalate of Different Growth and Post-Growth Treatment Conditions // Crystallogr. Rep. 2007. V. 52. P. 690–695.
9. Kawanaka H., Takeda H., Shimamura K., Fukuda T. Letter to the Editors. Growth and Characterization of $\text{La}_3\text{Ta}_{0.5}\text{Ga}_{5.5}\text{O}_{14}$ Single Crystals // J. Cryst. Growth. 1998. V. 183. P. 274–277.
10. Yokota Yu., Sato M., Futami Y., Tota K., Yanagida T., Onodera K., Yoshikawa A. Crystal Growth and Physical Properties of Shape-Controlled $\text{La}_3\text{Ta}_{0.5}\text{Ga}_{5.5}\text{O}_{14}$ Single Crystals by Micro-Pulling-Down Method // J. Cryst. Growth. 2012. V. 352. P. 147–150.
11. Бузанов О.А., Козлова Н.С., Забелина Е.В., Козлова А.П., Симинел Н.А. Влияние условий получения на оптические спектры пропускания и электрофизические свойства кристаллов группы лантан-галлиевого силиката // Материалы электронной техники. 2010. № 1. С. 14.
12. Kimura H., Uda S., Buzanov O., Huang X., Koh S. The Effect of Growth Atmosphere and Ir Contamination on Electric Properties of $\text{La}_3\text{Ta}_{0.5}\text{Ga}_{5.5}\text{O}_{14}$ Single Crystal Grown by the Floating Zone and Czochralski Method // J. Electroceram. 2008. V. 20. № 2. P. 73–80.
13. Yaokawa R., Uda S., Kimura H., Aota K. Electrical Conduction Mechanism in Nonstoichiometric $\text{La}_3\text{Ta}_{0.5}\text{Ga}_{5.5}\text{O}_{14}$ // J. Appl. Phys. 2010. V. 108. P. 064112.
14. Uda S., Buzanov O. Growth of a 3" Langasite Crystal with Clear Faceting // J. Cryst. Growth. 2000. V. 211. P. 318.
15. Kozlova N.S., Busanov O.A., Zabelina E.V., Kozlova A.P., Bykova M.B. Point Defects and Dichroism in Langasite and Langatate Crystals // Crystallogr. Rep. 2016. V. 61. № 2. P. 284.
16. Shi X., Yuan D., Wei A., Wang Z., Wang B. Growth and Optical Activity of $\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ (CTGS) Single Crystal // Mater. Res. Bull. 2006. V. 41. № 6. P. 1052.
17. Буташин А.В., Федоров В.А., Мещеряков В.Ф., Миронов В.С., Шилин Л.Г., Бузанов О.А., Забелин А.Н., Сахаров С.А. Оптическая и ЭПР-спектроскопия примесных центров в кристаллах лангасита // Тез. докл. XIII Национальной конф. по росту кристаллов. НКРК-13. Москва (17–22 ноября) 2008. С. 532.
18. Калдыбаева К.А., Константинова А.Ф., Перекалина З.Б. Гиротропия одноосных поглощающих кристаллов. М.: Институт социально-экономических и производственно-экологических проблем инвестирования, 2000. С. 294.
19. Moulder J.F., Stickle W.F., Sobol P.E., Bomben K.D., Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy / Ed. Chastain J. Eden Prairie: Perkin-Elmer, 1992.
20. Buzanov O.A., Kozlova N.S., Zabelina E.V., Didenko I.S., Kozlova A.P., Siminel N.A. Lanthanum Gallium Tantalate – Heterogeneity and Point Defects // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2015. V. 80. P. 012026.
21. Paul F. Fewster. X-Ray Scattering from Semiconductors. 2nd ed. L.: Imperial College Press; 2003. P. 299.