

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,  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 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  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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 (Cr<sup>3+</sup>).

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  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 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  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 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  $\text{Cr}^{3+}$ . Таким образом, свечение в сапфировых подложках, содержащих примесь хрома, возникает при непосредственном возбуждении ионов  $\text{Cr}^{3+}$  падающим излучением светодиода (лазера). Люминесценция кристаллов  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  с малой концентрацией ионов  $\text{Cr}^{3+}$  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-

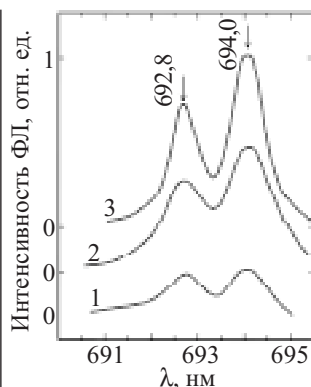


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции сапфировой подложки при возбуждении излучением голубого (1), зеленого (2) светодиодов и He-Ne-лазера ( $\lambda=632,8$  нм) (3)

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  $\text{Cr}^{3+}$ , 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  $\text{Cr}^{3+}$  еще

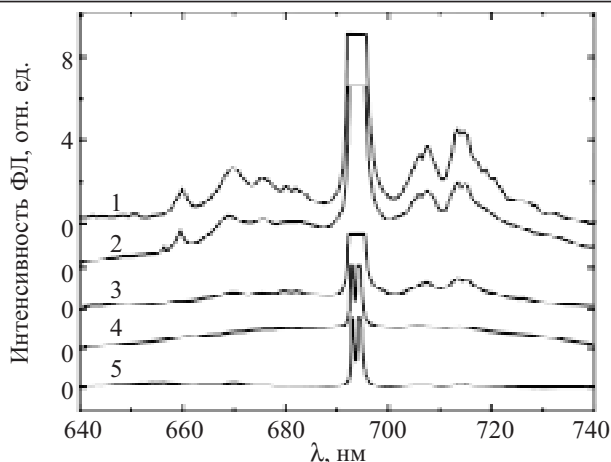


Рис. 2. Фотолюминесценция кристаллов сафира, выращенных методом Вернейля (1 — ВЧ; 2 — ВК), и сапфировых подложек (3 — М; 4 — У; 5 — С). Здесь ВЧ — производство Чехии, ВК — Китая, М — Москвы, У — Ужгорода, С — Ставрополя

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-

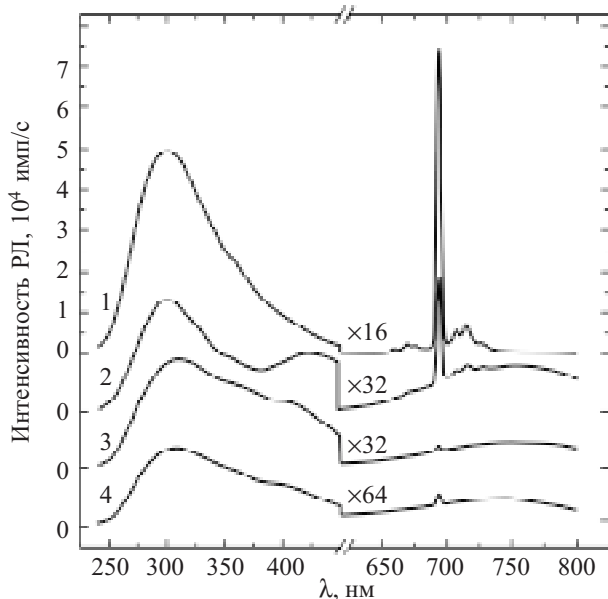


Рис. 3. Рентгенолюминесценция исходных кристаллов сафира, выращенных методом Вернейля (1 — ВЧ; 2 — ВК), и сапфировых подложек (3 — У; 4 — М)

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  $\text{Cr}^{3+}$ , 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  $\text{Cr}^{3+}$ , 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  $10^{16}\text{ см}^{-3}$ , а время возбуждения состояния  $\text{Cr}^{3+}$  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-

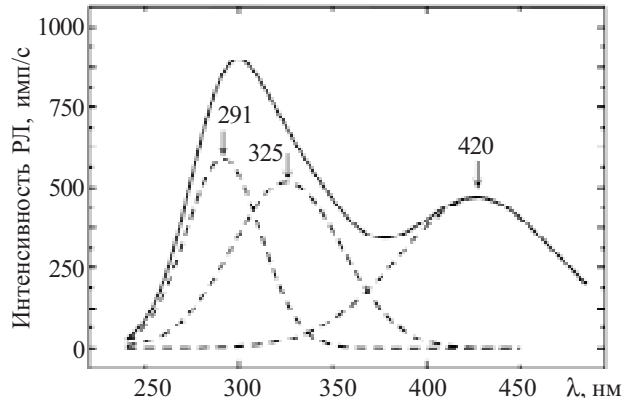


Рис. 4. Разложение спектра РЛ кристалла сапфира ВК на гауссианы

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  $\alpha$ - $Al_2O_3$  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  $\alpha$ - $Al_2O_3$ , 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,

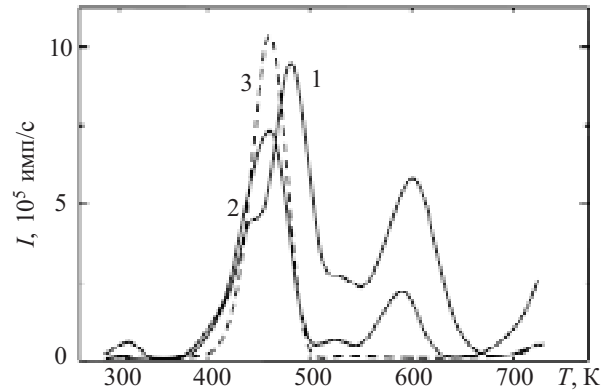


Рис. 5. Кривые ТСЛ кристаллов сапфира, выращенных методом Вернейля (1 — ВЧ, 2 — ВК) и Степанова (3)

фотовозбуждением излучением азотного лазера ( $\lambda=337$  нм) и рентгеновское излучение при исследовании ТСЛ анионно-дефектных кристаллов  $\alpha$ - $Al_2O_3$ , 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 ( $\alpha$ - $Al_2O_3:C$ ) [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  $\alpha$ - $Al_2O_3$ , 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

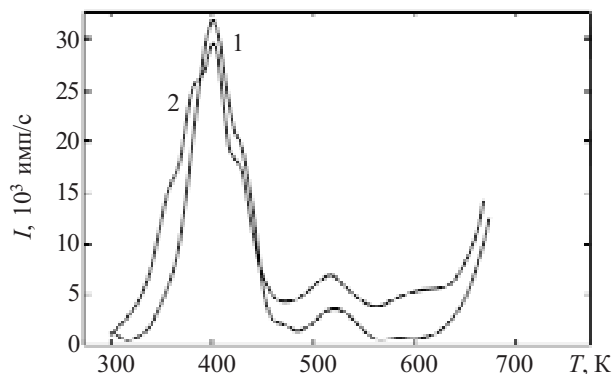


Рис. 6. Кривые ТСЛ сапфировых подложек (1 — У, 2 — М)

пика не зависит от дозы облучения, а его интенсивность пропорциональна концентрации примесных ионов  $\text{Cr}^{3+}$  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  $\text{Cr}^{3+}$ -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  $\text{Cr}^{3+}$  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  $\text{InGaN/AlGaIn/GaN}$  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  $\text{InGaN/AlGaIn/GaN}$  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  $\text{Cr}^{3+}$  in ruby and emerald // *Phys. Rev.*— 1967.— Vol. 160, N 2.— P. 307—312.

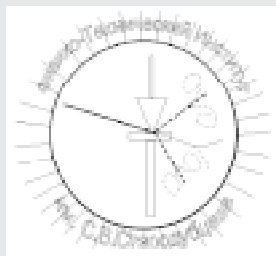
12. Nelson D. F., Sturge M. D. Relation between absorption and emission in the region of the R lines of ruby // *Phys. Rev. A.*— 1965.— Vol. 137, N 4.— P. 1117—1130.
13. Sugano S., Tanabe Y. Absorption spectra of  $\text{Cr}^{3+}$  in  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Part A. Theoretical studies of the absorption 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  $\text{Al}_2\text{O}_3$  // *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  $\text{Al}_2\text{O}_3$  // *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  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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  $\gamma$ -irradiated  $\text{Al}_2\text{O}_3$  // *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: lupt@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

**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.

