

Д. ф.-м. н. Д. И. БЛЕЦКАН, к. ф.-м. н. А. Р. ЛУКЬЯНЧУК,
Я. М. ПЕКАР

Украина, г. Ужгород, Ужгородский национальный университет,
НПФ «Технокристалл»
E-mail: crystal_lab457@yahoo.com

Дата поступления в редакцию
24.01.2006 г.

Оппонент д. ф.-м. н. М. Я. ВАЛАХ
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ И ПРИМЕСНЫХ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В САПФИРОВЫХ ПОДЛОЖКАХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМИ МЕТОДАМИ

Предложено использовать люминесценцию в качестве экспресс-метода определения собственных и примесных точечных дефектов в кристаллах сапфира и сапфировых подложках.

Сапфировые подложки широко используются в технологии изготовления КНС (кремний-на-сапфире) структур [1] и излучающих гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с множеством квантовых ям [2]. Достоинством КНС-структур является их высокая радиационная стойкость, термостойкость и малое энергопотребление интегральных микросхем на их основе.

Задачи обеспечения быстродействия интегральных схем на КНС-структурах и создания сверхъярких светодиодов на гетероструктурах InGaIn/AlGaIn/GaN требуют высокого качества сапфировых подложек ориентации (11 $\bar{2}$ 0) и (0001) диаметром 50—200 мм. При известном высоком качестве кристаллов сапфира (корунда, α -Al₂O₃), выращенных видоизмененным методом Киропулоса [3], собственные и примесные точечные дефекты, формирующиеся в кристаллах, являются одним из ключевых факторов, влияющих на свойства подложек, вырезанных из них, и на возможность использования последних в опто- и микроэлектронике.

Основными типами собственных точечных дефектов в кристаллах α -Al₂O₃ являются анионные и катионные вакансии, находящиеся в различных зарядовых состояниях (F^+ - и F -центры, $V^=$ - и V^- -центры), междоузельные атомы алюминия, антиструктурные дефекты [4]. Тип и концентрация преобладающих собственных точечных дефектов в решетке альфа-оксида алюминия определяются условиями выращивания кристалла — восстановительными либо окислительными, что сказывается на характере и величине отклонения от стехиометрии. Кроме собственных точечных дефектов, в кристаллах сапфира могут присутствовать дефекты, связанные с остаточными (неконтролируемыми) примесями, прежде всего с примесью хрома (Cr³⁺).

В большинстве случаев собственные и примесные точечные дефекты существенно влияют на оптические и люминесцентные свойства кристалла вследствие появления дополнительных локальных уровней в запрещенной зоне, играющих роль центров прилипания либо рекомбинации. Учитывая, что для кри-

сталлов α -Al₂O₃ достаточно хорошо изучены спектроскопические свойства примесных (активированных) ионов и собственных дефектов кристаллической решетки, оказывается возможным надежно идентифицировать точечные дефекты в сапфировых подложках с помощью люминесцентных методов, отличающихся сравнительной простотой, доступностью, экспрессностью и высокой чувствительностью. Кроме того, повышенный интерес к изучению люминесцентных свойств анионно-дефектных кристаллов α -Al₂O₃ обусловлен еще и созданием на их основе высокочувствительных детекторов ионизирующих излучений, принцип работы которых основан на явлении термостимулированной люминесценции [5, 6]. Детекторы на основе анионно-дефектного корунда могут быть использованы и для дозиметрии ультрафиолетового излучения [5, 7].

В настоящей работе приведены результаты исследования фото-, рентгено- и термолюминесценции исходного сырья, используемого для выращивания объемных кристаллов α -Al₂O₃, и изготовленных из этих кристаллов сапфировых подложек. Ставилась задача исследовать возможность использовать люминесценцию в качестве чувствительного и информативного экспресс-метода определения собственных и примесных точечных дефектов в кристаллах сапфира и сапфировых подложках.

Методика эксперимента

Исследовались полированные сапфировые подложки ориентации (0001), приготовленные по технологии, описанной в [8, 9]. Подложки вырезались из объемных кристаллов α -Al₂O₃, выращенных из расплава в молибден-вольфрамовых тиглях видоизмененным методом Киропулоса [3, 4]. Поскольку рост происходил в вакууме, то имело место образование кислородных вакансий, в результате чего кристаллы были анионно-дефектными. Исходным сырьем для выращивания объемных кристаллов из расплава служили були и полубули корунда вернейлевого производства от производителей из Китая (ВК) и Чехии (ВЧ). Для сравнения люминесцентных характеристик сапфировых подложек и исходного сырья из вернейлевых кристаллов вырезались ориентированные пластины с плоскостью (0001), которые затем шлифовались и полировались.

Для оптического возбуждения использовались сверхъяркие синий и зеленый светодиоды, а также

гелий-неоновый лазер. Спектры фотолюминесценции анализировались при использовании двойного монохроматора ДФС-24 с разрешением не хуже 0,1 мэВ.

Рентгеновское облучение образцов проводилось при комнатной температуре на установке ДРОН-3 с трубкой БСВ-2 с вольфрамовым анодом при токе анода 10 мА и напряжении 50 кВ. Нагрев образца при измерении кривых термостимулированной люминесценции осуществлялся в интервале температур от комнатной до 600 К со скоростью от 0,2 до 3 К/с.

Спектральное распределение рентгено- и термолюминесценции измерялось на установке, собранной на базе монохроматора МДР-23. В качестве приемника излучения использовался ФЕУ-106, работающий в режиме счета фотонов. Корректировка (исправление) спектров люминесценции производилась с помощью эталонной лампы накаливания СИ-200. Общая систематическая погрешность (включающая нестабильность тракта регистрации люминесценции, ошибку в определении скорости нагрева и невозпроизводимость условий облучения), по нашим оценкам, не превышала 3—4%.

Результаты и их обсуждение

Фотолюминесценция (ФЛ). Поглощение света дефектами в кристалле определяется произведением эффективного сечения взаимодействия на число поглощающих центров (примеси, дефекты структуры и т. п.). Интенсивность люминесценции при оптическом возбуждении пропорциональна вероятности возбуждения поглощающих диполей и вероятности испускания излучающих диполей. При этом следует учесть, что поглощение и излучение могут осуществляться одним и тем же или разными диполями одного центра, а также разными диполями разных центров (в последнем случае имеет место миграция энергии от центров поглощения к центрам излучения). Кроме того, в зависимости от симметрии кристаллической решетки в ней могут быть несколько разных ориентаций данного типа центра, между которыми также может осуществляться миграция энергии.

ФЛ сапфировых подложек в красной области спектра эффективно возбуждалась как излучением синего и зеленого светодиодов, так и He-Ne-лазера. Соответствующие спектры ФЛ для одной и той же сапфировой подложки при использовании различных источников возбуждения приведены на рис. 1. Видно, что, независимо от источника возбуждения, в спектрах излучения наблюдаются R -линии ($R_1=694,3$ нм и $R_2=692,8$ нм), характерные для ионов Cr^{3+} . Таким образом, свечение в сапфировых подложках, содержащих примесь хрома, возникает при непосредственном возбуждении ионов Cr^{3+} падающим излучением светодиода (лазера). Люминесценция кристаллов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ с малой концентрацией ионов Cr^{3+} обусловлена переходами с верхних уровней \bar{E} (2E) и $2\bar{A}$ (2E) на нижние уровни 4A_2 , соответствующие R_1 - и R_2 -линиям, фоновыми повторениями R -линий, а также переходами из термически заселенных состояний 2T_1 и 4T_2 в основное состояние 4A_2 [10—12].

Из кривых 1 и 2 на рис. 1 следует, что при одинаковых интенсивностях возбуждения ФЛ в R -линиях бо-

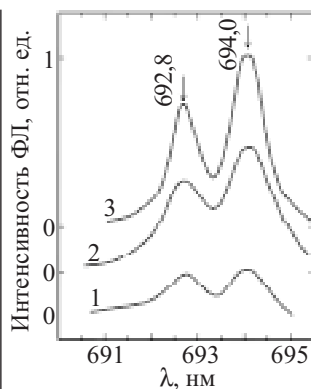


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции сапфировой подложки при возбуждении излучением голубого (1), зеленого (2) светодиодов и He-Ne-лазера ($\lambda=632,8$ нм) (3)

лее эффективно возбуждается излучением зеленого светодиода. Этот экспериментальный факт становится понятным, если сопоставить спектр поглощения кристалла $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ со спектрами излучения голубого и зеленого светодиодов [2]. В спектре поглощения кристаллов альфа-оксида алюминия, легированного примесью хрома, наблюдаются две интенсивные широкие полосы Y ($\lambda_{\text{max}}=410$ нм, переход ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_1$) и U ($\lambda_{\text{max}}=560$ нм, переходы ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_2$), а также слабые интенсивные B_1 - и B_2 -линии (476,3 и 474,6 нм, переходы ${}^4A_2 \rightarrow 2\bar{A}({}^2T_2)$, ${}^4A_2 \rightarrow \bar{E}_a({}^2T_2)$), в которых эффективно возбуждается люминесценция в R -линиях [13]. Так как максимум в спектре излучения голубого светодиода (471,0 нм) находится в области слабых B -линий поглощения, то и эффективность возбуждения ФЛ в этом случае является меньшей по сравнению с зеленым светодиодом, спектральный состав излучения которого перекрывается с интенсивной U -полосой.

Излучение He-Ne-лазера ($\lambda=632,8$ нм) лежит в области очень слабого поглощения кристаллов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$. В этой области перекрываются хвост широкой U -полосы и многофононный хвост R -линий (переходы ${}^4A_2 \rightarrow {}^2E$ с участием нескольких фононов). Вклад в поглощение могут также давать хвосты довольно широких R' -полос (переходы ${}^4A_2 \rightarrow {}^2T_1$) [12].

Таким образом, фотолюминесценция кристаллов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$, независимо от того, происходит ли поглощение в широких полосах или линиях, всегда имеет один и тот же спектр, следовательно, переходы в основное состояние совершаются всегда с одного и того же уровня, а именно, 2E .

Отметим, что R -линии всегда присутствуют в спектре ФЛ сапфировых подложек, независимо от фирм-производителей (рис. 2), а их интенсивность зависит от концентрации остаточных примесей Cr^{3+} , попадающих в растущий кристалл из исходной шихты. Вместе с тем интенсивность R -линий в спектрах ФЛ сапфировых подложек всегда меньше, чем в исходной шихте, что указывает на частичную очистку кристаллов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ от примеси хрома при их выращивании направленной кристаллизацией расплава — как за счет сегрегации на фронте кристаллизации, так и за счет испарения со свободной поверхности расплава.

Учитывая, что исходным сырьем для выращивания объемных кристаллов сапфира служат булы и полубулы верхнейлевого производства, целесообразно использовать ФЛ в качестве экспресс-метода контроля наличия (отсутствия) примесных ионов Cr^{3+} еще

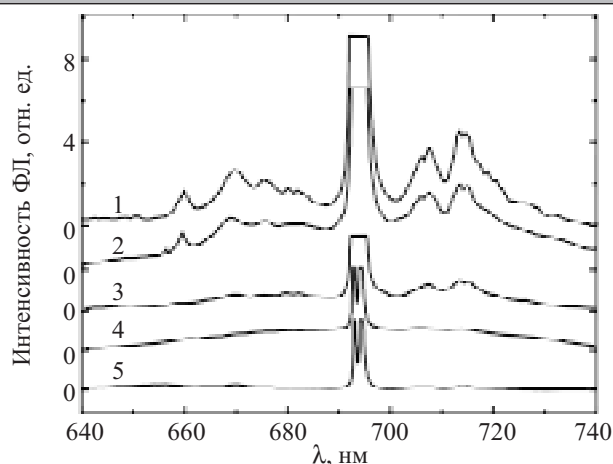


Рис. 2. Фотолюминесценция кристаллов сафира, выращенных методом Вернейля (1 — ВЧ; 2 — ВК), и сапфировых подложек (3 — М; 4 — У; 5 — С). Здесь ВЧ — производство Чехии, ВК — Китая, М — Москвы, У — Ужгорода, С — Ставрополя

на стадии выбора сырья. Принимая во внимание тот факт, что в случае оптического возбуждения интенсивность люминесценции в *R*-линиях (I_R) линейно возрастает с увеличением концентрации (*C*) примеси хрома в кристаллах $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [14, 15], и построив один раз градуировочную зависимость $I_R=f(C)$, можно не только качественно, но и количественно определять содержание хрома в исходном сырье и сапфировых подложках.

Рентгенолюминесценция (РЛ). Сапфировые подложки хорошо люминесцируют при возбуждении ионизирующей радиацией, в том числе и рентгеновским излучением. При этом свечение происходит в нескольких областях спектра (рис. 3). В спектрах РЛ исходного сырья (кристаллов, полученных по методу Вернейля) в красной области помимо основного пика 694 нм (*R*-линии хрома) наблюдается несколько спутников (660, 670, 675, 709, 716, 730 нм), совпа-

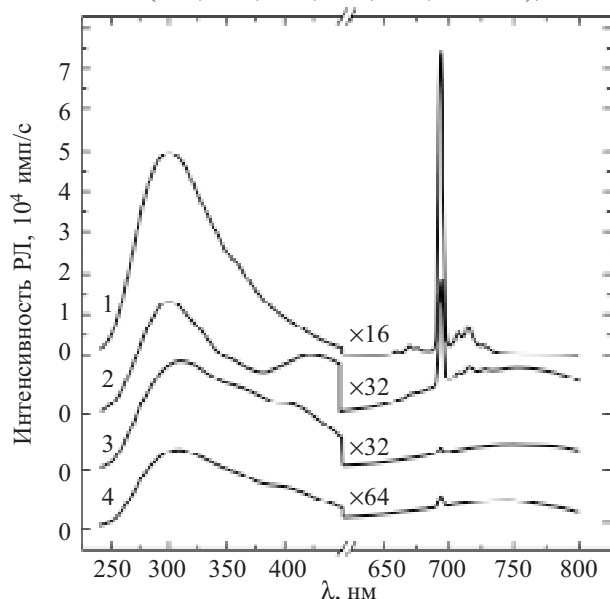


Рис. 3. Рентгенолюминесценция исходных кристаллов сафира, выращенных методом Вернейля (1 — ВЧ; 2 — ВК), и сапфировых подложек (3 — У; 4 — М)

дающих по энергетическому положению с таковыми в спектре ФЛ (кривые 1, 2 рис. 2). Учитывая, что для малых концентраций хрома, входящего в решетку $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в виде ионов Cr^{3+} , справедливо приближение не взаимодействующих примесей [14], наблюдаемые спутники в спектре РЛ не связаны с парным взаимодействием ионов хрома.

Поглощение энергии ионизирующей радиации в основном зависит от полной концентрации ионов в рассматриваемом материале — независимо от того, являются они центрами окраски или нет. Поэтому, в отличие от ФЛ, рентгенолюминесценция в меньшей степени вызвана непосредственным возбуждением ионов Cr^{3+} , а в основном обусловлена передачей этим ионам энергии, поглощаемой решеткой $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. В наших экспериментах при использованных мощностях дозы рентгеновского излучения в разрешенных зонах альфа-оксида алюминия может создаваться максимально $10^{13}\text{—}10^{14}\text{ см}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$ электронно-дырочных пар. Учитывая, что концентрация ионов хрома в исследуемых кристаллах сафира, по данным электронного парамагнитного резонанса, не превышала 10^{16} см^{-3} , а время возбуждения состояния Cr^{3+} примерно равно 3 мс, можно заключить, что в принципе все образующиеся в единицу времени электронно-дырочные пары могут прорекомбинировать на ионах хрома с излучением квантов света 1,84 эВ на *R*-линиях (рис. 3). Таким образом, любой процесс возбуждения люминесценции в кристаллах $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ при наличии примеси хрома всегда заканчивается излучательным переходом ${}^2E\rightarrow{}^4A_2$. Разница заключается лишь в том, что в спектре ФЛ четко удается разделить R_1 - и R_2 -линии, а в спектре РЛ проявляется только одна линия.

Все спутники *R*-линий, наблюдаемые в спектрах ФЛ и РЛ, можно разбить на несколько групп [12]: 660 нм — неразделенные R_1' - и R_2' -линии; 670 нм — R_3' -линия; 650, 675, 680 и 684 — антистоксовы фоновые спутники *R*-линий, возникающие вследствие суперпозиции энергии электронных переходов ${}^2E\rightarrow{}^4A_2$ с энергией атомных колебаний; 705, 709, 713, 716, 725 и 730 нм — колебательные повторения *R*-линий, возникающие вследствие размена части энергии переходов ${}^2E\rightarrow{}^4A_2$ на тепловые колебания решетки.

Независимо от фирмы-производителя как исходного сырья, так и сапфировых подложек, в их спектре РЛ в синей области наблюдается широкая неэлементарная полоса с максимумом около 300—310 нм (рис. 3). Экспериментальные спектры РЛ были разложены на суперпозицию независимых гауссианов (модель линейной электрон-фононной связи), варьируя с помощью компьютера амплитуду, полуширину и положение максимума элементарных пиков и подгоняя суммарную кривую под экспериментальную до наилучшего визуального совпадения. При этом были получены три набора полос с максимумами при энергиях $E_{\text{max1}}=4,26\text{ эВ}$, $E_{\text{max2}}=3,8\text{ эВ}$ и $E_{\text{max3}}=3,00\text{ эВ}$ (рис. 4), которые наиболее точно воспроизводят экспериментально наблюдаемую широкую асимметричную полосу.

Для идентификации полученных максимумов в спектре РЛ в синей области с конкретными центрами воспользуемся известными литературными данными. На основании сравнительного анализа наших резуль-

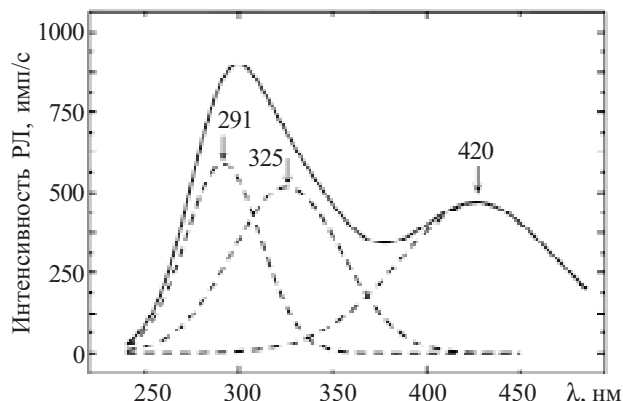


Рис. 4. Разложение спектра РЛ кристалла сапфира ВК на гауссианы

татов с многочисленными данными работ [4, 16—22] можно сделать следующие выводы. Наблюдаемые в спектрах РЛ всех кристаллов полосы излучения 3,8 и 3,0 эВ относятся к переходам в F^+ - и F -центрах [4, 16—20]. Действительно, по данным измерения оптического поглощения, исследуемые нами сапфировые подложки содержали 10^{16} — 10^{17} см $^{-3}$ анионных (кислородных) вакансий. Что касается природы центров свечения, ответственных за полосу 4,26 эВ в спектре РЛ, то в литературе до сих пор нет единого мнения о ее происхождении. Ее связывают с рекомбинациями в парах дефектов [20], с примесью титана [21], а в работе [22] — с примесью магния и приписывают рекомбинации дырок с F_{Mg} -центрами.

Термостимулированная люминесценция. При облучении кристаллов сапфира рентгеновским излучением, кроме рекомбинационных процессов неравновесных носителей заряда, происходит их захват центрами прилипания (происходит запасание энергии возбуждения на ловушках). Поскольку кристаллы α - Al_2O_3 являются широкозонными диэлектриками ($E_g=9,6$ эВ), то наряду с центрами излучательной рекомбинации они содержат большое количество безизлучательных локальных центров, значительная часть которых играет роль центров прилипания для электронов и дырок, которые относительно легко и надежно можно выявить с помощью термостимулированной люминесценции (ТСЛ).

Типичные кривые ТСЛ для исходного сырья (кристаллов α - Al_2O_3 , полученных методом Вернейля, от различных фирм-производителей) и сапфировых подложек приведены на рис. 5, 6. Из сопоставления кривых ТСЛ следует, что форма кривых (количество максимумов и их температурное положение) определяется методом получения кристаллов и присутствующими в них остаточными (фоновыми) примесями. Так, в кристаллах ВК, облученных рентгеновским излучением, наблюдается термолюминесценция с доминирующим пиком при 460 К, т. е. дозиметрический пик [5—7]. Его интенсивность и светосумма коррелируют с дозой рентгеновского излучения. В кристаллах ВЧ дозиметрический пик не является элементарным, а состоит из двух, один из которых проявляется в виде плеча при $T=460$ К, а второй — ярко выраженный при $T=480$ К (кривая 1 рис. 5). Используя различные виды возбуждения, а именно,

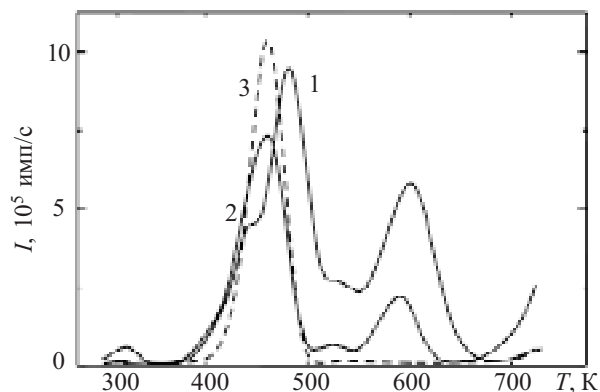


Рис. 5. Кривые ТСЛ кристаллов сапфира, выращенных методом Вернейля (1 — ВЧ, 2 — ВК) и Степанова (3)

фотовозбуждением излучением азотного лазера ($\lambda=337$ нм) и рентгеновское излучение при исследовании ТСЛ анионно-дефектных кристаллов α - Al_2O_3 , авторам [7] на самом деле удалось разделить сложный пик на два элементарных с максимумами при 460 и 480 К, хотя сами авторы так и не констатировали факта существования двух пиков, считая, что пик при облучении исследуемого образца лазерным светом имеет температуру на 10—25 К выше, чем пик ТСЛ при рентгеновском облучении.

Длительное время считали, что дозиметрический пик ($T_m=460$ К) обусловлен наличием углерода в кристаллах альфа-оксида алюминия (α - $Al_2O_3:C$) [23]. Действительно, на кривых ТСЛ профилированных кристаллов, выращенных по методу Степанова с использованием графитового теплового узла (кривая 3 на рис. 5), наблюдается хорошо разрешенный дозиметрический пик с $T_m=460$ К. Согласно модели, предложенной в работе [24], термолюминесцентный процесс протекает путем освобождения дырок из ловушек, образованных ионами углерода, и их последующей рекомбинацией с электронами, локализованными на анионных вакансиях. Авторы [25] считают, что такая модель термолюминесцентного процесса является необоснованной. По их мнению, углерод как восстановительный реагент оказывает лишь каталитическое действие путем ослабления связей между ионами основной кристаллической решетки и способствует образованию нестехиометрического окружения вблизи анионных вакансий.

Учитывая это и принимая во внимание, что дозиметрический пик в кристаллах α - Al_2O_3 , выращенных по методу Вернейля, не является элементарным, а также тот факт, что в спектрах излучения обоих пиков (460 и 480 К) наблюдается свечение F - и F^+ -центров и ионов Cr^{3+} , вероятнее всего дозиметрический пик следует связать со сложным комплексным дефектом, образованным кислородными вакансиями в разных зарядовых состояниях и ионами хрома, которые одновременно выполняют роль ловушки носителей заряда и излучательного центра. К такому выводу ранее пришли также авторы [26] на основании анализа результатов исследования ТСЛ анионно-дефектных кристаллов.

О наличии ионов Cr^{3+} в вернейлевых кристаллах свидетельствует также второй пик ТСЛ при 600 К (рис. 5). Температурное положение и форма этого

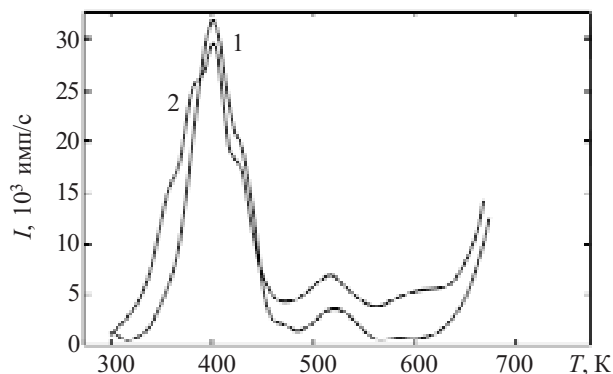


Рис. 6. Кривые ТСЛ сапфировых подложек (1 — У, 2 — М)

пика не зависит от дозы облучения, а его интенсивность пропорциональна концентрации примесных ионов Cr^{3+} в матрице $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, что хорошо согласуется с данными [5].

На рис. 6 приведены кривые ТСЛ сапфировых подложек, вырезанных из кристаллов, полученных видоизмененным методом Киропулоса с использованием в качестве сырья В-кристаллов от различных производителей. Независимо от происхождения сырья и производителя объемных кристаллов из расплава, на кривых ТСЛ сапфировых подложек доминирующим является пик при 400 К с одной (420 К) либо тремя (360, 380, 420 К) особенностями, проявляющимися в виде плеч на высокотемпературной и низкотемпературной сторонах пика. Аналогичные кривые ТСЛ, как по форме, так и по положению пиков, приведены в работах [27, 28] для кристаллов сапфира, выращенных методами Вернейля и Киропулоса. Таким образом, доминирующий пик ТСЛ в сапфировых подложках является неэлементарным. Он связан с термическим опустошением, как минимум, двух и — максимум — четырех ловушек. На кривых ТСЛ, кроме основного, проявляются также два слабых пика при 470 и 520 К. Авторы [28] пик при 400 К приписывают термическому разрушению двухдырочных центров, находящихся вблизи примесных ионов (V_M^- -центры), а генетически связанные с ними однодырочные центры ($V_M^=$ -центры) термически разрушаются при 520 К [29]. Два пика с максимумами при 380 и 420 К обусловлены ионизацией двухдырочных V^- -центров и однодырочных $V_{\text{OH}}^=$ -центров, соответственно [4, 16, 28].

В кристаллах сапфира, полученных по методу Вернейля, наблюдается еще один пик ТСЛ — при более низкой температуре (320 К), чем дозиметрический. Следует отметить, что температурное положение максимума этого пика существенно зависит от скорости нагрева образца — наблюдается смещение максимума в область высоких температур с увеличением скорости нагрева. Аналогичную зависимость для пика 320 К установили ранее авторы [25] и связали его с обычным электронно-дырочным механизмом ионизации ловушек.

Интенсивность пика ТСЛ при 600 К, связанного с Cr^{3+} -центрами, резко падает для сапфировых подложек в сравнении с исходными ВЧ- и ВК-кристаллами. Причиной этого, как отмечалось ранее, является

существенное уменьшение концентрации фоновой примеси в кристаллах, полученных из расплава, как за счет ее испарения с открытой поверхности расплава, так и вследствие отнесения примесей фронтом кристаллизации в нижний конец слитка. По этой причине на кривых ТСЛ сапфировых подложек, вырезанных из средней части объемного кристалла (наиболее чистой), пик при 600 К практически отсутствует, а у подложек, вырезанных из конца слитка, он проявляется.

Выводы

Установлено, что люминесцентные и термолюминесцентные свойства кристаллов сапфира и сапфировых подложек определяются не только анионными и катионными вакансиями, но и такими сопутствующими примесями как хром и титан, которые влияют на форму кривой ТСЛ и спектр свечения кристаллов.

Учитывая высокую активность примесных центров Cr^{3+} в оптических процессах, неразрушающим экспресс-методом контроля остаточных примесей хрома в сапфировых подложках может выступить фотолюминесценция. Для ее возбуждения успешно можно использовать излучение сверхъярких голубого либо зеленого светодиодов, изготовленных на базе гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с множеством квантовых ям, а также гелий-неонового лазера.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Папков В. С., Цыбульников М. Б. Эпитаксиальные кремниевые слои на диэлектрических подложках и приборы на их основе. — М.: Энергия, 1979.
2. Bletskan D. I., Lukyanchuk O. R., Bletskan O. D. Effect of sapphire substrate on spectral emission features for LEDs based on InGaN/AlGaIn/GaN hetero-structures // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*.— 2003.— Vol. 6, N 2.— P. 189—191.
3. Блецкан Д. И., Блецкан О. Д., Лук'яничук О. Р. та ін. Промислові вирощування монокристалів сапфіру видозміненим методом Кіропулоса // *Наук. вісн. Ужгородського університету. Сер. Фізика*.— 2000.— № 6.— С. 221—239.
4. Crawford J. H. Jr. A review of neutron radiation damage on corundum crystals // *J. Nucl. Mater.*— 1982.— Vol. 108—109.— P. 644—654.
5. Kortov V. S., Milman I. I., Kirpa V. I., Lesz J. Some features of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ dosimetric thermoluminescent crystals // *Radiation Protection Dosimetry*.— 1994.— Vol. 55, N 4.— P. 279—283.
6. Kortov V. S., Milman I. I., Kirpa V. I., Lesz J. Thermal quenching of TL in $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ dosimetric crystals // *Ibid.*— 1996.— Vol. 65, N 1—4.— P. 255—258.
7. Кортвов В. С., Сюрдо А. И., Шарафутдинов Ф. Ф. Термолюминесценция анионодефектного корунда при ультрафиолетовом, лазерном и рентгеновском облучении // *ЖЭТФ*.— 1997.— Т. 67, № 7.— С. 72—76.
8. Блецкан Д. И., Блецкан О. Д., Лук'яничук О. Р. та ін. Механічна обробка кристалів сапфіра та виготовлення підкладок із них // *Наук. вісн. Ужгородського університету. Сер. Фізика*.— 2000.— № 7.— С. 161—172.
9. Евразийский пат. 001265. Способ резки кристаллов сапфира / Н. И. Блецкан, Б. А. Дороговин, А. Б. Дороговин и др.— 2000.
10. Misu A. Emissions of ruby // *J. Phys. Soc. Japan*.— 1964.— Vol. 19, N 12.— P. 2260—2270.
11. Kisliuk P., Moore C. A. Radiation from the 4T_2 state of Cr^{3+} in ruby and emerald // *Phys. Rev.*— 1967.— Vol. 160, N 2.— P. 307—312.

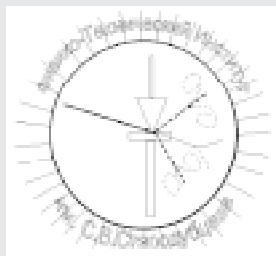
12. Nelson D. F., Sturge M. D. Relation between absorption and emission in the region of the R lines of ruby // *Phys. Rev. A.*— 1965.— Vol. 137, N 4.— P. 1117—1130.
13. Sugano S., Tanabe Y. Absorption spectra of Cr^{3+} in Al_2O_3 . Part A. Theoretical studies of the absorption bands and lines // *J. Phys. Soc. Japan.*— 1958.— Vol. 13, N 8.— P. 880—899.
14. Антипова-Кортова И. И., Грум-Гржимайло С. В. О возможности использования люминесцентного анализа для контроля состава примесей в корунде // *Тр. Ин-та кристаллографии.*— 1953.— Вып. 8.— С. 139—144.
15. Schawlow A. L., Wood D. L., Clogston A. M. Electronic spectra of exchange-coupled ion pairs in crystals // *Phys. Rev. Letters.*— 1959.— Vol. 3, N 6.— P. 271—273.
16. Lee K. H., Crawford J. H. Electron centers in single-crystal Al_2O_3 // *Phys. Rev. B.*— 1977.— Vol. 15, N 8.— P. 4065—4070.
17. Lee K. H., Crawford J. H. Jr. Luminescence of the F center in sapphire // *Ibid.*— 1979.— Vol. 19, N 6.— P. 3217—3221.
18. Evans B. D., Stapelbroek M. Optical properties of the F^+ center in crystalline Al_2O_3 // *Ibid.*— 1987.— Vol. 18, N 12.— P. 7089—7098.
19. Springis M. J., Valbis J. A. Visible luminescence of colour centres in sapphire // *Phys. Stat. Solidi (b).*— 1984.— Vol. 123, N 1.— P. 335—343.
20. Кулис П. А., Рачко З. А., Спрингис М. Е. и др. Рекомбинационная люминесценция неактивированной окиси алюминия // *Электронные процессы и дефекты в ионных кристаллах.*— Рига: Изд-во Латвийского госуниверситета, 1985.— С. 85—123.
21. Surdo A. I., Kortov V. S., Sharafutdinov F. F. Luminescence of anion-defective corundum with titanium impurity // *Radiat. Prot. Dosim.*— 1999.— Vol. 84, N 1—4.— P. 261—263.
22. Kulis P. A., Springis M. J., Tale I. A. et al. Impurity associated color centers in Mg and Ca-doped Al_2O_3 single crystals // *Phys. Stat. Solidi (b).*— 1981.— Vol. 104, N 2.— P. 719—725.
23. Аксельрод М. С., Кортов В. С., Мильман И. И. и др. Профилированные легированные углеродом монокристаллы окиси алюминия для термолюминесцентных дозиметрических детекторов // *Изв. АН СССР. Сер. Физическая.*— 1988.— Т. 52, № 10.— С. 1981—1985.
24. Аксельрод М. С., Кортов В. С., Мильман И. И. Рекомбинационные процессы в легированном анионнодефектным корунде // *Укр. физ. журнал.*— 1983.— Т. 28, № 7.— С. 1053—1056.
25. Бессонова Т. С., Гимадова Т. И., Тале И. А. и др. Особенности термолюминесценции монокристаллов корунда с дефектной структурой // *ЖПС.*— 1991.— Т. 54, № 3.— С. 433—437.
26. Кортов В. С., Мильман И. И. Термостимулированная люминесценция дозиметрических кристаллов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ // *Изв. вузов. Физика.*— 1996.— № 11.— С. 145—160.
27. Бессонова Т. С., Забара А. С. Радиационно-стимулированные явления в корунде с примесью титана // *ЖПС.*— 1989.— Т. 50, № 3.— С. 440—444.
28. Грицына В. Т., Войцень Т. И., Корнеева Т. И. Изменение структуры и зарядовых состояний дефектов в кристаллах корунда при рентгеновском облучении.— *Укр. физ. журнал.*— 1984.— Т. 29, № 9.— С. 1398—1403.
29. Lee K. H., Holmberg G. E., Crawford J. H. Jr. Optical and ESR studies of hole centers γ -irradiated Al_2O_3 // *Phys. Stat. Solidi (a).*— 1977.— Vol. 39, N 2.— P. 669—674.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

НПО «Физика-Солнце» АН РУз им. С. А. Азимова

Конференция

«ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ»



Сентябрь 2006
Ташкент

Контактная информация:

Телефон: (8-371)-133-12-71.

Факс: (8-371)-135-42-91.

E-mail: lutzp@uzsci.net

Конференция посвящена широкому спектру проблем, связанных с актуальными фундаментальными и прикладными вопросами современной физики.

Представляются работы по следующим направлениям:

1. Физика ядра и элементарных частиц, ее прикладные аспекты. (olimov@uzsci.net)
2. Физика полупроводников и твердого тела, ее прикладные аспекты. (erkin1@uzsci.net)
3. Возобновляемые источники энергии и гелиоматериаловедение, их прикладные аспекты. (sultan@uzsci.net, trukhov@uzsci.net)

К участию в конференции принимаются работы, выполненные за последние 3 года, а также обзорные доклады.

Срок подачи работ до 15 августа 2006 г.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Виноградов Б. А., Мещерякова Г. П., Перепелкин К. Е. Действие лазерного излучения на полимерные материалы.— СПб: Наука, 2006.— 50 с.

Монография посвящена рассмотрению структуры и физических (термических, оптических) свойств полимерных материалов, исследованию воздействия на них лазерного излучения различной интенсивности в ИК, видимом и УФ диапазонах, лазерным методам изучения их микро- и макроструктуры, научным основам лазерного нагрева, термической обработки, сварки, поверхностной и размерной обработки.

Для специалистов в области применения лазерных методов при изучении и обработке полимерных материалов, для преподавателей, аспирантов, студентов.

