

### 5.3. Люминесцентный метод дозиметрии

**Оптические эффекты в люминофорах.** В последние десятилетия быстрое развитие получили методы дозиметрии, основанные на использовании физических явлений, происходящих в твердых телах под действием ионизирующих излучений. Эта область в зарубежной практике стала называться дозиметрией с помощью твердых тел (*solidstatedosimetry*). Хотя имеется большое число твердых веществ, реагирующих различным образом на воздействие излучений, к указанной области дозиметрии обычно относят методы, основанные на явлениях **радиофотолюминесценции, радиотермолюминесценции** и применении полупроводниковых детекторов. Сюда не относят методы, основанные на применении сцинтилляционных счетчиков.

Следуя установившейся практике, под люминесцентными методами дозиметрии мы будем понимать методы, основанные только на радиофотолюминесценции и радиотермолюминесценции.

Сущность метода заключается в том, что образованные в люминофоре под действием ионизирующего излучения носители заряда (электроны и дырки) локализируются в центрах захвата, благодаря чему происходит накопление поглощенной энергии, которая может быть затем освобождена при дополнительном возбуждении. Дополнительное возбуждение может быть вызвано либо освещением люминофора определенным участком спектра света, либо нагревом. Наблюдаемые при этом оптические эффекты могут служить мерой поглощенной энергии. Примерами таких эффектов могут быть собственно люминесценция, окрашивание люминофора, деградация люминесценции (уменьшение люминесценции, которой обладает необлученный люминофор).

Не всякая локализация носителей заряда приведет к наблюдаемым оптическим эффектам. Они возникают тогда, когда захват электронов и дырок приводит к созданию оптически активных центров (например, центров окраски). В табл.4 систематизированы возникающие в люминофоре центры и соответствующие им оптические эффекты, которые могут быть полезны в дозиметрии.

Хотя явление люминесценции известно с древних времен, механизм его был изучен лишь в XX в. Решающее значение в развитии теории люминесценции имели работы советских ученых С. И. Вавилова и В. Л. Левшина.

Таблица 4. **Оптические эффекты, возникающие в люминофорах под действием ионизирующих излучений**

| Характеристика центра                               | Процедура измерения                            | Эффект                   | Описание процесса   |
|---|--|--------------------------|---|
| Образованные центры устойчивы к процедуре измерения | Освещение светом: ультрафиолетовый или видимый | Окрашивание              | Центры поглощают свет в первоначально прозрачной спектральной области   |
|   |  | Радиофотолюминесценция   | Необлученное вещество не люминесцирует. Новые центры поглощают измерительный свет. Люминесценция с более длинноволновым спектром испускается сколь угодно долго, пока действует освещение |
|   |  | Деградация люминесценции | Необлученное вещество люминесцирует. Новые центры частично гасят нормальную люминесценцию   |

|  |   |                               |  |
|--|---|-------------------------------|--|
| Образованные центры разрушаются при дополнительном возбуждении | Нагрев  | Термолюминесценция            | Запасенная в центрах энергия освобождается в виде люминесценции. При нагреве люминесценция со временем уменьшается                           |
|  | Освещение светом большей длины волны, чем возникающая люминесценция | Стимулированная люминесценция | Запасенная энергия освобождается в виде люминесценции. Люминесценция падает с течением времени, пока образец облучается стимулирующим светом |

### 5.3.1. Фотолюминесцентный метод дозиметрии

**Механизм радиотермолюминесценции.** Два вида люминесценции получили признание в качестве основы для развития методов дозиметрии ионизирующих излучений: **радиотермолюминесценция и радиотермолюминесценция.** Материалы, представляющие интерес в качестве дозиметрических люминофоров, являются твердыми изоляторами с широким диапазоном оптической прозрачности. В качестве примера можно указать щелочно-галогенидные соединения (NaCl, LiF и т. п.), обладающие простым составом и кристаллической структурой. Они состоят из двух взаимопроникающих кубических решеток, содержащих щелочные и галогенидные ионы (рис. 43).

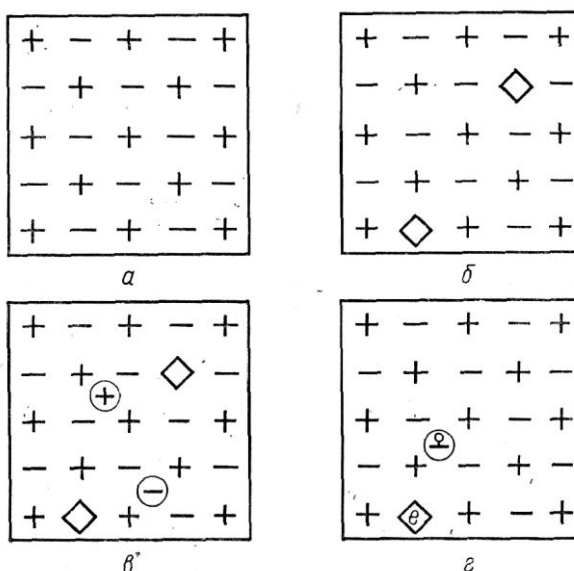


Рис. 43. Структурные дефекты беспримесного кристалла: а – идеальный кристалл; б – кристалл с ионными вакансиями; в – размещение ионов в промежуточном положении; г – «ловушки» в кристалле.

Идеальный кристалл состоит из чередующихся положительных щелочных и отрицательных галогенидных ионов (рис.43,а). Реальные кристаллы, однако, содержат различные структурные дефекты. Один из возможных дефектов щелочно-галогенидных кристаллов – отсутствие положительных и отрицательных ионов (вакансии) в тех местах, где они должны были бы быть в идеальном кристалле (рис.43,б). Эти вакансии случайным образом расположены в кристаллической решетке, и в чистом кристалле число положительных и отрицательных вакансий равно между собой. Последнее вытекает из условия, что кристалл в целом является электрически нейтральным. Другим видом возможных дефектов является смещение положительных и отрицательных ионов (вакансии) в тех местах, где они должны были бы быть в идеальном кристалле (рис.43,в). Эти вакансии случайным образом расположены в кристаллической решетке, и в чистом кристалле число положительных и отрицательных вакансий равно между собой. Последнее вытекает из условия, что кристалл в целом является электрически нейтральным.

Другим видом возможных дефектов является смещение положительных или отрицательных ионов из нормального положения в кристаллической решетке и закрепление их в необычном промежуточном положении. В этом случае ион оставляет соответствующую вакансию (рис.43,в).

Наличие подобных дефектов приобретает особое значение при облучении кристалла ионизирующим излучением. Проиллюстрируем это следующим примером (рис.43,г). Вакансии галогенидного иона создают область локализованного положительного заряда, так как отрицательный ион, который нормально должен занимать место вакансии, отсутствует и окружающие положительные щелочные ионы оказываются не полностью нейтрализованными. Под действием ионизирующего излучения в кристалле возникают свободные электроны, один из которых может оказаться вблизи вакансий галогенидного иона. Под действием кулоновских сил этот электрон может быть «захвачен» вакансией.

Аналогично этому галогенидный ион, смещенный со своего нормального положения, создает область локализации избыточного отрицательного заряда. После того как ионизирующее излучение освобождает электрон в кристалле, образованные положительные дырки могут перемещаться в пределах кристалла. Находясь вблизи промежуточно расположенного галогенидного иона, дырка может быть притянута и удержана кулоновскими силами.

В приведенном примере мы исходим из того, что дефекты в кристаллической решетке существовали до облучения кристалла, и результатом облучения явилось образование электронов и дырок, которые могут быть захвачены дефектами. Однако важно заметить, что ионизирующее излучение само может образовывать подобные дефекты в кристалле (вакансии и смещение ионов).

Вакансию с захваченным электроном можно рассматривать как систему, обладающую разрешенными дискретными энергетическими уровнями, между которыми возможны переходы, соответствующие испусканию или поглощению квантов энергии. Такие системы будем называть центрами.

Поглощение светового фотона может перевести электрон из основного состояния на более высокий возбужденный уровень и даже вырвать его из «ловушки».

Центры, образованные путем захвата дефектами решетки электронов и дырок, влияют на оптические свойства кристаллов. Например, центр, состоящий из электрона, захваченного галогенидно-ионной вакансией, способен поглощать часть спектра видимого света и тем самым изменять цвет кристалла. Такие центры часто называют «F»-центрами — центрами окраски.

Специфические центры с захваченными дырками — так называемые H-центры — образуются в результате облучения щелочно-галогенидных кристаллов при очень низких температурах. Полоса поглощения H-центра находится вблизи ультрафиолетовой области.

Переход центра из возбужденного состояния в основное может происходить без излучения (безрадиационный переход), с испусканием света (люминесценция) или путем комбинации этих двух процессов. Так, если стабильные F-центры создаются ионизирующим излучением, то они могут проявлять себя как центры люминесценции при возбуждении светом определенной частоты. Это явление и называется радиофотолюминесценцией. Таким образом, радиофотолюминесценция происходит тогда, когда под действием ионизирующего излучения в кристалле создаются новые центры фотолюминесценции.

Спектр поглощения и испускания F-центра иллюстрирует рисунок.42. Спектр люминесценции, возникающей при возвращении F-центра из возбужденного состояния в нормальное, показан штриховой линией. Заштрихованная область соответствует спектру поглощения необлученного кристалла.

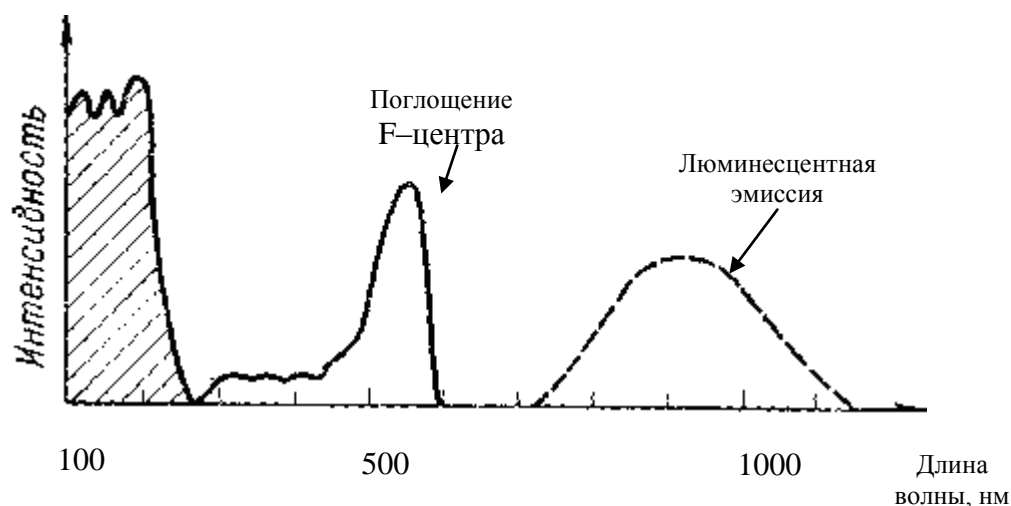


Рис. 44. Спектры поглощения и испускания F-центра.

Описанный процесс радиофотолюминесценции можно объяснить с помощью зонной теории.

На рисунке 44 показаны валентная зона *A*, зона проводимости *B* и локальные энергетические уровни в пределах запрещенной зоны.

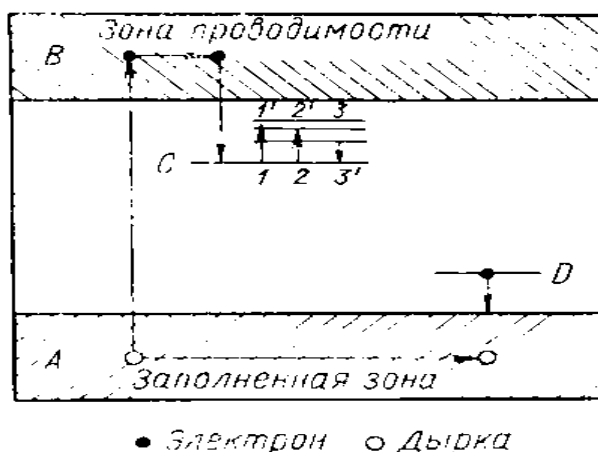


Рис. 45. Механизм радиофотолюминесценции.

Дефект в кристалле образует ловушку с локальным уровнем *C*. Ионизирующее излучение переводит электрон из валентной заполненной зоны *A* в зону проводимости *B*. Затем электрон захватывается ловушкой и переходит на уровень *C*. После захвата электрона ловушка превращается в F-центр с несколькими дискретными разрешенными уровнями энергии. При последующем возбуждении видимым светом электрон может занять один из верхних уровней F-центра (1–1'; 2–2'). Обратный переход на основной уровень *C* (3–3') сопровождается люминесценцией.

Рассмотренный механизм радиофотолюминесценции в чистом щелочно-галогенидном кристалле поясняет принцип работы радиофотолюминесцентных дозиметров (ФЛД): при поглощении ионизирующего излучения образуются F-центры; концентрацию центров, пропорциональную дозе, можно определить либо путем измерения поглощения света, либо путем измерения люминесценции.

На практике, однако, создание дозиметра на основе чистого кристалла, в котором центры люминесценции создавались бы за счет собственных дефектов, оказывается невозможным. Ни эффективность, ни воспроизводимость F-центров в чистом кристалле не соответствуют дозиметрическим требованиям; кроме того, F-центры оказываются

эффективными при очень низких температурах и люминесценция не может быть обнаружена при нормальной температуре; если производить измерение по поглощению света, то в самом акте измерения F-центры фактически разрушаются. Таким образом, чистые щелочно-галогенидные соединения не годятся для применения в качестве дозиметрических систем. Положение, однако, меняется, если щелочно-галогенидные соединения содержат определенные химические добавки в виде твердого раствора. Ионы серебра  $\text{Ag}^+$  существенно улучшают люминесцентные свойства кристаллов.

До облучения кристалл, активированный серебром, прозрачен к ультрафиолетовому свету. Следовательно, не может возникнуть и люминесцентное возбуждение при освещении светом со спектром, близким к ультрафиолетовой области. После воздействия ионизирующим излучением возникают полосы поглощения вблизи ультрафиолетовой области, обусловленные образованием в результате облучения центрами, содержащим атомы и ионы серебра. Последующее облучение ультрафиолетовым светом приводит к тому, что некоторые из этих центров обуславливают видимую люминесценцию. Например, в кристалле NaCl с примесью ионов серебра возникают полосы поглощения с максимумом при 2500, 2800, 3100, 3400 и 4400 Å. Последний пик соответствует центру, не дающему люминесценцию. Остальные обусловлены центрами, испускающими люминесцентное свечение с максимумом соответственно при 2750, 4350, 5560 и 5670 Å.

Помимо щелочно-галогенидных кристаллов радиофотолюминесцентными свойствами обладают **активированные серебром фосфатные стекла**, являющиеся наиболее подходящими для дозиметрии. Природа центров и процессы, приводящие к люминесценции в стеклах, полностью еще не изучены.

**Дозиметрические стекла** специфически реагируют на кратковременное воздействие ионизирующим излучением: сразу после облучения увеличивается интенсивность радиофотолюминесценции (эффект накопления), а затем наблюдается ее затухание. Кинетика процесса зависит от температуры, основного состава стекла и от концентрации серебра в стекле.

Типичные кривые показаны на рисунке 46. По оси абсцисс отложено время, прошедшее после кратковременного облучения ионизирующим излучением; по оси ординат – интенсивность люминесценции. Параметром служит температура, при которой хранится стекло от момента облучения до момента измерения люминесценции, причем интенсивность люминесценции измеряется при комнатной температуре. Чем выше температура и выше концентрация серебра, тем быстрее наступает максимум свечения после прекращения облучения.

Один из возможных вариантов объяснения этих кривых основан на следующих рассуждениях. В необлученном стекле, активированном серебром, примесь серебра образует центры **P** со своими локальными энергетическими уровнями. Возможно также существование других локальных уровней **H**, которые неэффективны в отношении создания люминесценции (рис. 47).

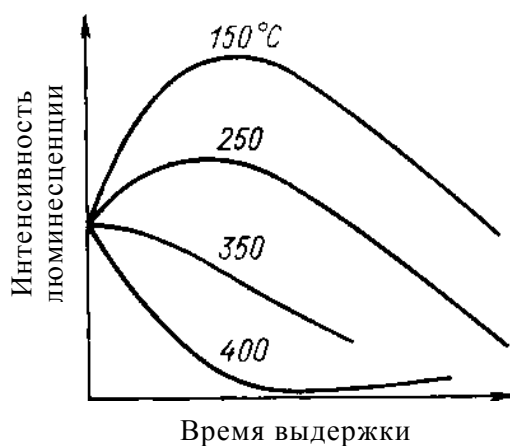


Рис.46. Зависимость интенсивности люминесценции стекол от времени выдержки.

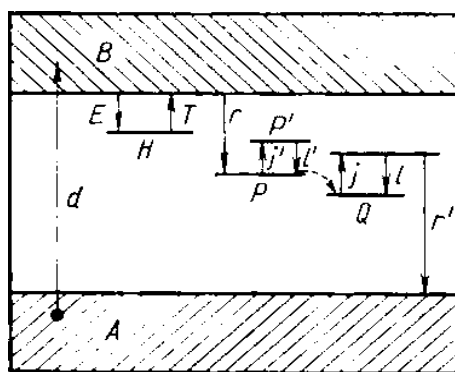


Рис.47. Кинетика люминесценции в стеклах.

Ионизирующее излучение переводит электроны в зону проводимости (переход **d**). Часть этих электронов непосредственно захватывается положительно заряженными атомами серебра или целыми агрегатами (переход **г**). Это приводит к созданию новых центров **Q**.

Часть электронов, попавших в зону проводимости, сначала захватывается на уровне **H** и лишь впоследствии осуществляет термические переходы обратно в зону проводимости (переход **T**), а оттуда они могут попасть на уровень **P** (переход **г**) и создать добавочно новые центры **Q**. Переходы **j'** и **l'** соответствуют возбуждению и испусканию света необлученного стекла, а переходы **j** и **l** — стекла после облучения.

Таким образом, сразу после облучения продолжается процесс образования центров люминесценции **Q**, что объясняет рост интенсивности свечения. Дальнейшее затухание можно объяснить рекомбинацией электронов, находящихся на возбужденных уровнях центра **Q**, с дырками (переход **г'**).

С повышением температуры увеличивается вероятность перехода электронов, первоначально попавших на уровень **H**, в зону проводимости (переход **T**), что ускоряет процесс образования новых центров **Q**. С ростом концентрации серебра увеличивается число центров **P**, что повышает вероятность для электронов из зоны проводимости попасть на центр **P** по сравнению с захватом ловушкой **H**. Это может объяснить ускорение эффекта накопления при повышении температуры и концентрации серебра в стекле.

Заканчивая описание механизма радиофотолюминесценции, подчеркнем следующие характерные черты этого процесса:

- спектр люминесценции обусловлен центрами, состоящими из положительно заряженных атомов серебра, нейтральных атомов и сложных конгломератов. Эти центры создаются под действием ионизирующего излучения с участием первоначально инкорпорированных ионов  $Ag^+$ ;

– созданные таким образом люминесцентные центры не разрушаются в процессе измерения люминесценции. Они только возбуждаются под действием измерительного света и затем люминесцируют. Эта процедура может повторяться неоднократно.

**Радиофотолюминесцентные дозиметры.** В качестве радиофотолюминесцентных детекторов практическое значение для целей дозиметрии имеют только неорганические материалы, активированные серебром. Однако применение неорганических кристаллов связано со значительными трудностями, возникающими при их изготовлении. В СССР был предложен радиофотолюминесцентный дозиметр на основе поликристаллических таблеток хлористого натрия  $\text{NaCl}(\text{Ag})$ , активированного серебром. Наибольшее распространение получили, однако, метафосфатные стекла активированные серебром.

Состав таких стекол определяет их основные дозиметрические качества: эффективный атомный номер, фоновую люминесценцию, относительную чувствительность, энергетическую зависимость. В таблице 5 приведены эти данные для некоторых распространенных стекол.

Таблица 5. Состав и свойства некоторых радиофотолюминесцентных стеклянных дозиметров

| Состав, % |     |     |      |      |                    | Фон<br>(эквивалентная доза в<br>радах для $\gamma$ -<br>излучения) | Относительная<br>чувствительность<br>по $\gamma$ -излучению | $Z_{\text{эв}}$ | Энергетическая<br>зависимость* |
|-----------|-----|-----|------|------|--------------------|--|---|-----------------|--------------------------------|
| Ag        | Al  | Li  | P    | O    | Другие<br>элементы |  |   |                 |                                |
| 4,3       | 4,7 | –   | 28,4 | 44,1 | 10,8 Ba            | 10,0   | 1,0   | 28,0            | 32,0                           |
| 4,3       | 4,7 | 1,9 | 33,7 | 52,3 | 7,7 K              |  |   |                 |                                |
|           |     |     |      |      | 3,1 Mg             | 10,0   | 1,0   | 17,6            | 10,0                           |
| 4,2       | 4,6 | 3,6 | 33,3 | 53,5 | 0,8 B              | 0,2  | 2,2   | 17,5            | 10,0                           |
| 2,4       | 3,5 | 2,5 | 33,8 | 52,5 | 0,5 Be             | 0,7  | 1,9   | 15,4            | 7,3                            |
|           |     |     |      |      | 4,7 Na             |  |   |                 |                                |
| 4,6       | 3,1 | 4,7 | 34,1 | 52,6 | 0,9 Mg             | 0,15   | 2,1   | 17,9            | 11,0                           |
| 0,6       | 0,5 | 7,3 | 34,7 | 55,9 | 1,0 B              | 0,1  | 3,1   | 12,6            | 4,0                            |

\* Отношение чувствительности для  $\gamma$ -квантов с энергией 50 кэВ к чувствительности для  $\gamma$ -квантов с энергией 1 МэВ.

Оптические свойства активированных серебром фосфатных стекол иллюстрируются на рисунке 48. Необлученное стекло обладает некоторой полосой поглощения (кривая 1). Ионизирующее излучение создает новую полосу оптического поглощения вблизи ультрафиолетовой области (кривая 2), что вызвано образованием новых центров, включающих атомы серебра. Оптическое возбуждение в пределах этого нового спектра поглощения вызывает оранжевую люминесценцию, интенсивность которой является мерой дозы ионизирующего излучения (кривая 3).

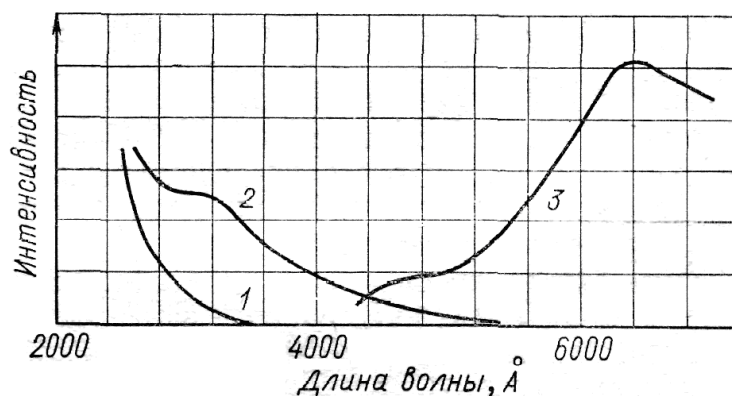


Рис.48. Оптические свойства фосфатных стекол.

С повышением дозы излучения увеличивается поглощение вблизи

ультрафиолетовой области и длинноволновая часть спектра перекрывается частично со спектром люминесценции. Поэтому в процессе измерения часть света люминесценции поглощается теми же центрами, которые образовались под действием ионизирующего излучения. Это приводит к тому, что интенсивность радиофотолюминесценции дозиметра вначале линейно растет с увеличением дозы, затем достигает максимума и при дальнейшем повышении дозы падает.

Исследования показали, что состав стекол может меняться в широких пределах без серьезного влияния на радиофотолюминесценцию. Например, изготавливались экспериментальные образцы с большим содержанием  $P_2O_5$ ,  $B_2O_3$ ,  $SiO_2$  и других окислов.

**Практическое распространение** получили стекла, содержащие небольшое число металлических метафосфатов, таких, как  $Al(PO_3)_2$ ,  $Mg(PO_3)_2$ ,  $Ba(PO_3)_2$ ,  $KPO_3$ ,  $NaPO_3$  и  $LiPO_3$  с добавкой  $B_2O_3$  или  $SiO_2$  для повышения устойчивости к атмосферным влияниям. Рассмотрим соответствие стеклянных дозиметров дозиметрическим требованиям.

**Общие характеристики фотолюминесцентных дозиметров.** Рассмотрим соответствие стеклянных дозиметров дозиметрическим требованиям.

**Фон.** Фон обусловлен наличием центров люминесценции независимо от облучения. Фоновая люминесценция необлученных стекол в начальной стадии их исследования была велика и соответствовала экспозиционной дозе гамма-излучения до 40Р. В настоящее время благодаря использованию чистых материалов и специальной технологической обработке удается снизить фоновую люминесценцию до значения, эквивалентного **0,3Р**.

**Чувствительность.** Эта характеристика дозиметра определяется концентрацией серебра, а также видом других компонентов. Например, в одном исследовании  $LiPO_3$  заменили  $Mg(PO_3)_2$ , что привело к снижению чувствительности в 20 раз. Этот эффект пока трудно объяснить или предсказать. Что касается концентрации атомов серебра, то максимальная радиофотолюминесценция наблюдается при содержании серебра **1–2%**. Однако у обычно рекомендуемых стеклянных дозиметров содержание серебра составляет **2,5–4,5%**.

Это вызвано тем, что нарастание интенсивности люминесценции после прекращения облучения (эффект накопления) при низкой концентрации серебра идет слишком медленно.

Наличие эффекта накопления, т. е. увеличение интенсивности люминесценции после прекращения облучения, приводит к тому, что понятие чувствительности радиофотолюминесцентных дозиметров необходимо отнести к фиксированному моменту времени после облучения.

Удобнее всего определять чувствительность по максимальной люминесценции. Дозиметр тем лучше, чем быстрее люминесценция достигает максимума и чем дольше она сохраняется постоянной без заметного затухания. К сожалению, эти два требования противоречат одно другому: чем быстрее проявляется эффект накопления, тем заметнее эффект затухания после достижения максимальной интенсивности, и, наоборот, стекла с медленным нарастанием люминесценции значительно дольше затем дают максимальное свечение без заметного затухания. Некоторые практически применяемые стекла сохраняют постоянную интенсивность люминесценции в пределах  $\pm 10\%$  в течение нескольких лет, начиная с 2 ч после облучения.

**Пределы измерения.** Интенсивность радиофотолюминесценции линейно зависит от дозы в пределах от одного до нескольких тысяч рентген. При дозе порядка  $(3-5) \cdot 10^4$  Р интенсивность люминесценции достигает максимума, а затем спадает.

Верхний предел можно увеличить, если не измерять красно-оранжевую область спектра люминесценции, а ограничиться более коротковолновой частью.

Стекла, которые подвергаются облучению в высокой дозе, оказываются заметно окрашенными; обычно радиофотолюминесцентные стекла выглядят светло-желтыми при  $10^4$ Р, желто-коричневыми при  $10^5$ Р, темно-коричневыми при  $10^6$ Р и почти черными при

$10^7$  Р.

**Нижний предел измерения определяется фоновой люминесценцией и у лучших образцов дозиметров составляет несколько сот миллирентген.**

По отношению к мощности дозы чувствительность сохраняется постоянной в широких пределах; некоторые эксперименты показывают отсутствие эффекта мощности дозы вплоть до  $10^{10}$  Р/с.

**Влияние света.** Чувствительность стекол к свету зависит от предшествующего облучения ионизирующим излучением и от длины волны фотонов. Инфракрасный свет увеличивает эффект накопления и последующие затухания люминесценции.

Ультрафиолетовая область спектра вызывает очень медленное разрушение радиофотолюминесцентных центров. Этот эффект мал и практически не сказывается на результатах измерения, однако длительное воздействие солнечных лучей приводит к заметной потере радиофотолюминесценции. Обычный рассеянный дневной свет не вызывает заметных эффектов в стекле.

**Практическая реализация радиофотолюминесцентного метода дозиметрии** предложена еще в конце 60-х годов XX-века, и впервые в России был использован не только для аварийного и операционного, но и для текущего радиационного контроля, благодаря созданию системы индивидуального дозиметрического контроля "Флюорад-ДРГ-711-РФЛ". Преимуществами этого метода перед другими – ионизационным, фотографическим, химическим и термолюминесцентным (ТЛД) – являются высокие эксплуатационные характеристики дозиметров, чувствительный элемент (детектор) которых выполнен на основе фосфатных стекол, активированных серебром:

- высокая термо- и вибростойкость, ударопрочность;
- негигроскопичность;
- чрезвычайно низкий фэддинг.

Кроме того, в дозиметрах такого типа **считывание информации не связано с ее сбросом**, что повышает надежность дозиметрической системы и создает дополнительные удобства при разработке регламента дозиметрического контроля персонала. **Обнуление производится нагревом стекол до 400 градусов.**

**Принцип измерения дозы.** Чувствительным материалом РФЛ-детектора является фосфатное стекло, активированное серебром. Этот материал является аморфным, в отличие от ТЛД-материалов, которые имеют кристаллическую структуру. Под действием ионизирующего излучения (ИИ) в материале РФЛ-стекла образуются устойчивые центры фотолюминесценции. При возбуждении этих центров ультрафиолетовым (УФ) излучением, излучается люминесценция в красно-оранжевой области спектра с максимумом в районе длин волн 600-700 нм. Именно это явление и носит название **радиофотолюминесценции**. Дозиметры на основе РФЛ-стекол имеют такую метрологическую характеристику, которую принято называть **временем созревания**. Она связана со способностью РФЛ-детектора в течение некоторого времени после прекращения облучения увеличивать сигнал люминесценции. Эта характеристика не имеет аналогов в других методах дозиметрии. Применение этого явления в дозиметрии основывается на линейной зависимости числа образовавшихся под действием ИИ РФЛ-центров от дозы облучения. В свою очередь, количество этих центров может быть измерено по интенсивности люминесценции, появляющейся при облучении детектора УФ-излучением. Таким образом, считывающее устройство является по существу флюориметром и может быть непосредственно отградуировано в дозовых единицах (в единицах воздушной кермы, поглощенной или эквивалентной дозах). С другой стороны, очевидно, что для получения минимально возможного нижнего предела измерений, считывающее устройство должно быть оптимизировано по отношению сигнала радиофотолюминесценции к сигналу додозовой люминесценции. Это возможно сделать, зная спектральные и кинетические характеристики излучения той и другой природы.

**Относительно большой «ход с жесткостью»** объясняется присутствием фосфора

( $Z=15$ ) и серебра ( $Z=47$ ). **Ход с жесткостью компенсируется металлическими фильтрами и в диапазоне 40 кэВ – 3 МэВ не превышает 20%.**

В настоящее время наиболее широко в индивидуальной дозиметрии применяются алюмофосфатные стекла ( $P_2O_5$ ) активированные серебром ( $AgO_2$ ).

Упрощенная блок-схема прибора для считывания дозы приведена на рисунке 49.

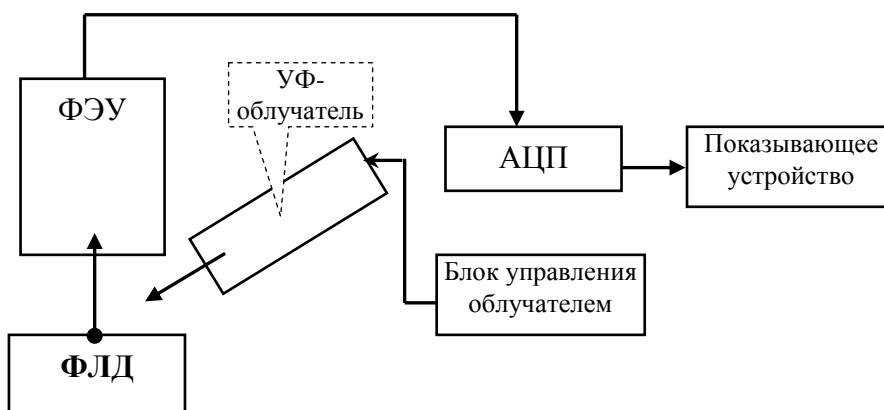


Рис.49. Блок-схема прибора для снятия дозы с ФЛД.