

На правах рукописи

Орозбек уулу Аскар

ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ F^+ -ЦЕНТРОВ В
АНИОНОДЕФЕКТНЫХ КРИСТАЛЛАХ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Екатеринбург 2007

Работа выполнена на кафедре «Физические методы и приборы контроля качества» ГОУ ВПО

«Уральский государственный технический университет - УПИ», г. Екатеринбург

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки Российской Федерации
Кортов В.С.

Научный консультант - кандидат физико-математических наук, доцент
Вайнштейн И.А.

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук, профессор
Шульгин Б.В.

кандидат физико-математических наук, ведущий научный
сотрудник Щапова Ю.В.

Ведущая организация - Институт физики металлов УрО РАН

Защита состоится 19 февраля 2007 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета К 212.285.01 при ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ» в аудитории I главного учебного корпуса по адресу: 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале библиотеки ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ».

Отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный гербовой печатью, просим направить по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», ученому секретарю университета.

Автореферат разослан “ 18 ” января 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доцент, к.х.н.

Недобух Т.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Собственные и примесные дефекты в значительной степени определяют механизмы радиационно-стимулированных явлений в кристаллах. Поэтому актуальной задачей физики твердого тела является изучение природы и свойств дефектов кристаллической решетки, в том числе в широкозонных оксидах.

Одним из важных, интенсивно изучаемых и используемых на практике методов исследования дефектов в твердых телах является термолюминесценция (ТЛ) – свечение материалов, возникающее в процессе их нагревания. Известны успешные применения ТЛ в дозиметрии ионизирующих излучений, геологии, археологии и в других важных областях науки и техники.

Термолюминесцентные свойства различных материалов интенсивно изучаются. Высоким интересом к исследованию ТЛ кристаллов оксида алюминия, нашедшего широкое практическое применение в различных областях техники: в квантовой электронике, твердотельной дозиметрии, микроэлектронике. Аниондефектные монокристаллы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, выращенные или термообработанные в вакууме в восстановительных условиях, являются объектом интенсивных исследований многих научных групп. Эти монокристаллы были предложены для термолюминесцентной дозиметрии (ТЛД) исследователями Уральского государственного технического университета - УПИ. На их базе созданы и широко используются для персональной дозиметрии и радиационного мониторинга окружающей среды высокочувствительные детекторы ионизирующих излучений ТЛД-500К.

В настоящее время накоплен большой объем данных о люминесцентных свойствах аниондефектных монокристаллов оксида алюминия. Определены основные дефекты кристаллической решетки, создающие центры свечения, в том числе F- и F⁺-центры, известны полосы их оптического поглощения и свечения. Известно температурное положение пиков ТЛ в широком температурном интервале. У многих из них определены кинетические параметры. Установлено, что в дозиметрическом пике превалирует свечение F-центров. Обнаружено несколько аномальных особенностей ТЛ F-центров, не описываемых в рамках известных модельных представлений. Показана связь упомянутых особенностей ТЛ с процессом температурного тушения люминесценции в полосе F-центров. Обоснована роль глубоких ловушек в механизме температурного тушения люминесценции F-центров и в формировании основных особенностей ТЛ дозиметрического пика.

Однако объяснение некоторых особенностей ТЛ свойств аниондефектного оксида алюминия, представляющих научный и практический интерес, вызывает затруднения и требует дальнейших исследований. Это относится к термостимулированным процессам в интервале температур 300-900 К, в котором находится несколько максимумов ТЛ, включая дозиметрический

пик при 450 К. Не выяснены природа ловушек и механизм ТЛ в этом пике. Дискуссионным является вопрос о механизмах свечения в полосе 3.8 эВ и о роли F^+ -центров в ее возникновении. Механизм внутрицентрового свечения удовлетворительно объясняет наблюдаемые закономерности в температурном диапазоне дозиметрического пика и при более низких температурах. Однако свечение в полосе 3.8 эВ глубоких ловушек далеко не всегда можно связать с F^+ -центрами. Не изучены также закономерности свечения в полосе 3.8 эВ в глубоких ловушках при фотоконверсии $F \rightarrow F^+$ -центров и при воздействии ионизирующих излучений с варьированием дозы облучения.

Вместе с тем известно, что ТЛ чувствительность к излучению монокристаллов оксида алюминия зависит от концентрации F^+ -центров. В этой связи являются актуальными в научном и прикладном аспектах исследования влияния F^+ -центров на люминесцентные свойства монокристаллов оксида алюминия, определение параметров кинетики свечения F^+ - и F -центров в различных температурных диапазонах для установления возможных механизмов ТЛ в исследуемых кристаллах.

Цель и задачи исследования. Целью работы является комплексный анализ кинетики термолюминесценции F^+ -центров, ее сравнение с кинетикой F -центров, изучение роли F^+ -центров в формировании закономерностей люминесценции в аниондефектных кристаллах оксида алюминия при варьировании дозы и условий облучения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучение закономерностей ТЛ аниондефектных монокристаллов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в температурном интервале 350-550 К при селективном возбуждении в полосе поглощения F -центров (≈ 6.0 эВ) с различной длительностью.

2. Определение параметров кинетики ТЛ в исследуемых кристаллах в полосах свечения F^+ - и F -центров при различных состояниях заселенности глубоких ловушек.

3. Компьютерное моделирование кривых изотермического затухания ТЛ в полосах свечения F^+ - и F -центров в рамках различных кинетических моделей. Сравнительный анализ особенностей и возможных механизмов ТЛ F^+ - и F -центров в диапазоне температур 350-550 К.

4. Изучение закономерностей свечения 3.8 эВ в глубоких ловушках при различных дозах облучения, а также при варьировании длительности фотоконверсии $F \rightarrow F^+$ -центров.

Научная новизна. 1. В сопоставимых условиях проведен анализ кинетических параметров ТЛ в полосах свечения F^+ (3.8 эВ)- и F (3.0 эВ) -центров кристаллов аниондефектного оксида алюминия с применением различных методов термоактивационной спектроскопии. Результаты анализа подтвердили предположение о том, что на восходящем и спадающем участках дозиметрического пика при 450 К протекают принципиально различные по природе термоактивационные процессы с участием F^+ - и F -центров.

2. В результате исследования закономерностей ТЛ в полосе 3.8 эВ в аниондефектных кристаллах оксида алюминия при различных условиях возбуждения показано, что в изменении интенсивности ТЛ дозиметрического пика при варьировании дозы облучения важную роль играют центры захвата примесных ионов хрома, а после их заполнения – глубокие ловушки с максимумами при 730 К и 835 К.

3. Впервые определена пороговая доза – 4 Гр для исследуемых кристаллов оксида алюминия. При достижении этой дозы и ее дальнейшем увеличении происходят существенные изменения практически всех кинетических параметров ТЛ пика при 450 К.

4. Впервые измерена дозовая зависимость ТЛ при 835 К обнаруженной глубокой ловушки в полосе свечения 3.8 эВ и показана принципиальная возможность использования указанного ТЛ пика для высокотемпературной дозиметрии.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов диссертационной работы обусловлена физической корректностью постановки задач исследования и методов их реализации, тщательным анализом воспроизводимости основных измеряемых величин, использованием для расчета кинетических параметров ТЛ обоснованных и апробированных методик. Научные положения и выводы диссертации подтверждены согласием экспериментальных и расчетных результатов с существующими в настоящее время модельными представлениями.

Автор защищает результаты, подтверждающие изложенные выше положения научной новизны:

1. Экспериментальные данные исследования закономерностей ТЛ в полосах свечения F^+ - и F-центров кристаллов аниондефектного оксида алюминия в температурном диапазоне (350-550 К) при различной степени заселенности глубоких ловушек.

2. Результаты расчета и сравнения кинетических параметров ТЛ в полосах свечения F^+ - и F-центров с использованием различных методов термоактивационной спектроскопии и их интерпретацию.

3. Установленные закономерности изменения кинетических параметров ТЛ в полосе 3.8 эВ при достижении и превышении пороговой дозы облучения исследуемых кристаллов.

4. Результаты экспериментального исследования и обоснование закономерностей появления и трансформации высокотемпературных пиков ТЛ при высокодозном облучении образцов и их связь с примесными центрами.

Практическая значимость работы. 1. Найденные закономерности послужат основой для улучшения дозиметрических характеристик детекторов ионизирующего излучения и расширения областей их применений.

2. Выявленная возможность высокотемпературной дозиметрии на основе ТЛ пика при 835 К в полосе свечения 3.8 эВ при использовании аниондефектных кристаллов оксида алюминия

представляет интерес для внутрореакторных измерений и при использовании радиационных технологий.

Личный вклад автора. Формулирование цели и задач диссертационной работы, анализ основных результатов исследования выполнены автором совместно с научным руководителем Коротвым В.С. Автором самостоятельно проведены все измерения, обработка экспериментальных данных и расчет кинетических параметров ТЛ, их интерпретация подготовка научных публикаций для печати, а также формулировка защищаемых положений и выводов. Изучение компенсационного эффекта, проявлений фотоконверсии анионных центров в кинетике ТЛ и корреляций свечения ТЛ в полосе 3.8 эВ в дозиметрическом пике ТЛ и глубокой ловушке выполнены в соавторстве с И.А. Вайнштейном.

Апробация работы. Материалы диссертации были представлены и обсуждены на международной летней школе по радиационной физике (SCORPh-2004), Бишкек-Каракол, Кыргызстан, 2004 г.; на 9-й международной школе-семинаре по люминесценции и лазерной физике (ЛЛФ-2004), Иркутск, 2004; на 15-й международной конференции «Дефекты в диэлектрических материалах» (ICDIM-2004), Рига, Латвия, 2004 г.; на 9-й отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2006 г.; на международной научно-практической конференции «Трансфер технологий, инновации, современные проблемы атомной отрасли», Снежинск, 2006 г.; на международной конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов (РФХ-13), Томск, 2006 г.

Публикации. Результаты исследований опубликованы в восьми печатных работах.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации - 125 страниц текста, включая 37 рисунков, 19 таблиц и список литературы, содержащий 105 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертации, сформулирована цель проведенного исследования, научная новизна и защищаемые положения диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены и обобщены литературные данные о спектральных и кинетических свойствах ТЛ кристаллов оксида алюминия. Приводятся сведения о структуре и свойствах основных дефектов кристаллической решетки. Основное внимание уделено кислородным вакансиям с одним и двумя захваченными электронами, создающим F^+ - и F -центры. Описаны известные кривые термовысвечивания кристаллов оксида алюминия в широком температурном интервале и их кинетические параметры. Рассмотрены особенности ТЛ в диапазоне температур дозиметрического пика при 450 К и роль глубоких ловушек в

формировании этих особенностей. Подробно рассмотрен спектр свечения в температурном интервале дозиметрического пика при 450 К. Кратко описаны основные методы термоактивационной спектроскопии. На основе обзора литературных данных в конце главы сформулированы задачи исследования, указанные в общей характеристике работы.

Во второй главе описаны объекты, экспериментальный комплекс, методика исследований и погрешности измерений.

Базовыми объектами исследований являлись образцы номинально чистых аниондефектных монокристаллов оксида алюминия, выращенных методом направленной кристаллизации (метод Степанова) в сильнейших восстановительных условиях, обусловленных присутствием графита. Аниондефектные монокристаллы оксида алюминия были впервые получены на кафедре «Физические методы и приборы контроля качества» Уральского государственного технического университета. Основная идея выращивания кристаллов по этой методике заключалась в формировании дефектов в анионной подрешетке – кислородных вакансий. В конечной стадии образцы имели форму дисков диаметром 5 мм и толщиной 1 мм. Концентрация F-центров по данным измерений спектров оптического поглощения составляла величину порядка 10^{17} см^{-3} .

Для исследований использовалась разработанная на кафедре установка для изучения термо- и фотостимулированных процессов в кристаллах. Отличительной особенностью этой установки является возможность избирательно возбуждать исследуемые центры образцов УФ - светом с использованием входного монохроматора в соответствии с их полосами поглощения и выделять их спектры свечения с помощью выходного монохроматора. Установка позволяет исследовать процесс ТЛ несколькими методами термоактивационной спектроскопии: в режиме линейного нагрева, изотермической выдержки и вариации скоростей нагрева. Она обеспечивает проведение измерений в интервале температур от комнатной до 600°C и в диапазоне изменения скоростей линейного нагрева от 0.1 до 10 К/с, что открывает широкие возможности для исследования кинетики процесса ТЛ.

Для облучения образцов применялся источник β - излучения на основе изотопа $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, обеспечивающий тестовую дозу 0.064 Гр в месте расположения образцов в течение двух минут.

При измерениях дозовой зависимости исходные образцы для опустошения дозиметрических и глубоких ловушек отжигались до 970 К, затем облучались от β -источника и линейно нагревались со скоростью 2 К/с. Доза β -излучения изменялась от 0.064 Гр до 76.8 Гр.

В измерениях при облучении образцов УФ - светом методика измерений заключалась в следующем. Исходные образцы предварительно отжигались, затем они облучались β - излучением источника $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ тестовой дозой. Пик ТЛ регистрировался в полосе свечения F^+ - центров (3.8 эВ) при линейном нагреве образцов со скоростью 2 К/с. После облучения образцов тестовой

дозой регистрировались кривые изотермического затухания люминесценции при выбранных температурах в диапазоне исследуемого пика ТЛ.

С целью увеличения концентрации F^+ -центров образцы подвергались при температуре 650 К освещению дейтериевой лампой ЛД-Д, из спектра которой монохроматором МУМ выделялась полоса с энергией квантов 5.9 эВ, соответствующая полосе поглощения F-центров. В результате УФ - возбуждения происходит конверсия $F \rightarrow F^+$ центров, при этом делокализованные электроны могут захватываться ловушками дозиметрического пика, а также заполнять более глубокие ловушки. Длительность УФ - воздействия варьировалась от 3 до 21 минут. Затем образцы охлаждались, облучались тестовой дозой от β - источника, и циклы измерений повторялись заново. По этой же методике проводились измерения в полосе свечения 3.0 эВ.

В конце главы приводятся результаты оценки разброса величин светосуммы, интенсивности пика ТЛ, его температурного положения и полуширины при повторных измерениях. Полученные данные свидетельствуют о хорошей воспроизводимости результатов измерений.

В третьей главе приведены результаты анализа кинетики ТЛ облученных кристаллов оксида алюминия в диапазоне температур дозиметрического пика с использованием различных методов термоактивационной спектроскопии.

На рисунке 1, (а и б) для исследуемых образцов, облученных тестовой дозой, приведены кривые термовысвечивания при линейном нагреве в полосах 3.8 эВ (F^+ -центры) и 3.0 эВ (F-центры) при различной степени заселенности глубоких ловушек.

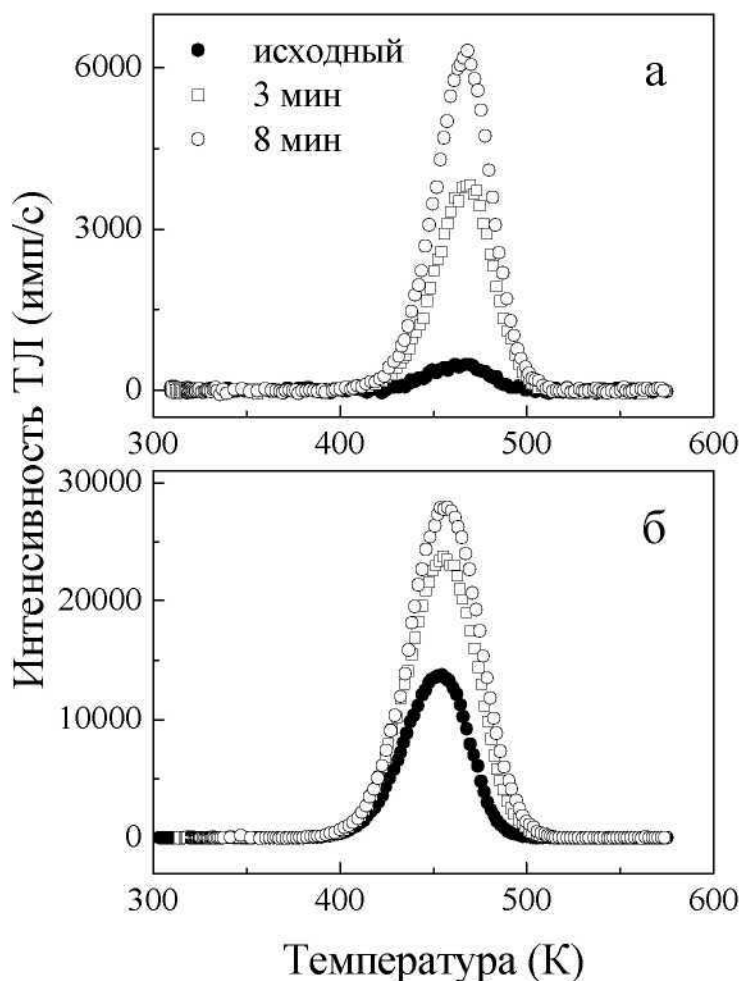


Рис. 1. Термолюминесценция облученных тестовой дозой монокристаллов оксида алюминия, возбужденных УФ (5.9 эВ) при $T=650$ К: в полосах свечения а) 3.8 эВ, б) 3.0 эВ. Длительность возбуждения приведена на рисунке

Из данных рисунка 1, (а) видно, что исходный образец имеет низкую интенсивность свечения F^+ -центров, которая быстро нарастает при УФ возбуждении за счет увеличения концентрации F^+ -центров в результате конверсии $F \rightarrow F^+$, причем доза облучения от β -источника остается неизменной. Это указывает на то, что F^+ -центры не только являются центрами свечения, но и участвуют в создании ловушек, ответственных за ТЛ. С увеличением длительности УФ освещения при $T = 650$ К растет также интенсивность ТЛ в полосе 3.0 эВ (рисунок 1, б), однако его относительное изменение не столь значительно по сравнению с полосой F^+ -центров. Этот результат является вполне закономерным несмотря на то, что концентрация F-центров падает за счет $F \rightarrow F^+$ конверсии. С заполнением глубоких ловушек увеличивается число носителей заряда, захваченных дозиметрическими ловушками, что подтверждает наличие интерактивного взаимодействия между дозиметрическими и глубокими центрами захвата.

Обращает внимание тот факт, что температура максимума свечения F^+ -центров смещена приблизительно на 15 К в сторону высоких температур (см. рисунок 1). Этот результат свидетельствует о том, что термоактивационный процесс, приводящий к возбуждению F^+ -центров, может иметь иную природу по сравнению с аналогичным процессом при возбуждении F-центров.

На рисунке 2 (а, б) представлены зависимости интенсивности (I), светосуммы (S) и полуширины (w) дозиметрического пика ТЛ при различной длительности УФ возбуждения кристаллов (полоса 3.8 эВ).

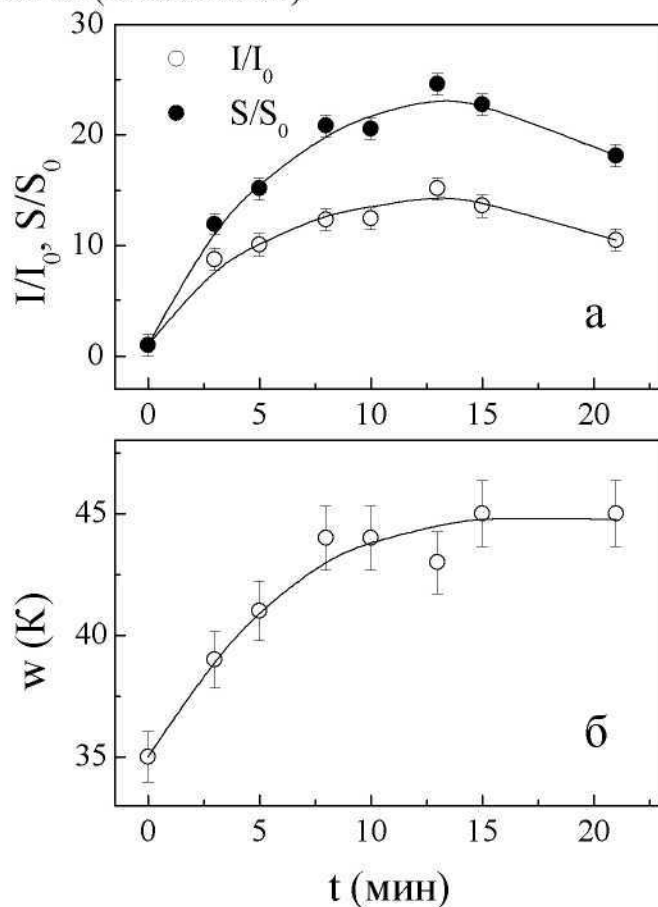


Рис. 2. Зависимости изменения параметров ТЛ дозиметрического пика при различной длительности УФ возбуждения кристаллов. I_0 и S_0 – интенсивность пика и светосумма ТЛ невозбужденного образца соответственно (полоса свечения 3.8 эВ)

Из приведенных данных видно, что с возрастанием продолжительности УФ возбуждения интенсивность ТЛ увеличивается примерно в 15 раз с одновременным существенным (на 10 К) уширением пика. В результате высвеченная светосумма возрастает в 25 раз. Насыщение в изменении всех трех параметров пика ТЛ наступает на 13 минуте возбуждения, затем наблюдается спад. Это насыщение может свидетельствовать о том, что существует предельная концентрация F^+ -центров, при которой прекращается заполнение активных ловушек, ответственных за ТЛ в полосе свечения 3.8 эВ. При достижении этой концентрации могут изменяться и термоактивационные процессы, приводящие к возбуждению F^+ -центров, что вызывает уширение пика ТЛ.

Качественно аналогичная картина наблюдается и в полосе свечения при 3.0 эВ, однако при существенно меньшем увеличении интенсивности и светосуммы по сравнению с полосой при 3.8 эВ.

С учетом формирования максимума свечения F^+ -центров в области более высоких температур, при которых уже наблюдается спад кривой свечения F -центров, анализ кинетических параметров проводили отдельно для нарастающего и спадающего участков дозиметрического

пика. На первом этапе кинетические параметры определяли методом исследования кривых изотермического затухания ТЛ. Такие кривые регистрировались в полосе 3.0 эВ при различной длительности УФ возбуждения в температурном диапазоне нарастания и спада дозиметрического пика. Кинетику затухания ТЛ исходных и возбужденных УФ - светом образцов иллюстрирует рисунок 3. Температуры изотермической выдержки выбраны на восходящем участке дозиметрического пика.

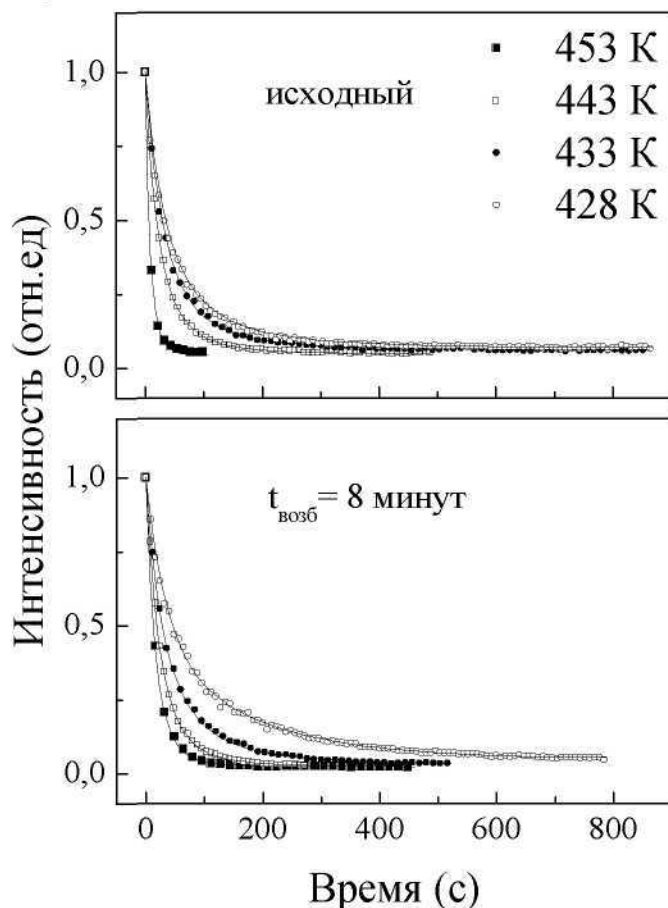


Рис. 3. Кривые изотермического затухания ТЛ (3.0 эВ) на восходящем участке дозиметрического пика при различных температурах для исходных и возбужденных УФ образцов (точки - эксперимент, линии - расчет)

Параметры ТЛ на восходящем участке дозиметрического пика оценивались в соответствии с уравнением затухания свечения при общем порядке кинетики [1]:

$$I(t) = \frac{I_0}{[1 + (b-1)p''t]^{\frac{b}{b-1}}} \quad (1),$$

где I_0 - интенсивность в начальный момент времени $t = 0$; параметр $p'' = p'n_0^{b-1}$ - имеет смысл приведенной вероятности термоактивационного опустошения ловушки; b -порядок кинетики.

Для получения значений параметров p'' и b использовалась методика аппроксимации экспериментальных кривых изотермического затухания согласно уравнению (1) с применением стандартного метода наименьших квадратов. Среднеквадратичное отклонение σ при определении порядка кинетики b составляло величину ± 0.1 , а для p'' имело значение ± 0.005 . Из данных рисунка

3 следует хорошее совпадение экспериментальных и расчетных кривых изотермического затухания ТЛ.

Наличие кинетики общего порядка при затухании ТЛ согласно уравнению (1) можно подтвердить в том случае, если зависимость $I^{(1-b)/b}$ от времени t описывается прямой линией с наклоном p'' . На рисунке 4 показана такая зависимость для исходных и возбужденных УФ образцов при $T=443$ К, соответствующей нарастающему участку дозиметрического пика. Видна линейная зависимость указанных выше величин, как для исходных, так и возбужденных УФ образцов.

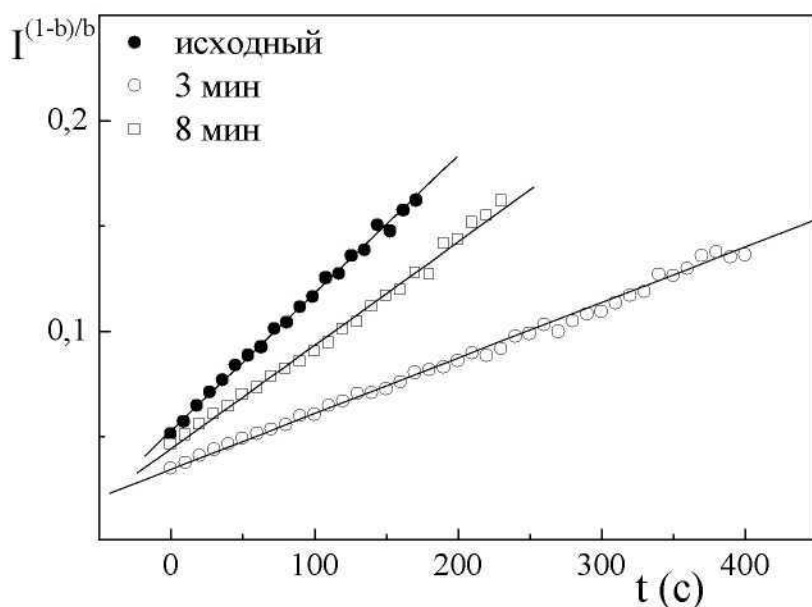


Рис. 4. Зависимость $I^{(1-b)/b}$ от времени t для исходных и возбужденных УФ образцов при температуре 443 К

Найденные при аппроксимации кривых затухания ТЛ величины наклона (p'') использовались для определения энергии активации E и предэкспоненциального множителя S'' , с учетом уравнения:

$$p'' = S'' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (2),$$

Из уравнения (2), представленного в аррениусовых координатах, можно получить значение энергии активации (E) и предэкспоненциального множителя (S'').

Значения величин E , S'' , b для нарастающего участка дозиметрического пика, рассчитанные для всех групп образцов при условии минимальной погрешности аппроксимации экспериментальных кривых изотермического затухания ТЛ, приведены в таблице 1. Из данных таблицы видно, что $1 < b < 2$, и это может свидетельствовать о реализации на нарастающем участке дозиметрического пика нескольких механизмов ТЛ с различным порядком кинетики. Энергии активации ТЛ исходного и возбужденных УФ образцов на восходящем участке дозиметрического пика отличаются незначительно – в пределах ошибки измерения. Среднее значение $\langle E \rangle$ энергии активации процессов ТЛ на нарастающем участке дозиметрического пика равно 1.06 ± 0.1 эВ.

Аналогичным образом была исследована кинетика затухания ТЛ на спадающем участке дозиметрического пика. Температуры изотермической выдержки были выбраны при 463, 468, 473, 478 К. Длительность УФ возбуждения образцов была принята такой же, как при исследованиях кинетики на восходящем участке дозиметрического пика. Результаты, представленные в таблице 1, показывают, что в спадающей части дозиметрического пика кинетика затухания ТЛ соответствует первому порядку.

Из анализа данных таблицы 1 следует, что на восходящем участке дозиметрического пика в полосе свечения 3.0 эВ энергия активации E практически не зависит от длительности УФ возбуждения, а на спадающем участке величина E растет с увеличением его продолжительности.

Таблица 1

Параметры кинетики затухания ТЛ в полосе 3.0 эВ на восходящем и спадающем участках дозиметрического пика

$t_{\text{возб}}$, (мин)	$b \pm 0.1$	$E \pm 0.1$, (эВ)	S'' , (с^{-1})
Восходящий участок			
0	1.47	1.18	$4.2 \cdot 10^{11}$
3	1.54	1.21	$1.2 \cdot 10^{12}$
8	1.45	1.06	$2.2 \cdot 10^{10}$
13	1.44	0.90	$0.5 \cdot 10^9$
18	1.35	0.96	$1.9 \cdot 10^9$
Спадающий участок			
0	1.2	0.67	$1.6 \cdot 10^6$
3	1.0	0.71	$7.2 \cdot 10^6$
8	1.0	1.00	$8.2 \cdot 10^9$

Таким образом, порядок кинетики ТЛ на восходящем и спадающем участках дозиметрического пика оказался различным. Обращает внимание более низкое значение энергии активации и частотного фактора на высокотемпературном участке кривой ТЛ. Этот результат согласуется с известным снижением энергии активации на спадающем участке дозиметрического пика, зарегистрированном при фракционном нагреве образцов.

Поскольку спадающий участок дозиметрического пика формируется в температурном диапазоне нарастания свечения F^+ -центров (3.8 эВ), целесообразно изучить кинетику ТЛ этой полосы и ее влияние на кинетические параметры дозиметрического пика.

Кривые изотермического затухания люминесценции регистрировались при длительности УФ возбуждения, соответствующей нарастанию и началу насыщения величин интенсивности и

светосуммы (см. рисунок 2). Анализировалась кинетика затухания ТЛ в температурном диапазоне 443-463 К.

Оценка кинетических параметров ТЛ проводилась с помощью компьютерной аппроксимации кривых изотермического затухания уравнением:

$$I(t) = I_0 \exp(-pt) \quad (3),$$

где p - вероятность высвобождения электрона из ловушки в зону проводимости описывается уравнением:

$$p = S \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (4),$$

Кривые затухания рассчитывались методом наименьших квадратов. Было найдено, что изотермическое затухание люминесценции при выбранных температурах хорошо описывается одной экспонентой в соответствии с мономолекулярной кинетикой процесса.

Так как значения p при выбранных температурах были определены при компьютерном моделировании кривых затухания ТЛ, то с помощью уравнения (4) из представления этих значений в аррениусовых координатах рассчитаны величины энергии активации E и частотного фактора S (таблица 2).

Таблица 2

Параметры кинетики затухания ТЛ в полосе свечения 3.8 эВ

$t_{\text{возб}}, \text{ мин}$	Мономолекулярная кинетика		Общий порядок кинетики	
	$E \pm 0.1, (\text{эВ})$	$S, (\text{с}^{-1})$	$E \pm 0.1, (\text{эВ})$	$S'', (\text{с}^{-1})$
8	1.20	$2.2 \cdot 10^{12}$	1.24	$6.6 \cdot 10^{12}$
13	1.47	$1.4 \cdot 10^{15}$	1.53	$6.0 \cdot 10^{15}$

Из данных таблицы видно, что с увеличением длительности УФ возбуждения, вызывающей повышение концентрации F^+ -центров, растут величины энергии активации, аналогично тому, как это наблюдалось на спадающем участке дозиметрического пика в полосе свечения 3.0 эВ (см. таблицу 1). При этом возрастают и значения частотного фактора.

С учетом уширения пика ТЛ при указанных условиях (см. рисунок 2) были проведены расчеты исследуемых параметров в предположении кинетики общего порядка. Они подтвердили мономолекулярный закон затухания ТЛ на спадающем участке дозиметрического пика при выбранной длительности УФ возбуждения образцов, а также факт увеличения энергии активации при увеличении концентрации F^+ -центров (таблица 2). Для объяснения этого результата можно предположить, что интенсивно протекающие при большой концентрации F^+ -центров процессы интерактивного взаимодействия дозиметрических ловушек с глубокими центрами захвата могут оказывать влияние на лимитирующую стадию термоактивационного возбуждения F^+ -центров в

исследуемом интервале температур. В пользу такого предположения свидетельствуют установленные аномалии поведения величин интенсивности и светосуммы в полосе свечения как F, так и F⁺-центров при изменении скорости нагрева. Наблюдаемые аномалии практически исчезают при заполнении глубоких ловушек.

Таким образом, в исследуемых кристаллах термолюминесценция дозиметрического пика в полосе свечения F-центров (3.0 эВ) наиболее корректно описывается кинетикой общего порядка. Наличие мономолекулярной кинетики ТЛ в полосе свечения F⁺-центров свидетельствует о том, что в диапазоне температур дозиметрического пика ТЛ в кристаллах аниондефектного оксида алюминия протекают принципиально разные термоактивационные процессы, ответственные за возбуждение F- и F⁺-центров. Этот результат соответствует литературным данным при изучении особенностей оптического поглощения на нарастающем и спадающем участках ТЛ дозиметрического пика [2]. В настоящее время нет убедительных доказательств протекания какого-либо конкретного механизма возбуждения F- и F⁺-центров в температурном диапазоне дозиметрического пика. Можно лишь отметить, что эти механизмы обусловлены распадом различных по структуре электронных возбуждений, связанных с дефектами, в том числе с анионными вакансиями [3].

В четвертой главе приводятся прямые экспериментальные доказательства корреляции интенсивностей свечения 3.8 эВ в температурном диапазоне ТЛ дозиметрических и глубоких ловушек.

С этой целью исследовались кривые ТЛ в полосе 3.8 эВ в широком температурном интервале при УФ возбуждении образцов оксида алюминия излучением дейтериевой лампы ДДС-30, нефилтрованный свет от которой фокусировался на образец при помощи кварцевой линзы, прозрачной в диапазоне поглощения F-центров. Кристаллы облучались β - излучением источника ⁹⁰Sr/⁹⁰Y тестовой дозой 50 мГр. Кривые ТЛ регистрировались в интервале температур 300-750 К.

Сначала измерялась ТЛ - чувствительность к излучению образцов в исходном состоянии (без предварительного фотовозбуждения). Из рисунка 5 (кривая 1) видно, что после воздействия тестовой дозой свечение в полосе 3.8 эВ практически не наблюдается.

Затем монокристалл оксида алюминия подвергли УФ возбуждению при температуре 650 К в течение 15 минут для заполнения глубокой ловушки с максимумом при 730 К и снова измерили ТЛ-чувствительность образца. На рисунке 5 (кривая 3) видно, что интенсивность ТЛ в полосе 3.8 эВ в диапазоне дозиметрического пика значительно выросла. Вместе с тем в области температур выше 600 К наблюдается начало еще одного интенсивного ТЛ сигнала, который соответствует известному пику при 730 К (первая глубокая ловушка).

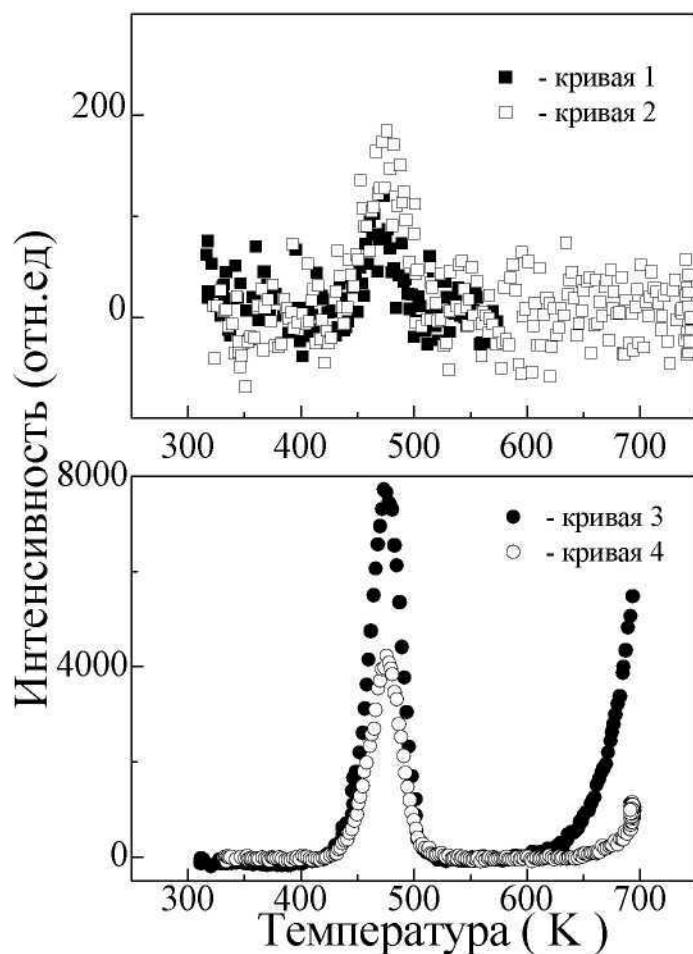


Рис. 5. Кривые ТЛ (в полосе 3.8 эВ) оксида алюминия в различных состояниях: 1 – исходный образец; 2 – после полного опустошения глубокой ловушки при 730 К; 3 – после возбуждения УФ светом; 4 – после частичного опустошения ловушки при 730 К

Для установления корреляции ТЛ - выхода в полосе 3.8 эВ для пиков при 450 и 730 К использовали процедуру постепенного термовысвечивания. Образец облучали тестовой дозой от β - источника, нагревали до 693 К и при этой температуре удерживали в течение одной минуты. При выбранной температуре и длительности УФ возбуждения наблюдалось свечение 3.8 эВ, практически стационарное по интенсивности. В то же время за одну минуту выдержки при указанной температуре глубокая ловушка не успевала полностью высветиться, что обеспечивало многократность цикла измерений. Затем процедура измерения (облучение и нагрев) повторялась снова.

В результате каждого описанного цикла измерения интенсивность ТЛ при $T=693$ К уменьшалась (см. рисунок 5, кривая 4). Процедуру продолжали до тех пор, пока эта интенсивность не стала сравнима с фоном. После этого образец нагрели до 920 К и снова измерили ТЛ в полосе 3.8 эВ. Из рисунка 5 (кривая 2) видно, что в этом состоянии образца, как и в исходном, дозиметрический пик едва заметен, а пик ТЛ при 730 К не регистрируется.

Полученные результаты рассмотрены с точки зрения состояния глубокой ловушки при 730 К. Облучение УФ - светом приводит к интенсивным процессам $F \rightarrow F^+$ конверсии. Если УФ возбуждение происходит при 650 К, то, как было отмечено ранее, происходит заполнение глубоких ловушек, в том числе ловушки с пиком ТЛ при 730 К. За счет этого резко усиливается

ТЛ в пике при 450 К в полосе 3.8 эВ (рисунок 5, кривая 3), поскольку с заполнением глубоких ловушек увеличивается вероятность захвата носителей заряда на дозиметрические ловушки [4]. Это предположение подтверждается экспериментально, поскольку видно, что свечение 3.8 эВ фактически исчезает в спектре основного дозиметрического пика после полного опустошения глубокой ловушки при 730 К в результате нагрева образца до 920 К (рисунок 5, кривая 2).

На рисунке 6 приведены зависимости интенсивности I термолюминесценции в полосе 3.8 эВ основного дозиметрического пика (кривая 1) и интенсивности ТЛ при $T=693$ К (кривая 2) от времени нагрева при постепенном опустошении глубокой ловушки (730 К).

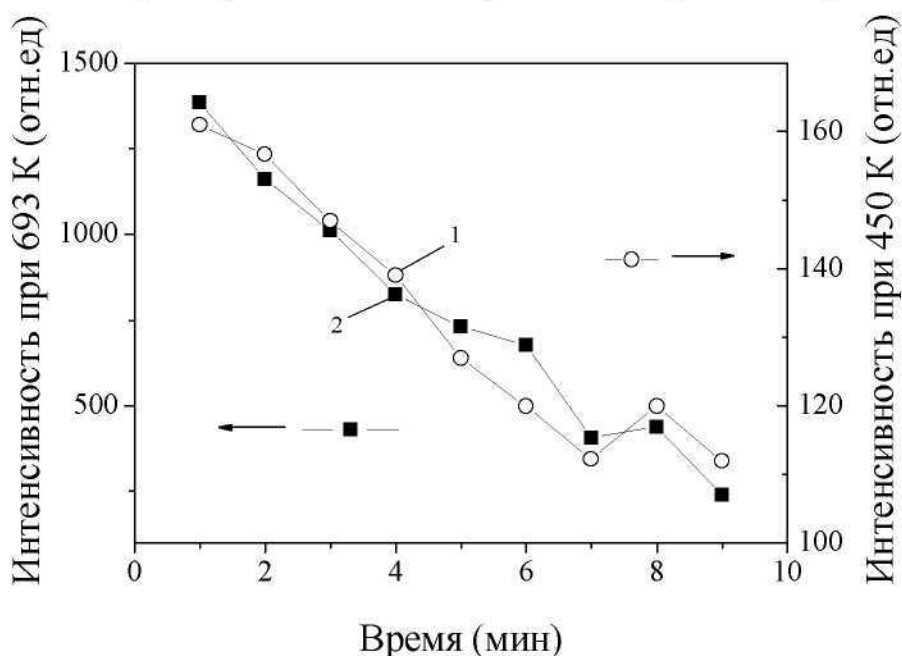


Рис. 6. ТЛ - выход при 450 К (1) и 693 К (2) в полосе 3.8 эВ

Естественно, что I_{693} падает при опустошении глубокой ловушки. В то же время обнаружилось, что аналогичным образом уменьшается отклик образца на тестовую дозу (кривая 1) в полосе 3.8 эВ. Таким образом, установлена прямая корреляция этих двух процессов. Небольшие отклонения при времени термовысвечивания ≥ 6 минут могут быть связаны с тем, что в результате β -облучения ловушка с пиком ТЛ при 730 К может частично заполняться. Однако в силу малости тестовой дозы можно пренебречь этим процессом.

Отметим также, что установленная корреляция хорошо согласуется с предполагаемым рекомбинационным механизмом исследуемого свечения при 3.8 эВ и дырочной природой глубокой ловушки 730 К. При нагреве выше 600 К освобожденные дырки захватываются F-центрами с образованием возбужденного состояния F^+ -центра. В результате наблюдается свечение при 3.8 эВ в температурном диапазоне пика с максимумом при 730 К. По мере ступенчатого высвечивания ТЛ этого пика уменьшается общее количество F^+ -центров, созданных в результате $F \rightarrow F^+$ конверсии при УФ возбуждении образца. В итоге синхронно уменьшается интенсивность свечения в полосе 3.8 эВ в температурном диапазоне дозиметрического пика.

Таким образом, в настоящей работе многократно подтвердилось предположение о том, что свечение 3.8 эВ в спектре ТЛ аниондефектного оксида алюминия тесно связано с состоянием глубоких ловушек, ответственных за пик ТЛ в области 730 К. Наблюдаемая корреляция позволяет делать выводы о заселенности глубокой ловушки (730 К) по интенсивности свечения 3.8 эВ в основном дозиметрическом пике.

Далее в главе приводятся результаты исследования изменений кинетических параметров ТЛ пиков, обусловленных свечением F^+ -центров, в зависимости от дозы облучения в интервале температур 300-900 К.

Имеются сведения, что в кристаллах оксида алюминия кроме активных центров, созданных собственными дефектами, присутствуют центры, образованные примесями, которые могут существенно влиять на спектральный состав и интенсивность дозиметрического пика, выступая в качестве конкурентов при захвате носителей заряда.

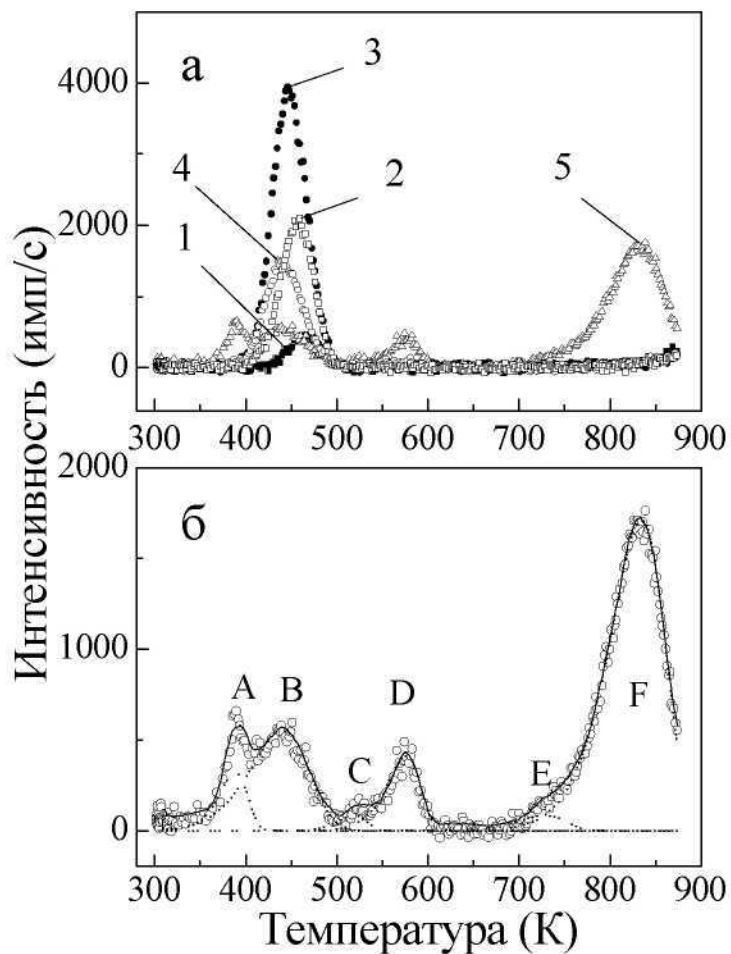
При низких дозах облучения превалирует дозиметрический пик ТЛ, люминесценция от примесных центров и глубоких ловушек практически не регистрируется. Можно полагать, что при высоких дозах облучения, когда наблюдается насыщение дозиметрического пика, носители зарядов будут захватываться на примесные и глубокие ловушки. Это позволит зарегистрировать соответствующие пики ТЛ и проследить динамику их изменения при росте дозы.

На рисунке 7, (а) представлены кривые ТЛ исследуемых кристаллов при варьировании дозы облучения. С увеличением дозы до 2 Гр растет интенсивность дозиметрического пика при 450 К и максимум ТЛ (T_m) смещается в область низких температур.

Можно отметить, что при дозе около 4 Гр насыщается дозиметрический пик, и появляется слабое свечение при 570 К, за которое ответственны примесные ионы хрома. Известно, что захват зарядов на эти ловушки происходит с изменением валентности ионов Cr^{3+} : при захвате электронов образуются центры Cr^{2+} , при захвате дырок Cr^{4+} . При дальнейшем росте дозы интенсивность ТЛ дозиметрического пика начинает уменьшаться, при этом его T_m практически не меняется и одновременно наблюдается увеличение свечения ионов Cr^{3+} . При дозе 30.7 Гр появляются новые ТЛ пики приблизительно при 390 К и при 835 К. Пик при 390 К, возможно, обусловлен свечением ионов титана. Последующий рост дозы вызывает насыщение максимумов ТЛ при 390, 450 и 570 К, однако начинает заметно увеличиваться интенсивность пика ТЛ при 835 К, обусловленного глубокими центрами захвата.

Поскольку ловушки, созданные примесями Cr^{3+} , являются более глубокими по сравнению с дозиметрическими ловушками, насыщение интенсивности дозиметрического пика (450 К) при дозе около 4 Гр и его уменьшение с дальнейшим повышением дозы можно объяснить захватом носителей заряда на конкурирующие ловушки, созданные примесями Cr^{3+} , о чем свидетельствует

Рис. 7, а. Кривые термо-высвечивания (3.8 эВ) монокристаллов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в интервале температур 300-900 К в зависимости от дозы: 1 - 0.06 Гр; 2 - 0.5 Гр; 3 - 1.9 Гр; 4 - 4.8 Гр; 5 - 76.8 Гр.



б. Пример разложения ТЛ пиков для дозы 76.8 Гр

увеличение интенсивности ТЛ пика при 570 К. После насыщения пиков при 390, 450 и 570 К в процесс конкурирующего захвата включаются еще более глубокие ловушки и увеличивается интенсивность ТЛ в соответствующих пиках.

Оценка кинетических параметров сложных пиков выполнялась с использованием общего уравнения формальной кинетики для термостимулированной люминесценции [1]:

$$I(T) = n_0 S \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \cdot \left[1 + \left((b-1) \frac{S}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT \right)^{\frac{b}{b-1}} \right]^{-\frac{b}{b-1}} \quad (5),$$

Результаты разложения КТВ в полосе 3.8 эВ на отдельные пики для дозы 76.8 Гр иллюстрирует рисунок 7, (б). При указанной дозе на КТВ присутствуют 6 ТЛ пиков, которые обозначены буквами: А-при 390 К, В-440 К, С-520 К, D-570 К, E-730 К и F-при 835 К. Доминирующим является пик ТЛ при 835 К, в нашей работе он обнаружен впервые. В полосе F-центров (3.0 эВ) указанный пик не регистрируется.

Были оценены с использованием уравнения (6) параметры кинетики кривых А-F в диапазоне исследованных доз.

В таблице 3 представлены расчетные значения T_m , b , E и S для всех пиков ТЛ. Из данных таблицы видно, что порядок кинетики пиков А и В изменяется с ростом дозы, а пики С, D, E и F описываются мономолекулярной кинетикой.

Таблица 3

Кинетические параметры ТЛ (3.8 эВ) при изменении дозы облучения

Пик	Диапазон доз, (Гр)	T_m , (К)	b	E , (эВ)	S , (c^{-1})
A	30.7-76.8	390-392	1.58-1.00	1.14-0.81	$9.46 \cdot 10^{13}$ - $3.70 \cdot 10^9$
B	0.06-1.9	467-447	1.19-2.00	1.32-1.30	$2.65 \cdot 10^{13}$ - $2.08 \cdot 10^{14}$
	3.8-76.8	442-440	2.00-1.00	1.28-0.49	$1.22 \cdot 10^{13}$ - $2.33 \cdot 10^4$
C	76.8	520	1.00	1.5	$4.48 \cdot 10^{13}$
D	4.8-76.8	571-586	1.00	1.30-1.79	$9.97 \cdot 10^9$ - $5.31 \cdot 10^{14}$
E	76.8	728	1.00	1.70	$4.38 \cdot 10^{10}$
F	30.7-76.8	840-835	1.00	1.80-2.08	$3.25 \cdot 10^9$ - $2.27 \cdot 10^{11}$

На рисунке 8 даны зависимости кинетических параметров основного пика ТЛ (450 К) в полосе 3.8 эВ при изменении дозы.

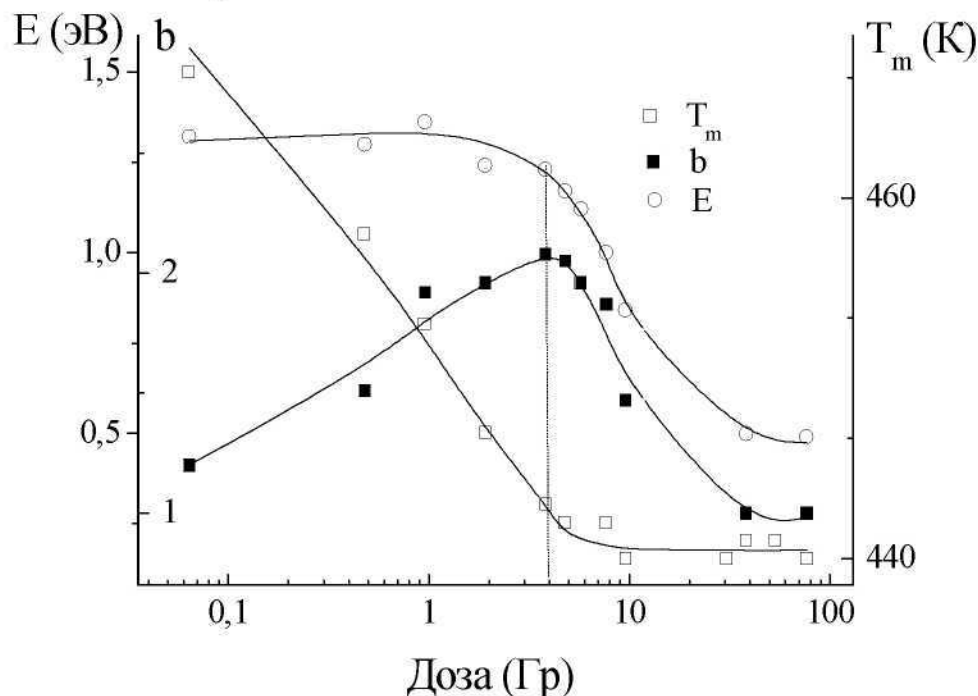


Рис. 8. Зависимость от дозы кинетических параметров ТЛ (3.8 эВ) для пика 450 К

Выше было отмечено, что насыщение дозиметрического пика с последующим уменьшением выхода ТЛ происходит при дозе 4 Гр. При этой дозе (с ростом дозы от 4 до 76.8 Гр) также наблюдается падение энергии активации ТЛ дозиметрического пика от 1.28 эВ до 0.5 эВ, а T_m практически перестает изменяться. При дозах до 4 Гр (с ростом дозы), уменьшается T_m , соответственно изменяется порядок кинетики от 1 до 2, а E практически не меняется. Таким

образом, доза 4 Гр является пороговой для исследуемых кристаллов: при ее достижении и дальнейшем увеличении обнаруживаются существенные изменения параметров кинетики. Как будет отмечено ниже (см. рисунок 10), при дозах выше 4 Гр начинает увеличиваться интенсивность ТЛ пика при 570 К, за которой ответственны примесные ионы хрома. Наблюдаемое изменение кинетических параметров может быть следствием интерактивного взаимодействия ловушек дозиметрического пика ТЛ с ловушками, созданными ионами хрома.

На рисунке 9 приведены зависимости, характеризующие связь параметров S и E , которая называется компенсационным эффектом [5]:

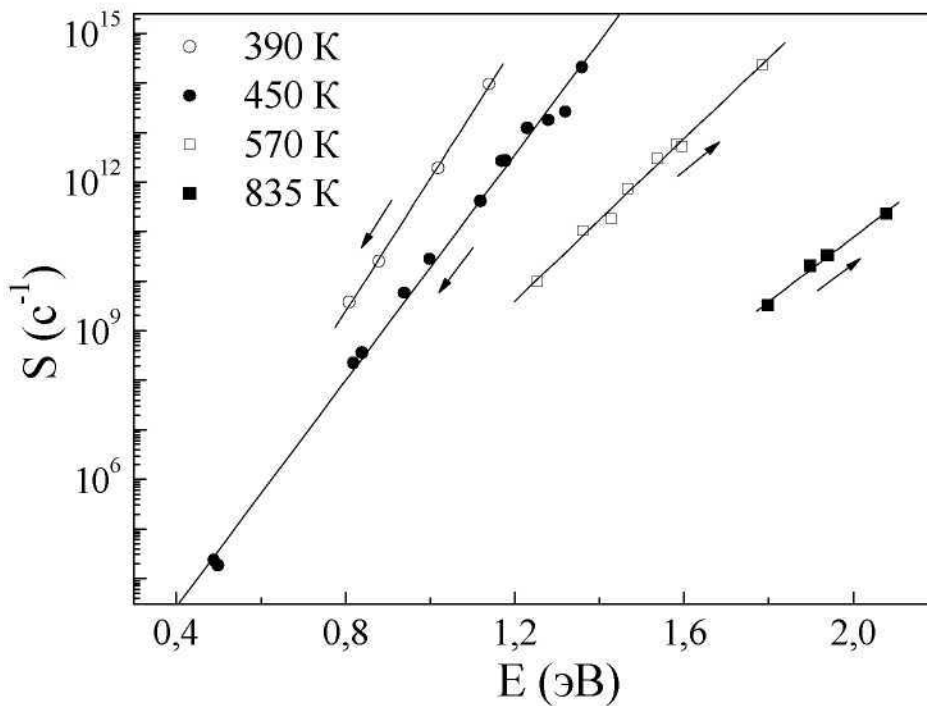
$$S = S_0 \cdot \exp\left(\frac{E}{kT_i}\right) \quad (6),$$

где S_0 – константа, отражающая соотношение между конфигурационным и колебательным вкладами в общее изменение энтропии термодинамической системы центров захвата и свечения. T_i - изокинетическая температура, которую определяют из наклона B линейных зависимостей (см. рисунок 9):

$$T_i = (\ln 10 \cdot kB)^{-1} \quad (7),$$

Предполагается, что при этой температуре скорость протекающих процессов будет постоянной. Это явление ранее наблюдалось в механизме температурного тушения фотолюминесценции F-центров оксида алюминия [6]. В настоящей работе компенсационный эффект обнаружен практически для всех пиков ТЛ в полосе свечения 3.8 эВ. При этом с повышением дозы значения энергии активации и частотного фактора ТЛ в пиках при 390 и 450 К уменьшаются. Вместе с тем наблюдается рост этих параметров у пиков при 570 и 835 К. Возможно, что наблюдаемая закономерность также связана с интерактивным взаимодействием мелких и дозиметрических ловушек (пики ТЛ при 350, 450 К) с более глубокими (570 и 835 К).

Рис. 9. Взаимосвязь между параметрами кинетики ТЛ различных пиков в кристаллах оксида алю-миния при изменении дозы (стрелками указано направление изменений дозы). Температуры максимумов ТЛ указаны на рисунке



Расчетные величины B , S_0 и T_i приведены в таблице 4. Значение изокинетической температуры для дозиметрического пика ТЛ равно 442 К, что соответствует температурному положению пика при его насыщении.

Таблица 4

Результаты расчета величин B , S_0 и T_i по данным рисунка 9

T_m (К)	390	450	570	835
B	13.4	11.4	8.2	6.5
S_0	0.05	0.071	0.6	0.0074
T_i (К)	376	442	615	775

В конце главы приводятся результаты анализа параметров ТЛ (светосуммы, интенсивности, полуширины каждого пика) в температурном интервале 300-900 К в зависимости от дозы.

На рисунке 10 представлены интенсивность и светосумма ТЛ пиков при 450 и 570 К в зависимости от дозы. Из рисунка видно, что интенсивность и светосумма дозиметрического пика растут с изменением дозы до 4 Гр. Дальнейшее увеличение дозы вызывает насыщение дозиметрического пика, затем интенсивность и светосумма начинают уменьшаться. Вместе с тем, при дозах выше 4 Гр наблюдается линейный рост интенсивности и светосуммы ТЛ в пике 570 К, за который ответственны ловушки, созданные ионами хрома.

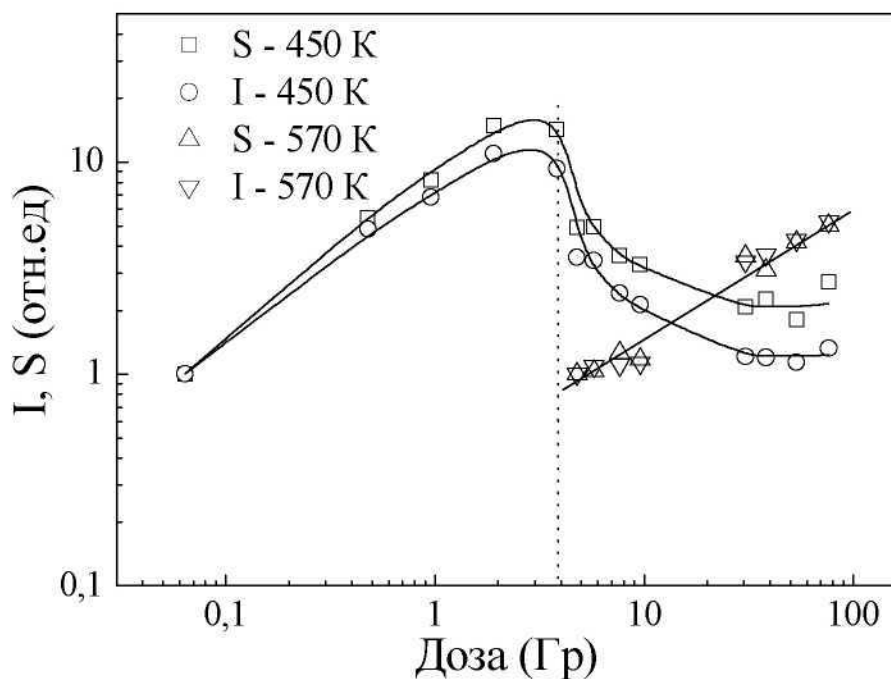


Рис.10. Зависимость светосуммы и интенсивности пиков ТЛ при 450 и 570 К аниондефектных кристаллов оксида алюминия в зависимости от дозы (полоса свечения 3.8 эВ)

Основываясь на представленных результатах исследования влияния дозы облучения на интенсивность ТЛ и кинетические свойства полосы свечения 3.8 эВ в температурном диапазоне от 300 до 900 К, можно отметить, что определяющим механизмом уменьшения свечения указанной полосы в различных пиках ТЛ с ростом дозы облучения является конкурирующий захват носителей зарядов на примесные центры и глубокие ловушки. Наблюдаемые эффекты могут быть связаны также с различиями в сечениях захвата носителей заряда ловушками, ответственными за ТЛ пики. Вполне вероятно, что сечение захвата дозиметрических ловушек больше, чем у остальных центров. Поэтому только после насыщения дозиметрических ловушек более глубокие центры начинают эффективно захватывать носители зарядов. Можно предположить, что при повышении чистоты кристаллов и оптимизации условий их выращивания с целью уменьшения концентрации примесных и глубоких ловушек дозовая характеристика основного пика ТЛ при 450 К сохранит линейность при более высоких дозах. Это расширит области применения ТЛ детекторов на основе кристаллов аниондефектного оксида алюминия.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам диссертационной работы:

1. В связи с необходимостью изучения природы ловушек и механизмов свечения в дозиметрическом пике ТЛ (450 К) исследованы температурные зависимости затухания ТЛ в полосах свечения F^+ (3.8 эВ) - и F (3.0 эВ) - центров в облученных аниондефектных кристаллах оксида алюминия. Проведен комплексный анализ кинетических параметров ТЛ в указанных полосах с применением различных методов термоактивационной спектроскопии (линейный нагрев, изотермическое затухание и вариация скоростей нагрева) который подтвердил, что на

восходящем и спадающем участках дозиметрического пика протекают принципиально различные по природе термоактивационные процессы при участии F^+ - и F^- - центров. С использованием литературных данных обсуждены возможные механизмы свечения этих центров.

2. На основе анализа изменений порядка кинетики, энергии активации, температурного положения, светосуммы и интенсивности ТЛ дозиметрического пика (полоса 3.8 эВ) при варьировании дозы облучения в широких пределах (0.064-76.8 Гр) определена пороговая доза – 4 Гр для исследуемых кристаллов оксида алюминия. При достижении этой дозы и ее дальнейшем увеличении происходят существенные изменения практически всех кинетических параметров ТЛ пика при 450 К, поскольку на кинетику ТЛ начинают активно влиять процессы захвата носителей заряда на ловушки, созданные ионами хрома.

3. Изучены закономерности свечения 3.8 эВ в анионодефектных монокристаллах оксида алюминия, облученных источником β^- -излучения на основе изотопа $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, в зависимости от заполнения глубоких ловушек. С этой целью исследовано влияние дозы облучения на ТЛ исследуемых образцов в указанной полосе в широком температурном диапазоне (300-900 К). Обосновано предположение, что в уменьшении интенсивности ТЛ в области дозиметрического пика (450 К) при увеличении дозы свыше пороговой (4 Гр) заметную роль играют центры захвата, созданные более глубокими ловушками.

В диссертации получены следующие частные результаты:

1. В полосе свечения 3.0 эВ на восходящем участке дозиметрического пика превалирует кинетика общего порядка. Высокотемпературная часть дозиметрического пика описывается мономолекулярной кинетикой.

2. Изотермическое затухание ТЛ в полосе 3.8 эВ у исследуемых образцов при различной длительности УФ возбуждения, при котором происходит конверсия $F \rightarrow F^+$ -центров, описывается мономолекулярной кинетикой.

3. Исследование поведения полосы свечения 3.8 эВ в спектре ТЛ анионодефектных монокристаллов оксида алюминия в зависимости от состояния глубокой ловушки при 730 К показало, что существует тесная корреляция между ТЛ выходом основного дозиметрического пика и степенью заселенности указанной глубокой ловушки.

4. Наблюдается компенсационный эффект в кинетике ТЛ у облученных разными дозами кристаллов оксида алюминия. С повышением дозы значения энергии активации и частотного фактора пиков ТЛ при 390 и 450 К уменьшаются. Вместе с тем наблюдается рост этих параметров у пиков ТЛ при 570 и 835 К.

5. Определена изокинетическая температура для облученных кристаллов оксида алюминия – 442 К. Установлено соответствие температурного положения дозиметрического пика ТЛ при его насыщении со значением изокинетической температуры.

6. Обнаружен новый ТЛ пик при $T=835$ К в полосе свечения 3.8 эВ. Впервые определена дозовая зависимость ТЛ глубокой ловушки, ответственной за указанный пик. Динамический диапазон этой зависимости свидетельствует о возможности высокотемпературных измерений больших доз при использовании аниондефектных кристаллов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Цитируемая литература

1. Chen R. Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena / R. Chen, S. W. S. McKeever. – Singapore : World Scientific, 1997. – P. 85-150.
2. Surdo A. I. Exciton mechanism of energy transfer to F-centers in dosimetric corundum crystals / A. I. Surdo, V. S. Kortov // Radiat. Meas. – 2004. – Vol. 38. - P. 667-671.
3. Рекомбинационная люминесценция не активированной окиси алюминия // П. А. Кулис [и др.] // Тр. / Латв. гос. ун-та. – 1985. – С. 85-123.
4. Nikiforov S. V. Thermal and optical ionization of F-centers in the Luminescence mechanism of Anion-Defective corundum crystals / S. V. Nikiforov, I. I. Milman, V. S. Kortov // Rad. Meas. – 2001. – Vol. 33, №5. – P. 547-551.
5. Exner O. Determination of the isokinetic temperature / O. Exner // Nature. – 1970. – Vol. 227, № 5256. – P. 366-367.
6. Вайнштейн И. А. Особенности температурного тушения фотолюминесценции 3.0 эВ в монокристаллах $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ / И. А. Вайнштейн, А. С. Вохминцев, В. С. Кортвов // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32, вып. 2. – С. 21-27.

Основные публикации автора по теме диссертации:

1. Кортвов В. С. Особенности кинетики термолюминесценции в дозиметрических кристаллах оксида алюминия / В. С. Кортвов, А. Орозбек уулу, И. А. Вайнштейн // Журн. прикладной спектроскопии. – 2006. – Т. 73, № 2. – С. 187–190.
2. Орозбек А. уулу. Люминесценция аниондефектных кристаллов оксида алюминия при высокодозном облучении / А. Орозбек уулу, В. С. Кортвов // «Снежинск и наука – 2006» : сб. науч. тр. Междунар. науч. –практ. конф. – Снежинск, 2006. – С. 177–178.
3. Орозбек А. уулу. Параметры термолюминесценции аниондефектного $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в полосах свечения 3.0 и 3.8 эВ / А. Орозбек уулу, И. А. Вайнштейн, В. С. Кортвов // Девятая отчетная конференция молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ : сб. ст. – Екатеринбург, 2006. – Ч. 4. – С. 265–267.

4. Орозбек А. уулу. Роль F^+ - центров в люминесценции кристаллов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ / А. Орозбек уулу, В. С. Кортон // Тезисы докладов II-летней школы по радиационной физике SCORh-2004. – Бишкек ; Каракол, 2004. – С. 53–54.

5. Учет температурного тушения при моделировании параметров ТЛ-пиков в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ / Е. А. Попко, А. Орозбек уулу, И. А. Вайнштейн, В. С. Кортон // Вестник УГТУ-УПИ. – Екатеринбург, 2004. – Спец. вып. – С. 145–147.

6. Kinetic Features of Thermoluminescence in Oxygen-Deficient Crystals of Aluminum Oxide / A. Orozbek uulu, I. A. Weinstein, A. I. Slesarev, V. S. Kortov // Изв. вузов. Физика. – 2006. – № 10. – С. 138–140.

7. Kortov V. S. The thermoluminescence kinetics of 3.8-eV band in anion-defective alumina / V. S. Kortov, A. Orozbek uulu, I. A. Weinstein // Eurasian Physical Technical Journal. – 2006. – V. 3, № 1 (5). – P. 35–38.

8. Specific features of 3.8-eV emission in TL spectra of oxygen-deficient corundum / I. A. Weinstein, P. E. Pelenyov, V. S. Kortov, A. Orozbek uulu // Phys. stat. sol. (C). – 2005. – Vol. 2, № 1. – P. 523–526.

Плоская печать

Формат 60×84 1/16

Бумага писчая

Тираж 100

Заказ
