

Лабораторная работа 8

Термолюминесцентная дозиметрия: измерение поглощенной дозы ионизирующего излучения.

Цель работы: освоить методику измерения поглощенной дозы ионизирующего излучения с использованием твердотельных монокристаллических детекторов ДТГ-4.

Используемое оборудование: система термолюминесцентная дозиметрическая ДТУ-01м.

Введение

Целью дозиметрии является установление и измерение физических параметров, имеющих решающее значение для характеристики физического, химического и особенно биологического действия ионизирующего излучения. Потребность в точно определенных и поддающихся экспериментальному измерению физических величинах, характеризующих ионизирующие излучения, появилась уже на первых этапах их использования в терапевтической практике. Расширение границ исследования и применения ядерной энергии и связанные с этим новые проблемы вызвали необходимость дальнейшего развития дозиметрических методов.

Основной физической величиной, принятой в дозиметрии для оценки меры действия ионизирующего излучения в среде, является поглощенная доза излучения. В качестве основной величины целесообразно принимать такую, которая наиболее точно определяет результат воздействия излучения на облучаемый объект. Установлено, что реакция на облучение (например, химические изменения, биологический эффект и т.д.) связана с поглощенной веществом энергией излучения и часто пропорциональна ей. Поглощение энергии ионизирующего излучения является первичным процессом, дающим начало последовательности физико-химических преобразований в облученной ткани, приводящей к наблюдаемому радиационному эффекту. Поэтому естественно сопоставить наблюдаемый эффект с количеством поглощенной энергии или поглощенной дозы.

Поглощенная доза – это рассчитанная на единицу массы облученного вещества поглощенная энергия излучения.

$$D = \frac{dE}{dm}$$

За единицу измерения поглощенной дозы в системе СИ принят Грей (Гр). 1Гр — это такая доза, при которой массе 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж. Внесистемная единица Рад определялась как поглощенная доза любого ионизирующего излучения, равная 100 эрг на 1 грамм облученного вещества.

Термолюминесцентная твердотельная дозиметрия.

Одними из методов определения поглощенной дозы являются методы, основанные на использовании физических явлений, происходящих в твердых телах под действием ионизирующих излучений. Область дозиметрии, в которой рассматриваются эти методы, называется твердотельной дозиметрией. В данной работе мы будем рассматривать метод термолюминесцентной дозиметрии.

Метод термолюминесцентной дозиметрии основан на том, что некоторые неорганические вещества с определённым сочетанием дефектов кристаллической решетки примесного и собственного происхождения – так называемые запасующие кристаллофосфоры – после возбуждения ионизирующим излучением при нагревании испускают свет. Количество испущенных при этом оптических квантов оказывается пропорциональным поглощенной дозе ионизирующего излучения. Физический процесс термолюминесценции 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 дырки и электроны. 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 термолюминесценции имеется два локализованных уровня, один из которых играет роль ловушки, другой – центра рекомбинации (рис. 1). Для упрощения выкладок рассматривают процессы только с

участием электронов. При этом аналогичные рассуждения могут быть приведены и для дырок. При стимуляции под действием температуры происходит освобождение электронов в зону проводимости. Из этой зоны электроны могут быть повторно захвачены на ловушки или рекомбинировать с дырками на центре рекомбинации.[1]

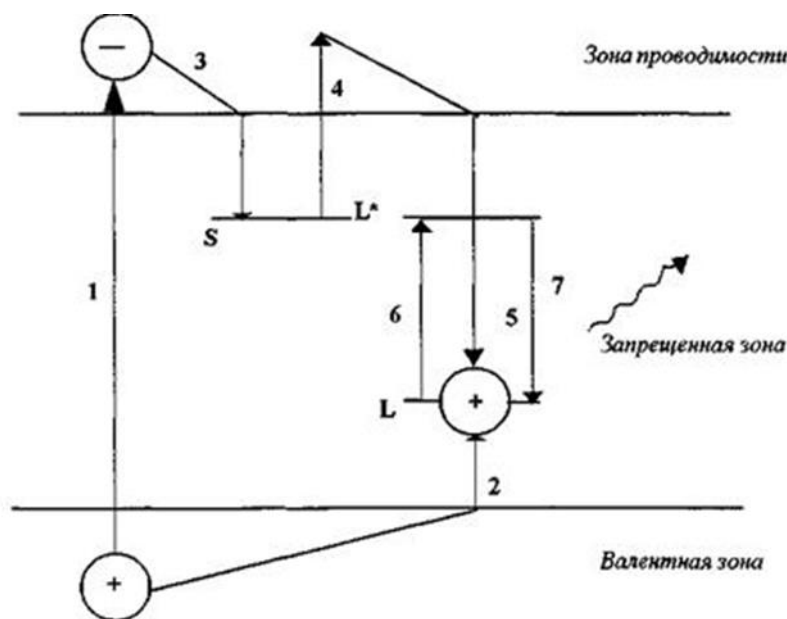


Рис. 1 Энергетическая зонная схема простейшей двухуровневой модели. 1 — переход электрона из валентной зоны в зону проводимости; 2 — захват дырки центром люминесценции; 3 — захват электрона ловушкой; 4 — освобождение электронов при нагреве кристалла; 5 — рекомбинация электронов с дырками в центрах люминесценции; 6 — возбуждение центра люминесценции; 7 — излучательный переход в основное состояние.

Вероятность выхода электрона из ловушки в зону проводимости описывается уравнением:

$$p = S \cdot e^{-\frac{E}{k \cdot T}}, \quad (2)$$

Где S — частотный фактор;

E – энергия активации процесса или глубина ловушки;

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 ($10^{12} - 10^{14} \text{с}^{-1}$).

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

$$\frac{dn}{dt} = n_c \cdot (N - n) \cdot A - n \cdot p, \quad (3)$$

$$\frac{dn_h}{dt} = -n_c \cdot n_h \cdot A_r, \quad (4)$$

$$\frac{dn_c}{dt} = n \cdot p - n_c \cdot (N - n) \cdot A - n_c \cdot n_h \cdot A_r, \quad (5)$$

Где n – концентрация электронов в ловушках;

n_c – концентрация электронов в зоне проводимости;

N – концентрация активных электронных ловушек (глубиной E);

n_h - концентрация захваченных дырок;

A – сечение повторного захвата;

A_r – сечение рекомбинации.

Интенсивности термолюминесценции как функция времени при термостимуляции пропорциональна скорости рекомбинации электронов и дырок:

$$I(t) = -\frac{dn_h}{dt}, \quad (6)$$

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

Система уравнений (3) и (5) аналитически в общем виде не решается. Однако наиболее часто используют так называемое квазиравновесное приближение, которое сводится к двум условиям:

$$n_c \ll n; \quad \frac{dn_c}{dt} \ll \frac{dn}{dt} \quad (7)$$

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 захвата. При этом интенсивность термолюминесценции прямо пропорциональна концентрации заполненных ловушек:

$$I(t) = p \cdot n = n \cdot S \cdot e^{-\frac{E}{kT}}, \quad (8)$$

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

$$I(t) = n_0 \cdot S \cdot e^{-\frac{E}{kT}} \cdot e^{-\frac{S}{\beta} \int_{T_0}^T e^{-\frac{E}{kT}} dt}, \quad (9)$$

Где T_0 – начальная температура;

n_0 – исходная концентрация электронов в ловушках;

β – скорость нагрева.

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

$$I(t) = n^b \cdot S' \cdot e^{-\frac{E}{kT}}, \quad (10)$$

Где b – порядок кинетики процесса. Выражение для КТВ общего порядка кинетики:

$$I(T) = n_0 \cdot S'' \cdot e^{-\frac{E}{k \cdot T}} \cdot [1 + ((b - 1) \frac{S'}{\beta}) \int_{T_0}^T e^{-\frac{E}{k \cdot T}} dT]^{-\frac{b}{b-1}}, \quad (11)$$

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

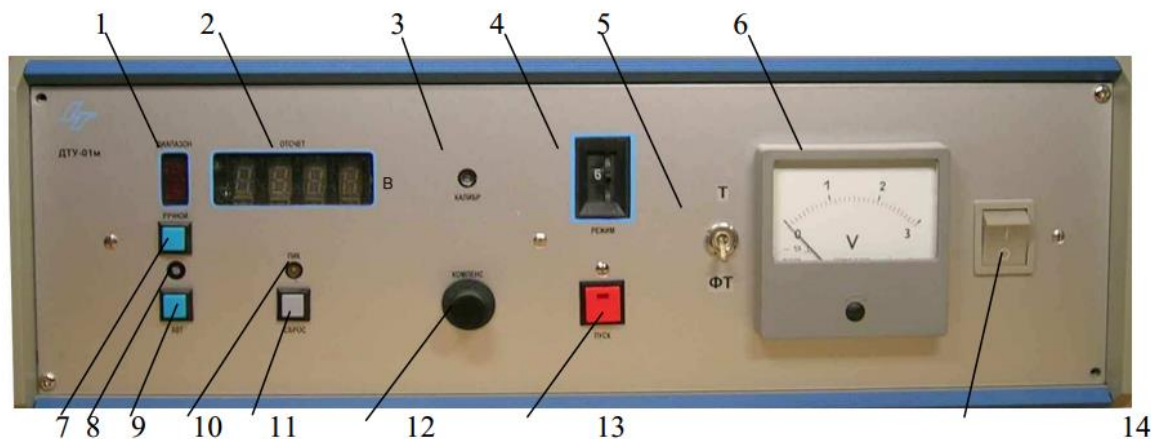
Анализ уравнений, описывающих КТВ кристаллофосфора, показывает, что интенсивность термолюминесценции пропорциональна исходной концентрации носителей в ловушке и, следовательно, поглощенной энергии излучения. КТВ имеет форму пика с максимумом при определенной температуре T_m , пропорциональной энергетической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

В практической дозиметрии используют два параметра КТВ: светосумму (выход термолюминесценции) $S = \int_{T_1}^{T_2} I(t) dT$ (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 амплитуды. Пиковый метод более чувствителен к режиму нагрева, однако, он более эффективен при измерении малых доз.[2]

Простая двухуровневая модель позволяет установить основные закономерности термолюминесцентного 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 термолюминесценции, 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.

Термолюминесцентный дозиметрический комплекс ДТУ-01



- 1) индикационное одноразрядное табло с маркировкой «ДИАПАЗОН»,
- 2) индикационное четырехразрядное табло с маркировкой «ОТСЧЕТ»,
- 3) регулировочный потенциометр «КАЛИБР»,
- 4) программный переключатель режимов нагрева «РЕЖИМ»,
- 5) переключатель Т- ФТ,
- 6) стрелочный индикатор,
- 7) кнопка «РУЧНОЙ»,
- 8) светодиод индикации автоматического выбора диапазона,
- 9) кнопка «АВТ»,
- 10) светодиод «ПИК»,
- 11) кнопка «СБРОС»,
- 12) регулировочный потенциометр «КОМПЕНС»,
- 13) кнопка «ПУСК» с подсветкой,
- 14) клавиша СЕТЬ

Ход работы.

Подготовка к проведению измерений

1. Для установления рабочего режима система должна быть прогрета в течение 15-20 минут.
2. Произведите проверку и при необходимости компенсацию темнового тока ФЭУ.

3. Для этого необходимо вращением потенциометра КОМПЕНС добиться значения 0 на стрелочном индикаторе в режиме ФТ при включенном диапазоне «0». Процедуру производить по необходимости и после прогрева.

4. Произведите проверку чувствительности системы и при необходимости ее подстройку. Для этого поверните поворотный диск БТВ против часовой стрелки до упора (положение СПД). Нажав кнопку СБРОС, получите на табло индикации значение величины сигнала от СПД. Показание от СПД должно быть равно $\pm 3\%$ на диапазоне «2» и соответствовать величине, указанной в свидетельстве о поверке. Если это условие выполняется, следует перейти к выполнению измерений. Показание от СПД необходимо периодически (не реже 1 раза в час) проверять. При необходимости - произвести подстройку его значения с помощью регулировочного потенциометра КАЛИБР.

Проведение измерений

1. Установите программный переключатель РЕЖИМ в требуемое положение. Если известен диапазон измеряемой дозы, установите кнопкой РУЧНОЙ номер соответствующего поддиапазона на табло ДИАПАЗОН.

2. Плавно поверните подвижный диск БТВ против часовой стрелки почти до упора положения СПД (микровыключатель подтверждения режима СПД не должен быть нажат), чтобы, сняв светозащитную крышку получить доступ к НЭ. Положите детектор в углубление НЭ и закройте крышкой.

3. Плавно поверните диск БТВ по часовой стрелке до упора в положение ИЗМЕРЕНИЕ.

4. Нажмите кнопку ПУСК, при этом начнется нагрев НЭ и загорится светодиод индикации нагрева. По стрелочному индикатору в положении Т убедитесь в возрастании температуры НЭ. Движение стрелки индикатора в положении ФТ отражает динамику регистрации сигнала термолюминесценции. Включение светодиода ПИК свидетельствует о том, что прошел пик термолюминесценции. При этом на 4-х разрядном табло появится значение отсчета пропорциональное дозе. Отключение нагрева происходит автоматически.

5. Плавно поверните диск БТВ почти до положения СПД, откройте светозащитную крышку и чистым пинцетом снимите детектор с НЭ. Поместите

детектор на чистую стеклянную или фторопластовую пластину, для его остывания. После этого можно перейти к измерению следующего детектора.

6. Закройте светозащитную крышку, а диск установите в положение ИЗМЕРЕНИЕ.

7. Нажмите кнопку СБРОС. Система готова к следующему измерению.

8. Значение индивидуального (амбиентного) эквивалента дозы H , которой был облучен дозиметр, определяется как по среднее по всем детекторам, входящим в состав дозиметра по формуле: $H = k \cdot \sum_{i=1}^n N_i / n$, (1) где $i = 1, 2, \dots, n$ – количество детекторов дозиметра, N_i – значение показаний цифрового табло ОТСЧЕТ i - детектора дозиметра, k – калибровочный коэффициент мЗв/В для измеряемой партии дозиметров.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные задачи дозиметрии.
2. Что такое поглощенная доза?
3. В каких единицах измеряется поглощенная доза?
4. Объясните механизм термолюминесценции.
5. Что такое кривая термовысвечивания?
6. Объясните принцип действия термолюминесцентных дозиметрических комплексов.
7. Какие термолюминофоры мы используем?
8. Как определить поглощенную дозу, используя методы термолюминесцентной дозиметрии?

Задание 1 «Изучение кривых термовысвечивания»

1. Высветить облученные детекторы ДТГ-4 (LiF:Mg,Ti).
2. Построить кривые термовысвечивания данных детекторов.
3. Определить: максимальную температуру нагрева T , температуру главного пика, интенсивность главного пика, чувствительность детектора к ионизирующему

излучению $S = \frac{I_{\max}}{D}$, где I_{\max} – интенсивность главного пика, D – поглощенная доза

4. Сопоставить кривые термовысвечивания для разных детекторов (структуру кривых, положение пиков, интенсивность главного пика).

5. Сравнить чувствительности детекторов к ионизирующему излучению.

Задание 2 «Определение поглощенной дозы»

1. Определить дозу, которую накопили детекторы за некоторое время хранения.

2. Определить время хранения этих детекторов.