

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ДОЗИМЕТРИЯ

Статья является обзором основных используемых на практике методов твердотельной дозиметрии. Рассмотрены физические эффекты, наблюдающиеся при взаимодействии излучения с твердым телом, положенные в основу этих методов. Приводятся сведения о дозиметрических материалах и их характеристиках, принципах работы считывающей аппаратуры, проанализированы достоинства и недостатки каждого из методов. Основное внимание в работе уделено методу термолюминесцентной дозиметрии, получившему наибольшее практическое применение. Приводится описание дозиметрических свойств детекторов ТЛД-500К на основе анион-дефектного корунда.

Введение

По мере возрастания роли радиационных излучений практически во всех областях человеческой деятельности встает проблема их обнаружения и измерения. В последнее время к традиционным задачам дозиметрии (контроль радиационной безопасности человека и окружающей среды, клиническая и технологическая дозиметрия), прибавились проблемы, связанные с утилизацией ядерных отходов, демонтажом боевых ядерных зарядов, ликвидацией и анализом последствий масштабных радиационных аварий и экологических катастроф.

Типы регистрируемых на практике излучений чрезвычайно разнообразны по своей физической природе. Это квантовые электромагнитные излучения с энергией от единиц килоэлектронвольт до несколько десятков мегаэлектронвольт, быстрые и медленные нейтроны, смешанные гамма-нейтронные поля, протоны, α -частицы, быстрые и медленные электроны, фотонные излучения ультрафиолетового диапазона длин волн.

Для регистрации ионизирующих излучений различной физической природы используются методы, основанные на физико-химических эффектах, возникающих при взаимодействии излучения с веществом. В последние годы наибольшее распространение получили методы твердотельной дозиметрии, где в качестве чувствительного вещества детектора излучений используются конденсированные твердые тела полупроводниковой и диэлектрической природы.

Физические эффекты, наблюдаемые при действии излучения на вещество и положенные в основу методов твердотельной дозиметрии, приведены на рис.1 [1-3]. В зависимости от решаемых задач детекторы можно разделить на два класса: работающие в реальном времени и запоминающие. Первые используются в тех случаях, когда необходимо измерять поле ионизирующего излучения непосредственно в момент его воздействия. В детекторах этого типа используются следующие радиационные эффекты: вспышки люминесценции (сцинтилляционный детектор), индуцированная проводимость (полупроводниковый детектор), выделение тепла (калориметр). В запоминающих детекторах "память" о радиационном воздействии сохраняется длительное время после прекращения действия излучения. В них образующиеся под действием излучения свободные носители заряда могут локализовываться на центрах захвата, изменяя их энергетическое состояние. Возможность непосредственного обнаружения центров в таких неравновесных состояниях используется в дозиметрии, основанной на явлениях электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и оптического поглощения. Кроме того, возбужденные излучением центры могут быть возвращены в исходное состояние при сообщении им дополнительной энергии (термическая, оптическая стимуляция, растворение материала в жидкости). Наблюдающиеся при этом изменения интенсивности люминесценции, электрической проводимости, экзоелектронной эмиссии служат мерой поглощенной дозы. В соответствии с используемым явлением и способом стимуляции выделяют методы дозиметрии, основанные на термолюминесценции (ТЛ), термостимулированной экзоелектронной эмиссии (ТСЭЭ), термостимулированной проводимости, оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ), люминесценции. Комбинированное применение этих явлений позволяет повысить надежность измерений, расширить функциональные возможности дозиметрических систем.

Запоминающие твердотельные детекторы позволяют решать задачи в областях, где применение дозиметров, работающих в реальном времени (ионизационных, сцинтилляционных, полупроводниковых), встречает технические и принципиальные трудности. Это измерения очень высоких и очень низких поглощенных доз и мощностей поглощенных доз, импульсных излучений и т.д.

В данной работе основное внимание будет уделено запоминающим твердотельным детекторам, основанным на явлениях термо- и оптически стимулированной люминесценции.



Рис.1. Физические процессы в облученных твердых телах и их возможные применения в дозиметрии.

Термолюминесцентная дозиметрия

Среди интегрирующих твердотельных детекторов наибольшее распространение получили термолюминесцентные детекторы ионизирующих излучений [3-6]. Например, из 96 докладов, опубликованных в трудах 12-й Международной конференции по твердотельной дозиметрии (1998 г., Бургос, Испания) [7] термолюминесцентной дозиметрии (ТЛД) было посвящено более 60. Среди 174

дозиметрических комплектов, представленных на 11-х Международных сравнительных испытаниях дозиметров окружающей среды, где участвовало 114 организаций из 31 страны, подавляющее большинство (152) представляли собой ТЛД-системы. Помимо ТЛД, использовались три фотопленочных комплекта, 5 электретных дозиметров и два дозиметра на основе фотоломинесцентных стекол [8]. К основным достоинствам метода ТЛД относят: широкий диапазон измеряемых доз; высокая чувствительность; длительное хранение информации (малый фединг); возможность многократного использования детекторов; отсутствие зависимости показаний от параметров окружающей среды; универсальность, позволяющая применять дозиметр для регистрации разных видов излучений; полная автоматизация процесса измерения и обработки результатов [3-6].

1. Физические основы метода

Метод ТЛД основан на том, что некоторые неорганические вещества с определенным сочетанием дефектов кристаллической решетки примесного и собственного происхождения - так называемые запасающие кристаллофосфоры - после возбуждения ионизирующим излучением при нагревании испускают свет. Количество испущенных при этом оптических квантов оказывается пропорциональным поглощенной дозе ионизирующего излучения. Физический процесс термолуминесценции и его основные закономерности могут быть объяснены с помощью зонной теории твердого тела в рамках кинетических представлений.

При возбуждении кристаллофосфора ионизирующим излучением в нем образуются свободные электроны и дырки. Свободные носители могут рекомбинировать друг с другом либо захватываться в дефектных местах и при комнатной температуре длительное время сохраняться в локализованных состояниях. В простейшей модели для описания ТЛ [9,10], имеется два локализованных уровня, один из которых играет роль ловушки (N), а другой - центра рекомбинации (H) (рис.2). Для упрощения выкладок рассматривают процессы только с участием электронов. При этом аналогичные рассуждения могут быть проведены и для дырок. При стимуляции под действием температуры происходит освобождение электронов в зону проводимости (переход 1). Из этой зоны электроны могут быть повторно захвачены на ловушки (переход 2) или рекомбинировать с дырками на центре рекомбинации (переход 3). Вероятность выхода электрона из ловушки в зону проводимости описывается уравнением:

$$p = S \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (1)$$

Здесь E - энергия активации процесса или глубина ловушки, S - частотный фактор, k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура. Величина частотного фактора обычно интерпретируется как число актов взаимодействия электрона с фононами решетки в единицу времени. Обычно величина S принимает значения, равные частоте колебаний решетки кристалла (10^{12} - 10^{14} с⁻¹).

Количественное описание кинетики процесса ТЛ сводится к уравнениям баланса [9,10], описывающим временные зависимости концентрации носителей заряда. Для простейшей двухуровневой модели система уравнений, описывающих процесс опустошения ловушек, имеет вид:

$$\frac{dn}{dt} = n_c(N - n)A - np \quad (2)$$

$$\frac{dn_h}{dt} = -n_c n_h A_r \quad (3)$$

$$\frac{dn_c}{dt} = np - n_c(N - n)A - n_c n_h A_r \quad (4)$$

где n_c - концентрация электронов в зоне проводимости; n - концентрация электронов в ловушках; n_h - концентрация захваченных дырок; N - концентрация активных электронных ловушек (глубиной E); A - сечение повторного захвата; A_r - сечение рекомбинации. Интенсивность ТЛ как функция времени при термостимуляции пропорциональна скорости рекомбинации электронов и дырок:

$$I(t) = -\frac{dn_h}{dt} \quad (5)$$

Источником дозиметрической информации является зависимость интенсивности ТЛ от температуры, которая называется кривой термовысвечивания (КТВ). Для аналитического описания этой зависимости необходимо знание закона нагрева.

Система уравнений (2)-(4) аналитически в общем виде не решается. Однако наиболее часто используют так называемое квазиравновесное приближение, которое сводится к двум условиям [9,10]:

$$n_c \ll n; \quad \frac{dn_c}{dt} \ll \frac{dn}{dt} \quad (6)$$

В зависимости от соотношений вероятностей повторного захвата и рекомбинации реализуются два вида кинетики релаксационного процесса. При пренебрежимо малой вероятности повторного захвата наблюдается процесс с кинетикой первого порядка. При этом интенсивность ТЛ прямо пропорциональна концентрации заполненных ловушек:

$$I(t) = pn = nS \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (7)$$

При изменении температуры по линейному закону $T=T_0+\beta T$ КТВ может быть описана выражением:

$$I(T) = n_0 S \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \exp\left[-\frac{S}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT\right] \quad (8)$$

где T_0 - начальная температура, n_0 - исходная концентрация электронов в ловушках, β - скорость нагрева.

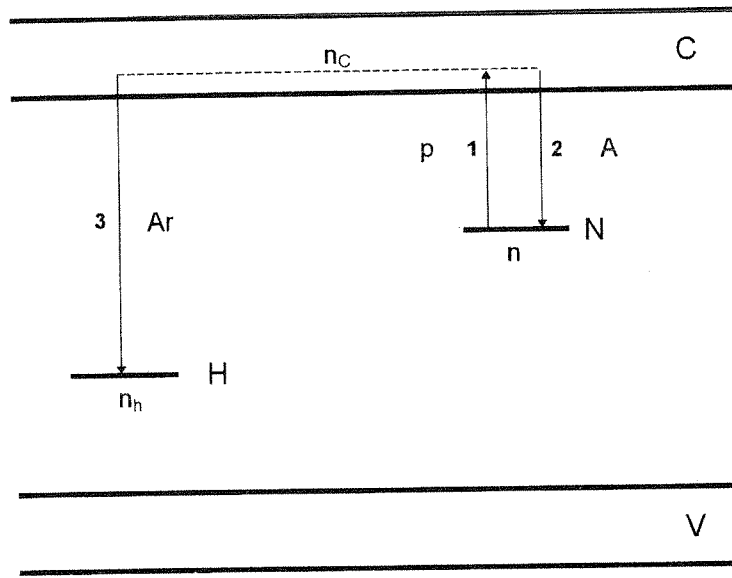


Рис.2. Энергетическая зонная схема простейшей двухуровневой модели ТЛ. N - ловушка, H - центр рекомбинации. Переходы: 1 - термическое опустошение ловушек; 2 - захват электронов на ловушки; 3 - излучательная рекомбинация. Остальные обозначения приведены в тексте.

В случае, если повторный захват является доминирующим процессом, реализуется процесс с кинетикой второго порядка. Интенсивность ТЛ пропорциональна квадрату концентрации заполненных ловушек:

$$I(t) = n^2 S' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (9)$$

при $S' = S/N$. Для линейного нагрева:

$$I(T) = n_0^2 S' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \cdot \left[1 + (n_0 S' / \beta) \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT\right]^{-2} \quad (10)$$

В ситуации, когда нельзя пренебречь ни одним из упомянутых процессов, имеет место так называемая кинетика общего порядка:

$$I(t) = n^b S' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (11)$$

где b - порядок кинетики процесса. Выражение для КТВ общего порядка кинетики:

$$I(T) = n_0^b S'' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \cdot \left[1 + ((b-1)S' / \beta) \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT\right]^{-\frac{b}{b-1}} \quad (12)$$

где $S'' = S'n_0^{b-1}$. Порядок кинетики характеризует соотношение вероятностей повторного захвата и рекомбинации и изменяется в пределах $1 < b < 2$.

Анализ уравнений, описывающих КТВ кристаллофосфора, показывает, что интенсивность ТЛ пропорциональна исходной концентрации носителей в ловушке и, следовательно, поглощенной энергии излучения. КТВ имеет форму пика с максимумом при определенной температуре T_m , пропорциональной энергетической глубине ловушки E . С увеличением скорости линейного нагрева температура максимума сдвигается в область высоких температур. В практической дозиметрии

используют два параметра КТВ: светосумму (выход ТЛ) $S = \int_{T_1}^{T_2} I(T) dT$ (интегральный метод) и

интенсивность пика (пиковый метод). Оба этих параметра оказываются пропорциональными поглощенной дозе излучения. Интегральный метод, т.е. измерение площади под КТВ, - наиболее точный и характеризуется меньшей зависимостью результатов от технических параметров измерительной аппаратуры. Пиковый метод более чувствителен к режиму нагрева, однако он более эффективен при измерении малых доз [4,6].

Простая двухуровневая модель позволяет установить основные закономерности ТЛ-процесса. В реальных кристаллофосфорах происходящие процессы намного сложнее, поскольку в рекомбинационном процессе, как правило, участвует несколько типов ловушек и центров свечения, взаимодействующих друг с другом. Это приводит к появлению специфических особенностей ТЛ, не вытекающих из простейшей модели, которые необходимо учитывать в дозиметрической практике (зависимость чувствительности от скорости нагрева, аномальный фединг, сверхлинейность дозовой характеристики, и т.д.). Для их описания простейшую модель модифицируют введением в рассмотрение дополнительных уровней центров захвата и рекомбинации [11-14].

2. Дозиметрические материалы и их характеристики

Люминофоры, предназначенные для использования в практической ТЛ-дозиметрии, должны удовлетворять целому ряду специфических требований [3,4,6]. К ним относятся: 1) высокая чувствительность для измерения малых доз радиации; 2) линейность дозовой характеристики в возможно более широком интервале доз; 3) малый фединг; 4) отсутствие зависимости чувствительности от мощности дозы и энергии ионизирующего излучения; 5) спектр люминесценции, согласованный со спектральной чувствительностью фотоприемника; 6) стабильность параметров при многократном использовании и хранении; 7) дешевизна и возможность массового производства. Эти требования с учетом специфики физического эффекта, положенного в основу метода детектирования излучений, могут быть эксплоатированы и на материалы для ТСЭЭ, ЭПР и других методов дозиметрии.

Достижение сочетания столь многообразных свойств в одном материале является чрезвычайно сложной задачей. Несмотря на то, что для возможных дозиметрических применений были изучены сотни различных люминофоров, в настоящее время в практической дозиметрии используется лишь около десятка материалов, в разной степени удовлетворяющих перечисленным требованиям.

Основным приемом для формирования требуемых служебных свойств материалов для ТЛД является создание дефектов в их структуре. Наиболее широко используемыми в ТЛД являются материалы на основе фторида лития, который является типичным представителем класса щелочно-галогидных кристаллов (ЩГК). По современным представлениям в этом классе диэлектриков доминирующим является электронный механизм образования радиационных дефектов, связанный с распадом электронных возбуждений и рождением точечных дефектов [15]. В настоящее время модификация ТЛ свойств фтористого лития производится в основном путем вариации примесного состава соединения. При этом определяющую роль в механизме ТЛ LiF играют примесно-вакансионные комплексы, образованные собственными дефектами кристаллической решетки и атомами активатора. Наибольшее распространение в дозиметрии получили материалы на основе фтористого лития, легированного ионами Mg и Ti или Mg, Cu и P [16-18]. Детали механизма ТЛ в этих кристаллах до сих пор дискутируются [19,20]. Детекторы на основе LiF обладают чувствительностью, достаточной для решения большинства задач ТЛ-дозиметрии, характеризуются незначительной зависимостью показаний от энергии излучения благодаря тканеквивалентности материала детектора, не светочувствительны. Вместе с тем, они недостаточно чувствительны при измерении фоновых доз, имеют сложную кривую термовысвечивания, содержащую несколько

перекрывающихся пиков, и требуют перед повторным использованием специальной процедуры отжига.

Наряду с разработками детекторов излучений на основе щелочно-галогидных кристаллов ведутся непрерывные исследования по созданию радиационно-чувствительных сред на базе принципиально других классов веществ, важнейшими из которых являются такие широкозонные оксидные материалы, как Al_2O_3 , BeO , MgO , SiO_2 . В отличие от ШГК, в оксидных кристаллах электронный механизм образования дефектов, как правило, не реализуется. В них радиационные дефекты образуются по ударному механизму, что обуславливает их высокую радиационную стойкость [21]. Собственные дефекты в этих материалах могут создаваться только корпускулярными видами излучений (нейтронами, электронами, ионами). Рентгеновское или гамма-излучение меняет лишь зарядовое состояние дорадиационных или биографических дефектов и примесей, не приводя к образованию новых структурных нарушений, и в этом заключается принципиальное отличие их воздействия на широкозонные оксидные диэлектрики по сравнению с ШГК. Альтернативным методом создания дефектов в решетке широкозонных оксидов и, следовательно, направленного изменения их свойств является термообработка кристаллов в различных термохимических условиях. Несовершенство полученных таким образом кристаллов заключается в отклонении от стехиометрического состава за счет дефицита компонент в анионной или катионной подрешетках соединения. В результате исследований было установлено, что дефекты, образованные кислородными вакансиями, играют определяющую роль в формировании оптических, люминесцентных, экзотермических свойств кристаллов целого ряда широкозонных оксидов (Al_2O_3 , MgO , BeO , ZrO_2) [22-24]. В середине 80-х годов в Уральском государственном техническом университете (г. Екатеринбург) была разработана технология получения ТЛ детекторов на основе анион-дефектного α - Al_2O_3 , основанная на выращивании монокристаллов корунда в сильнейших восстановительных условиях, обусловленных присутствием графита, что приводило к созданию высокой концентрации кислородных вакансий [25]. По данным измерений спектров оптического поглощения концентрация F -центров в дозиметрических кристаллах составляет величину порядка 10^{17} см^{-3} [26]. Созданные детекторы ТЛД-500К (ТУ 2655-006-02069208-95) [26,27] по своим характеристикам существенно превосходят отечественные и не уступают лучшим зарубежным аналогам. В настоящее время они широко используются на АЭС, предприятиях атомной промышленности, центрах санитарного надзора, других организациях здравоохранения как в нашей стране, так и за рубежом.

Основные дозиметрические характеристики детекторов ТЛД-500К в сравнении с другими материалами для ТЛД представлены в таблице [28].

Главное достоинство детекторов ТЛД-500К - их высокая чувствительность к излучению. КТВ кристаллов α - Al_2O_3 имеет изолированный пик при 450 К, что позволяет технически просто и быстро считывать дозиметрическую информацию. Небольшая полуширина и оптимальное температурное положение дозиметрического пика ТЛ обеспечивают с одной стороны хорошую сохраняемость дозиметрической информации (фединг за год хранения в темноте не превышает 5%), а с другой - позволяют легко отделять люминесцентный сигнал от теплового излучения нагревательного элемента. Спектр люминесценции имеет максимум при 420 нм и хорошо согласуется с максимумом спектральной чувствительности малошумящих ФЭУ, что важно для эффективной регистрации ТЛ в дозиметрической аппаратуре. Эти свойства, наряду с высокой чувствительностью и низким собственным фоном детектора, позволяют получить нижний порог регистрируемых доз порядка 1 мкГр [26]. При больших дозах отклик детекторов остается линейным до 0,2 Гр, после чего начинается его сверхлинейный рост. Таким образом, динамический диапазон чувствительности детекторов составляет семь порядков, что позволяет решать задачи как дозиметрии малых доз при радиационном мониторинге окружающей среды, так и регистрации аварийных доз.

Существенным достоинством детекторов ТЛД-500К является возможность их многократного использования без дополнительной термообработки при регистрации малых доз, что упрощает и удешевляет их применение. Кроме того, по сравнению с фторидом лития монокристаллический оксид алюминия обладает высокой механической прочностью, химической и радиационной устойчивостью, что увеличивает срок эксплуатации детекторов.

Интегральная чувствительность детекторов ТЛД-500К зависит от скорости нагрева при считывании [26,29]. При возрастании скорости нагрева от 1 К/с до 10 К/с чувствительность детекторов уменьшается в 4,5 раза. Эта зависимость является одним из недостатков детекторов, поскольку представляет собой источник возможных ошибок при измерениях. Эффект связывается с температурным тушением люминесценции F -центров [12,30,31].

Нетканеэквивалентность детекторов ТЛД-500К (эффективный атомный номер материала детектора составляет 10,2) приводит к существенной зависимости чувствительности от энергии фотонного излучения (ход с жесткостью) [26]. Для устранения энергетической зависимости чувствительности детекторов необходимо применять в кассетах корректирующие фильтры.

Таблица

Сравнительные характеристики основных материалов, используемых в ТЛ-дозиметрии

Тип	Материал	Чувствительность к ^{60}Co относительно LiF	Фединг	Диапазон регистрируемых доз	Энергетическая зависимость чувствительности, $30 \text{ кэВ}/^{60}\text{Co}$	Эффективный атомный номер	Температура основного пика, °C	Спектр ТЛ, нм
TLD-100 (США)	LiF:Mg,Ti	1,0	5% в год	10 мкГр - 10 Гр	1,25	8,2	195	350-600 (400 max)
TLD-100H (США)	LiF:Mg,Cu,P	15	Незначительный	1 мкГр - 10 Гр	0,98	8,2	220	400
TLD-200 (США)	CaF ₂ :Dy	30	16% за 2 нед.	1 мкГр - 10 Гр	12,5	16,3	180	483,5 max
TLD-400 (США)	CaF ₂ :Mn	10	12% за 3 мес.	1 мкГр - 100 Гр	13	16,3	260	440-600 (500 max)
ТЛД-500К (Россия)	Al ₂ O ₃	30	5% в год	0,5 мкГр - 1 Гр	2,9	10,2	185	420 max
TLD-900 (США)	CaSO ₄ :Dy	20	8% за 6 мес.	1 мкГр - 100Гр	12,5	15,5	220	480, 570
ДТГ-4 (Россия)	LiF:Mg,Ti	2,5	5% за год	50 мкГр - 50 Гр	1,36	8,2	220	350-600 (410 max)

Детекторы ТЛД-500К чувствительны к свету. Светочувствительность проявляется в трех случаях [26]. Во-первых, в облученных детекторах под действием дневного света происходит оптическое опустошение центров захвата, ответственных за дозиметрический пик при 450 К, и, как следствие, уменьшение последующего ТЛ-отклика (светоиндуцированный фединг). Этот эффект зависит от освещенности и времени экспозиции детекторов на свету. При освещенности 300 лк светоиндуцированный фединг не превышает 3% за 1 мин. Во-вторых, наблюдается эффект генерации ТЛ-сигнала при воздействии ультрафиолетового излучения с длиной волны менее 300 нм, обусловленный оптической ионизацией F -центров в кристалле α -Al₂O₃. В-третьих, после высокодозного облучения наблюдается рост светочувствительности в результате заполнения глубоких ловушек, присутствующих в материале детектора. Под действием дневного света происходит оптическое переселение носителей заряда с глубоких ловушек на центры захвата, ответственные за дозиметрический пик. Для устранения этого эффекта после накопления детектором при эксплуатации суммарной дозы более 0,1 Гр рекомендуется отжигать детекторы на воздухе при температуре 800 °C в течение 10-15 мин., что приводит к опустошению глубоких ловушек. Глубокие ловушки оказывают существенное влияние и на другие свойства детекторов на основе α -Al₂O₃. Результаты недавних исследований показали, что заполнение глубоких ловушек приводит к росту чувствительности, уменьшению степени ее зависимости от скорости нагрева при считывании, а также к улучшению линейности дозовой характеристики детекторов [32,33].

3. Аппаратура для ТЛД

Для практического использования ТЛ-детекторы помещают в кассету дозиметра по одному - по четыре для измерения разных компонент излучения. Кассету маркируют с помощью различных систем кодировки, идентифицирующей пользователя дозиметра, а также позволяющей учесть индивидуальную чувствительность детекторов. Термолуминесцентный дозиметрический комплект,

используемый в практической ТЛД, обычно включает в себя набор дозиметров и измерительное устройство для считывания дозиметрической информации, а также вспомогательное оборудование (печь для отжига, источник излучения для градуировки дозиметров и т.д.). Современные отечественные и зарубежные ТЛД-системы (АКИДК (г. Ангарск), САПФИР (г. Екатеринбург), HARSHAW (США), RADOS (Финляндия)) работают под управлением персональных компьютеров, что позволяет автоматизировать большинство операций считывания, хранения и обработки дозиметрической информации.

Принципы построения считывающей аппаратуры для ТЛД рассмотрим на примере автоматизированной термолюминесцентной дозиметрической системы САПФИР-001, разработанной в Уральском государственном техническом университете совместно с Уральским электромеханическим заводом (ТУ 4362-005-02069208-95) [34]. Она предназначена для измерения эквивалентной дозы гамма-, рентгеновского и бета-излучений. Система САПФИР включает в себя комплект дозиметров с детекторами ТЛД-500К и устройство загрузочное термолюминесцентное (УЗТ), работающее совместно с персональным компьютером IBM PC.

Система комплектуется дозиметрами двух типов: БД-1 для измерения эквивалентной дозы рентгеновского и гамма-излучений; БД-2 для измерения эквивалентной дозы рентгеновского, гамма- и бета-излучений, в том числе в смешанных полях. Дозиметры БД-1 и БД-2 состоят из двух элементов: термолюминесцентной карточки с упакованными во фторопластовую пленку четыремя детекторами и кассеты. На лицевой поверхности ТЛ-карточки нанесен номер дозиметра, идентифицирующий пользователя. В крышке кассеты располагаются четыре полусферических полости с фильтрами, которые обеспечивают необходимую энергетическую и угловую зависимости чувствительности дозиметров. Дозиметры БД-1 и БД-2 различаются тем, что в дозиметре БД-1 эффективная толщина стенки крышки перед детекторами составляет 1000 мг/см^2 . В дозиметре БД-2 три детектора расположены за стенкой с эффективной толщиной 1000 мг/см^2 и один детектор за стенкой толщиной 100 мг/см^2 .

В состав УЗТ входят:

- подсистема регистрации ТЛ, в состав которой входят ФЭУ, источник его питания, измерительный преобразователь, светосостав постоянного действия (СПД). В качестве СПД использован радиолюминесцентный источник на основе радионуклида ^{14}C . С его помощью производится контроль чувствительности измерительного тракта и корректировка результатов измерений;

- подсистема нагрева, состоящая из двух нагревательных элементов с термодарами, двух силовых блоков и устройства управления. Подсистема обеспечивает реализацию программно-управляемого закона нагрева детекторов;

- подсистема интерфейса связи. Она включает в себя контроллер, обеспечивающий обмен информацией между управляющей ЭВМ и УЗТ через последовательный интерфейс RS-232C.

В приборе реализован линейный режим нагрева детекторов. Скорость нагрева регулируется и подбирается так, чтобы оптимизировать чувствительность системы и время измерения. В зависимости от интенсивности светового потока чувствительность измерительного тракта автоматически регулируется путем изменения напряжения питания ФЭУ. Программа автоматически производит корректировку результатов измерений с учетом напряжения питания ФЭУ и показаний СПД, вычитание темнового тока ФЭУ и расчет высвеченной каждым детектором светосуммы. Доза фотонного излучения определяется как среднее значение показаний 4-х (дозиметр БД-1) или 2-х (дозиметр БД-2) детекторов. Доза бета-излучения определяется как разность между показанием детектора, размещенного за стенкой кассеты толщиной 100 мг/см^2 , и показанием детектора, расположенного за стенкой с эффективной толщиной 1000 мг/см^2 . Информация о величине эквивалентной дозы выводится на экран дисплея ЭВМ в зивертах и записывается в файл результатов измерений для последующего занесения в базу данных.

Краткий обзор других методов твердотельной дозиметрии

1. Термостимулированная экзоэлектронная эмиссия

Термостимулированная экзоэлектронная эмиссия - нестационарный процесс, заключающийся в том, что с поверхности твердого тела при термической стимуляции происходит испускание электронов низких энергий ($0,5-1 \text{ эВ}$). В отличие от стационарной термоэмиссии ТСЭЭ наблюдается при значительно более низких температурах ($4-900 \text{ К}$). По процедурным признакам, деталям механизма и формальному математическому описанию процесса метод имеет много сходного с ТЛД, но отличается

тем, что считывание дозиметрической информации осуществляется путем регистрации тока экзоэлектронов, эмитируемых с тонкого поверхностного слоя детектора. Величина тока при этом оказывается пропорциональной поглощенной дозе излучения [1,3]. К достоинствам метода ТСЭЭ относится высокая чувствительность и линейность отклика в широком диапазоне доз (от нескольких мкР до 10^3 - 10^4 Р). Кроме того, метод ТСЭЭ эффективен при регистрации низкоэнергетических и малопробежных излучений, например, излучения трития (максимальная энергия электронов 18 кэВ), α -частиц, где метод ТЛД испытывает принципиальные трудности из-за падения эффективности регистрации вследствие уменьшения толщины возбужденного слоя термолуминофора. При этом одновременное использование явлений ТЛ и ТСЭЭ дает возможность регистрации смешанных полей излучений. Радиационно-чувствительные материалы для комбинированных ТЛ-ТСЭЭ-дозиметров были созданы в Уральском государственном техническом университете на основе плазменно-напыленных пленок нестехиометрического α - Al_2O_3 и электропроводящей керамики $\text{BeO}:\text{TiO}_2$ [35,36]. Развитие метода ТСЭЭ сдерживается повышенными требованиями, предъявляемыми к материалу детектора, поверхность которого должна обладать стабильными электронно-эмиссионными свойствами, а также сложностью считывающей аппаратуры.

2. ЭПР-дозиметрия

Реальная работоспособность лучших ТЛ-материалов ограничивается верхним пределом доз 10^3 - 10^4 Гр. Эти величины составляют лишь нижний предел рабочего диапазона доз в радиационных технологиях, при испытаниях радиационной стойкости материалов и изделий электронной техники, проведении радиационной стерилизации и в некоторых других специальных исследовательских и прикладных областях дозиметрии. Для решения этих задач в твердотельной дозиметрии развивается метод, основанный на явлении ЭПР, связанный с образованием в материале детектора под действием облучения парамагнитных центров, концентрация которых пропорциональна поглощенной дозе излучения [1,37]. Особенностью метода является то, что в нем считывание дозиметрической информации осуществляется без ее разрушения, в отличие от ТЛ и ТСЭЭ-дозиметрии. В настоящее время в практической ЭПР-дозиметрии в качестве чувствительных сред используются органические соединения (главным образом, аланин $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$) [38]. Диапазон регистрируемых доз у таких дозиметров составляет $1 - 10^5$ Гр. Если материал ЭПР-детектора одновременно обладает ТЛ или ТСЭЭ свойствами, дозиметрическая информация может быть получена независимо с помощью каждого из этих явлений. При этом возрастает надежность и достоверность измерений, расширяется диапазон регистрируемых доз. Ценным свойством такого детектора является работоспособность в условиях воздействия тепловых полей, когда температура окружающей среды намного превышает температуры ТЛ и ТСЭЭ пиков, характерных для данного материала [39,40].

3. Оптически стимулированная люминесценция

Оптически стимулированная люминесценция - процесс, заключающийся в освобождении носителей заряда из центров захвата под действием излучения ультрафиолетового или видимого диапазона длин волн с последующей излучательной рекомбинацией и испусканием люминесценции, интенсивность которой оказывается пропорциональной поглощенной дозе излучения.

Метод дозиметрии, основанный на явлении ОСЛ, предложен в конце 60-х годов и получил название радиофотолуминесцентного (РФЛ) [2,3]. Его основным преимуществом является отсутствие необходимости изменять температуру детектора, что обеспечивает высокую скорость получения дозиметрической информации и ее сохранение при считывании.

В качестве чувствительного материала детектора применяются фосфатные стекла, активированные серебром. Под действием ионизирующего излучения в материале стекла образуются устойчивые центры фотолуминесценции, количество которых линейно зависит от дозы облучения. Число этих центров может быть измерено по интенсивности люминесценции, появляющейся при облучении детектора ультрафиолетовым излучением. Спектр люминесценции имеет максимум в области длин волн 600-700 нм. РФЛ-дозиметр обладает хорошими эксплуатационными свойствами. Это прежде всего высокая термостойкость, негигроскопичность, низкий фединг. Основным недостатком материала является низкая чувствительность при измерении малых доз, что связано с влиянием фоновой люминесценции. Созданные в последние годы стекла марки РЛС-5 и FD-7 характеризуются улучшенными дозиметрическими характеристиками, в первую очередь, меньшими значениями нижнего предела измерений (100-250 мкЗв) [41,42]. Этого удалось достичь путем уменьшения фонового свечения за счет улучшения технологии получения стекла. Верхний предел измерения дозы у стекол РЛС-5 составляет 5 Зв, что позволяет их использовать к качестве аварийных

дозиметров. На базе этих стекол разработаны дозиметрические комплексы "Флюорад ДРГ-711-РФЛ" (г. Санкт-Петербург) и FGD-10 (Япония). В качестве источника возбуждения в РФЛ-системах используется излучение импульсной ксеноновой лампы или N₂-лазера длительностью 2-3 мкс.

В настоящее время предпринимаются попытки применить в качестве материала РФЛ-детектора анион-дефектные монокристаллы α -Al₂O₃ [43,44]. Этот материал, наряду с высокой чувствительностью к ионизирующему излучению, характеризуется значительной эффективностью оптической ионизации ловушек, ответственных за дозиметрический пик ТЛ, при стимуляции видимым светом в широком диапазоне длин волн. Облученный детектор возбуждается импульсом (1-40 мс) лазерного излучения длиной волны 514 нм. Люминесценция регистрируется в полосе свечения F-центров (длина волны 420 нм, длительность затухания 36 мс) в промежутках между импульсами возбуждающего света. Применение этого материала позволило повысить чувствительность метода до уровня, достигаемого в ТЛД.

Заключение

Благодаря высокой чувствительности при малых размерах дозиметрического датчика, большому диапазону измерения доз, длительности сохранения дозиметрической информации, простоте и скорости измерения запоминающие твердотельные детекторы в настоящее время занимают ведущее место в индивидуальном дозиметрическом контроле персонала и населения, радиологии и радиобиологии. Они широко применяются для радиационного мониторинга окружающей среды и в технологической дозиметрии.

Несмотря на достигнутые успехи, в твердотельной дозиметрии остается еще много нерешенных задач. Удовлетворительно не решена проблема регистрации заряженных частиц и нейтронов и особенно смешанных полей. Методы твердотельной дозиметрии непрерывно развиваются и совершенствуются в направлении создания новых чувствительных материалов и измеряющей дозиметрическую информацию аппаратуры. Поэтому изучение радиационно-стимулированных процессов в твердых телах и создание новых радиационно-чувствительных материалов с заданным комплексом физических свойств является актуальной задачей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Techniques of radiation dosimetry/Ed. Mahesh K., Vij D.R. - Delhi: Wiley eastern limited, 1985. - 516 p.
2. Штольц В., Бернхардт Р. Дозиметрия ионизирующего излучения. - Рига: Зинатне, 1982. - 142 с.
3. Applied Thermoluminescence Dosimetry/Ed. Oberhofer M. and Scharmann A. - Bristol: Adam Hilger Ltd, 1981. - 415 p.
4. Шварц К.К., Грант З.А., Межс Т.К., Грубе М.М. Термолуминесцентная дозиметрия. - Рига: Зинатне, 1967. - 180 с.
5. Becker K. Solid State Dosimetry. - Cleveland Ohio: CRC Press, 1973.
6. Furetta C. and Weng P.-S. Operational Thermoluminescence Dosimetry. - London: World Scientific Publisher, 1998. - 260 p.
7. Proceedings of the 12th International Conference on Solid State Dosimetry, Burgos, Spain, 1998.//Radiat. Prot. Dosim. - 1999. -V.84. - № 1-4 and V.85. - № 1-4.
8. Klemic G., Shobe J., Sengupta S., Shebell P., Miller K., Carolan P.T., Holeman G., Kahnhauser H., Lamperti P., Soares C., Azziz N. and Moscovitch M.//Radiat. Prot. Dosim. - 1999. - V.85. - № 1-4, P. 201-206.
9. Антонов-Романовский В.В. Кинетика фотолуминесценции кристаллофосфоров. - М.: Наука, 1966. - 323 с.
10. McKeever S.W.S. Thermoluminescence of Solids. - Cambridge: Cambridge University Press, 1985. - 376 p.
11. McKeever S.W.S. and Chen R.//Radiat. Measurements. - 1997. - V.27. - № 5/6. - P. 625-661.
12. Мильман И.И., Кортков В.С., Никифоров С.В. // ФТТ. - 1998. - Т.40. - № 2. - С. 229-234.
13. Templer R. H. //Radiat. Prot. Dosim. - 1986. - V.17. - P. 493-497.
14. Chen R., Fogel G. and Lee C.K. //Radiat. Prot. Dosim. - 1996. - V.65. - № 1-4. - P. 63-68.
15. Лущик Ч.Б., Лущик А.Ч. Распад электронных возбуждений с образованием дефектов в твердых телах. - М.: Наука, 1989. - 264 с.
16. Непомнящих А.И., Мироненко С.Н., Афонин Г.П., Селявко А.И. //Люминесцентные приемники и преобразователи ионизирующего излучения. - Новосибирск: Наука, 1985. - С. 49-52.
17. Delgado A. //Radiat. Prot. Dosim. - 1996. - V.66. - № 1-4. - P. 129 - 134.
18. Moscovitch M. //Radiat. Prot. Dosim. - 1999. - V.85. - № 1-4. - P. 49-56.
19. Horowitz Y.S. and Mahajna S. //Radiat. Prot. Dosim. - 1999. - V.84. - № 1-4. - P. 29-34.
20. Bilski P., Budzanowski M. and Oiko P. //Radiat. Prot. Dosim. - 1996. - V.65. - № 1-4. - P. 195 - 198.
21. Диэлектрические материалы: Радиационные процессы и радиационная стойкость. - Рига: Зинатне, 1989. - 188 с.
22. Kortov V. S. // Jap. J. Appl. Phys. - 1985. - V.24. - P. 65-71.
23. Аксельрод М.С., Кортков В.С., Мильман И.И. //УФЖ. - 1983. - Т.28. - № 7. - С. 1053-1056.
24. Кортков В.С., Полежаев Ю.М., Гаприндашвили А.И., Шаляпин А.Л. //Изв. АН СССР. Сер. "Неорг. матер." - 1975. - Т.11. - № 2. - С. 257-260.
25. Ас. 1340365 СССР, МКИ GOIT I/1. Способ получения профилированных монокристаллов оксида алюминия для термолуминесцентной дозиметрии//И.М. Затуловский, Д.Я. Кравецкий, М.С. Аксельрод, В.С. Кортков, И.И. Мильман, В.И. Готлиб, В.Р. Бичев, К.К. Шварц (СССР). № 4073772/31-25. - Заявл. 19.06.86. - 1987.
26. Akselrod M.S., Kortov V.S., Kravetsky D.J. and Gotlib V.I. //Radiat. Prot. Dosim. - 1990. - V.32. - № 1. - P. 15-20.

27. Аксельрод М.С., Кортов В.С., Мильман И.И., Горелова Е.А., Борисов А.А., Затуловский Л.М., Кравецкий Д.Я., Березина И.Е., Лебедев Н.К. //Изв. АН СССР. Сер. физ. -1988. - Т.52.-№10. - С.-1981-1984.
28. McKeever S.W.S., Moscovitch M. and Townsend P.D. Thermoluminescence dosimetry materials: properties and uses. - Ashford: Nuclear Technology Publishing, 1995. - 214 p.
29. Akselrod M.S., Kortov V.S. and Gorelova E. A. //Radiat. Prot. Dosim. - 1993. - V.47. - P. 159-164.
30. Кортов В.С., Мильман И.И. //Изв. вузов. Сер. "Физика". - 1996. - Т.39. - № 11. - С.145-161.
31. Мильман И.И., Кортов В.С., Кирпа В.И. //ФТТ. - 1995. - Т.37. - № 4. - С. 1149-1159.
32. Akselrod M.S. and Gorelova E.A. // Nucl. Tracks Radiat. Meas. - 1993. - V.21. - № 1. - P. 143-146.
33. Kortov V.S., Milman I.I. and Nikiforov S.V. //Radiat. Prot. Dosim. - 1999. - V.84. - № 1-4. - P. 35-38.
34. Кортов В.С., Никифоров С.В., Горелова Е.А., Мильман И.И., Ревенко А.В. //Радиационная безопасность человека и окружающей среды: Межвуз. сб. научн. тр. - Екатеринбург, 1997. - С. 63-65.
35. Аксельрод М.С., Мильман И.И. //Изв. АН СССР. Сер. физ. - 1982. - Т.46. - № 12. - С. 2361-2363.
36. Milman I.I., Sjurdo A.I., Kortov V.S. and Lesz Ja. //Radiat. Prot. Dosim. - 1996. - V.65. - № 1-4. - P. 401-404.
37. Ikeya M. New applications of electron spin resonance. Dating, dosimetry and microscopy. - Singapore: World scientific publishing, 1993. - 500 p.
38. Standart Practice for use of the alanine-ESR dosimetry system//ASTM Committee E-1607-94 on Nuclear Technology and Application, 1994. - P. 855-860.
39. Kortov V.S. and Milman I.I. //Appl. Radiat. Isot. - 1996. - V.47. - № 11/12. - P. 1551-1555.
40. Kortov V.S. and Milman I.I. //Radiat. Prot. Dosim. - 1996. - V.65. - № 1-4. - P. 355-358.
41. Смирнов А.В., Смирнова С.В. //Сборник тезисов докладов конференции по радиационной физике КРФ-99. - Каракол: ИГУ, 1999. - С. 48.
42. Piesch E., Burgkhardt B., Vilgis M. //Radiat. Prot. Dosim. - 1993. - V.47. - P. 403-414.
43. McKeever S.W.S., Akselrod M.S. and Markey B.G. //Radiat. Prot. Dosim. - 1996. - V.65. - № 1-4. - P. 267-272.
44. Akselrod M.S., Lucas A.C., Polf J.C. and McKeever S.W.S. //Radiat. Measurements. - 1998. - V.29. - № 3-4. - P. 391-399.

Уральский государственный технический университет