

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

В.И. Кочубей

**ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КРИСТАЛЛОФОСФОРОВ
И ЗАКОНЫ ЕЕ ЗАТУХАНИЯ**

Руководство к лабораторной работе

Саратов — 2008

Введение.

Одним из наиболее распространенных видов люминофоров являются кристаллофосфоры. Существует упрощенное определение кристаллофосфоров: «Кристаллофосфорами называются сложные кристаллические соединения, способные люминесцировать как в процессе возбуждения, так и некоторое время после его прекращения». Следует отметить, что данное определение не совсем полно описывает природу как самих кристаллофосфоров, так и возникающей в них люминесценции. Кристаллофосфор — это сложное, кристаллическое соединение, в котором может возникать люминесценция вследствие наличия дефектов кристаллической решетки. Люминесценция может возникать как вследствие рекомбинации дефектов, так и на электронных переходах внутри дефекта. Таким образом, идеальный кристалл не является кристаллофосфором. В то же время, люминесценция может возникать и в идеальном кристалле, если дефекты решетки в нем временно созданы при возбуждении образца. Классическим примером является пара дефектов электрон — дырка, возникающих при оптическом возбуждении перехода зона-зона.

Способность кристаллофосфоров люминесцировать чаще всего обусловлена наличием в их кристаллической решетке малых (сотые или тысячные доли процента) количеств примеси. Такие примесные ионы - активаторы - специально вводятся в решетку кристаллофосфора в процессе его приготовления. Ионы активатора, взаимодействующие с ближайшими ионами основного вещества, образуют центры люминесценции в кристаллофосфоре. Центры люминесценции могут представлять собой сложные образования, выяснение природы которых представляет собой сложную задачу. Однако в простых случаях, например, для щелочно - галоидных кристаллов, активированных ионами тяжелых металлов или редкоземельными ионами, установлено, что люминесцентные свойства кристаллофосфора определяются, в основном, ионами активатора.

Целью данной работы является введение в основные закономерности и механизмы возникновения люминесценции кристаллофосфоров и определение основных параметров люминесценции на примере примесных узкозонных полупроводников. Такими параметрами являются спектральные зависимости люминесценции и закономерности изменения люминесценции во времени после прекращения возбуждения.

Закон изменения интенсивности люминесценции кристаллофосфора во времени после снятия возбуждения называется законом затухания люминесценции. Длительность затухания люминесценции кристаллофосфора τ обычно характеризуется временем, за которое интенсивность люминесценции I_0 с момента прекращения действия возбуждения прекращается в e раз. Для различных кристаллофосфоров τ меняется в очень широких пределах от миллионной доли секунды до нескольких часов.

§1. Мономолекулярный и бимолекулярный механизмы люминесценции кристаллофосфоров

Типичные фосфоры, например, цинкосульфидные или щелочно - галоидные кристаллы, как правило, прозрачны в видимой области спектра. Фундаментальное поглощение, т.е. поглощение основного вещества при переходе зона-зона, у них начинается в ультрафиолетовой области. Поглощение введенной примеси (активатора) расположено в длинноволновой области по отношению к краю фундаментального поглощения и имеет вид отдельных полос или систем полос. Люминесценция и несобственное поглощение кристаллофосфора обусловлены электронно - колебательными переходами внутри центра излучения.

Люминесценция кристаллофосфора может возникать как при освещении его светом с длиной волны, соответствующей области активаторного поглощения, так и при освещении в области фундаментального поглощения кристалла. Такая люминесценция называется фотолюминесценцией, а облучение кристалла, приводящее к возникновению люминесценции - возбуждением люминесценции.

Если весь процесс люминесценции кристаллофосфора от поглощения возбуждающего света до излучения происходит только в центре свечения, то такой процесс называется внутрицентральной люминесценцией. В этом случае кинетика затухания люминесценции носит характер мономолекулярной реакции. Длительность внутрицентральной люминесценции определяется только временем жизни центра излучения и составляет величину $10^{-8} - 10^{-4}$ сек.

Если при возбуждении происходит ионизация какого - либо из элементов кристаллической решетки и люминесценция происходит путем взаимодействия продуктов ионизации (электронов или дырок) с центром излучения, то такая люминесценция

называется рекомбинационной. При этом между актами возбуждения и люминесценции происходит процесс диффузии по кристаллу электронов или дырок от места возбуждения к месту рекомбинации. Кинетика затухания люминесценции носит бимолекулярный характер.

§ 2. Зонная модель кристаллофосфора

В настоящее время для объяснения особенностей люминесценции кристаллофосфора широко пользуются зонной схемой т.к. она, несмотря на ряд недостатков, позволяет наглядным образом интерпретировать многие явления, связанные с рекомбинационным свечением фосфора.

В основе зонной модели лежат развитые Блохом представления о том, что в периодическом поле идеальной кристаллической решетки электрон можно рассматривать как квазисвободный. При этом он не может принимать произвольные значения энергии - широкие области (зоны) дозволённых значений энергии разделены областями запрещённых значений. В каждой разрешённой зоне имеется N уровней, где N - число всех атомов или ионов, электроны которых могут находиться в данной зоне. Согласно принципу Паули на этих N уровнях могут разместиться $2N$ электронов. Энергия переходов электронов с глубоких, полностью заполненных зон, в верхние соответствует фундаментальному поглощению (т.е. поглощению в жесткой ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра). Поэтому эти зоны не дают вклад в оптические свойства кристаллофосфора и не рассматриваются при описании процессов люминесценции. Обычно рассматриваются три зоны (рис. 1): самая верхняя заполненная зона (так называемая валентная зона V), находящаяся над ней первая свободная зона (зона проводимости C) и разделяющая их запрещённая зона.

В запрещённой зоне, при наличии примесей или дефектов решетки, находятся локальные, т.е. не присущие всей кристаллической решетке в целом, энергетические уровни. Положение этих уровней относительно валентной зоны и зоны проводимости определяется структурой дефекта и его взаимодействием с окружающей кристаллической решеткой.

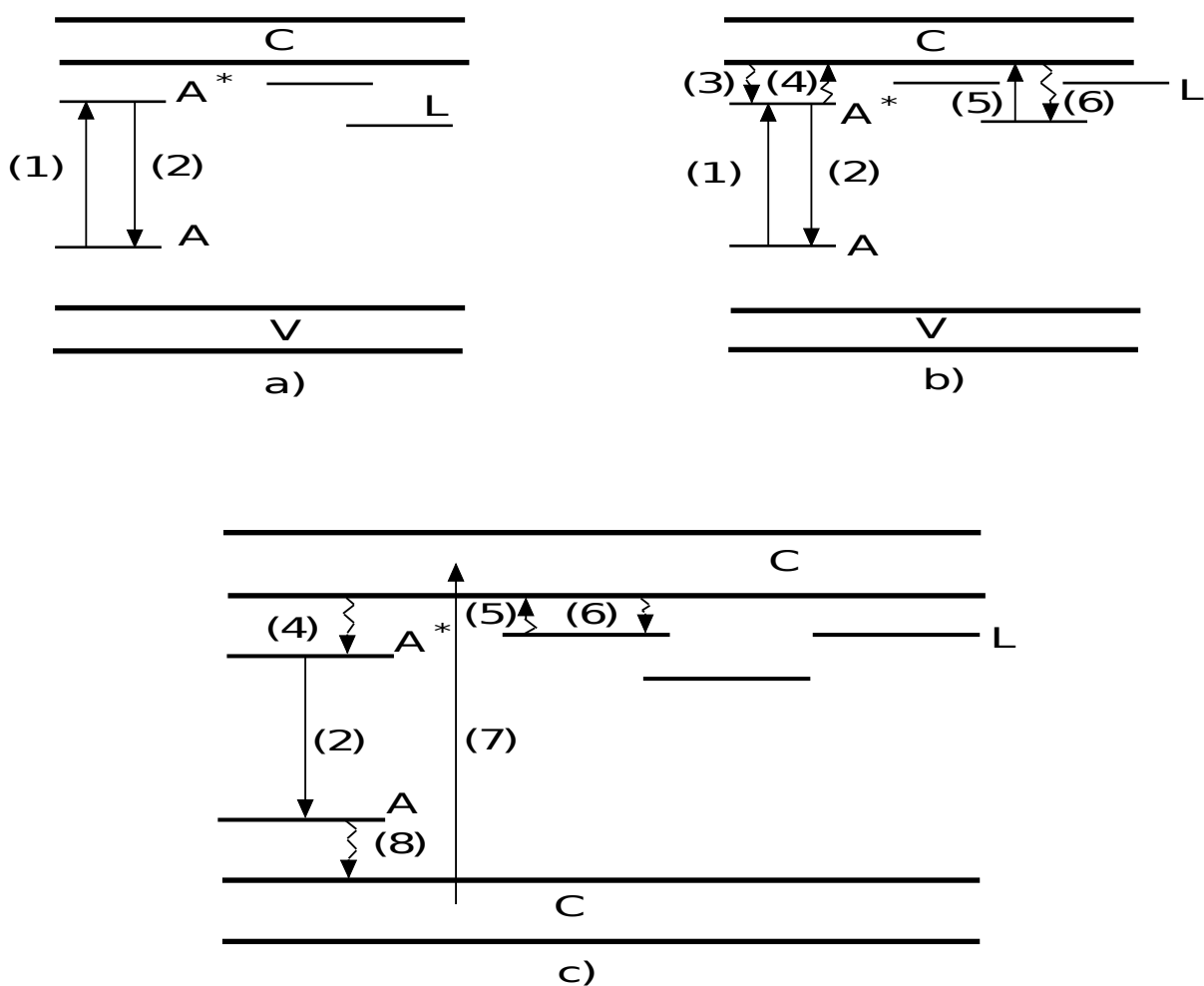


Рис.1 Зонная схема кристаллофосфора

При поглощении света непосредственно центром люминесценции происходит электронный переход из основного энергетического состояния в возбужденное (переход 1). Обратный переход (переход 2) в основное состояние дает внутрицентровую люминесценцию. Если энергетическое расстояние между возбужденным уровнем A^* и зоной проводимости сравнимо с величиной kT , то может произойти тепловая ионизация центра излучения.

Ионизированные центры излучения и свободные электроны в зоне проводимости появляются также и при поглощении света основным веществом кристаллофосфора. Поглощение в области собственных полос приводит к внутреннему фотоэффекту, т.е. переходу электрона из валентной зоны V в зону проводимости C . Образующиеся при

этом в валентной зоне дырки могут заполняться электронами с уровней активатора. Этот процесс ионизации центров излучения “снизу” энергетически выгоден, т.к. связан с переходом электрона на более низкий энергетический уровень. Электрон, попавший в зону проводимости может локализоваться на каком-либо центре захвата или же вступить в рекомбинацию с одним из ионизированных центров люминесценции. В этом случае возникает возбужденный центр люминесценции, который переходит в основное состояние с излучением света, характерного для данного активатора.

Локализованные на уровнях захвата L электроны время от времени освобождаются тепловым путем (переход **5**). Энергия, необходимая для перехода такого электрона в зону проводимости может быть получена за счет тепловых колебаний решетки кристалла без дополнительного освещения фосфора. Вследствие этого характеристическое время этого процесса существенно зависит от температуры. Освобожденные электроны либо претерпевают повторный захват, либо воссоединяются с ионизированными центрами люминесценции с последующим излучением. Таким образом, возникает длительное свечение - фосфоресценция, которая продолжается до тех пор, пока не освободятся все захваченные электроны.

§3. Однокоординатная модель центра излучения

При помощи упрощенной зонной модели можно объяснить целый ряд фундаментальных свойств кристаллофосфоров, например, рекомбинационный характер люминесценции и т.д. Однако целый ряд существенных особенностей люминесценции кристаллофосфоров - температурное и концентрационное тушение, длинноволновый сдвиг полос по сравнению с соответствующими полосами активаторного поглощения (закон Стокса - Ломмеля) и т.д. не объясняются в рамках такой модели. Это объясняется тем, что приближенная зонная теория не учитывает колебания ядер кристаллической решетки.

Как уже говорилось выше, основному и возбужденному состояниям центра излучения в зонной модели соответствуют локальные уровни A и A^* . В действительности же, в силу сложности пространственной структуры центра излучения, его состояние и энергия существенно зависят от координат и скоростей ядер, совершающих тепловые колебания. Поэтому энергетическое состояние центра излучения в каждый данный

момент следовало бы представить точкой в многомерном пространстве. Однако некоторые основные свойства таких центров могут быть хорошо описаны двумерной энергетической моделью, в которой энергия центра является функцией лишь одного, так называемого, обобщенного конфигурационного параметра ρ . В случае, например, двухатомной молекулы ρ имеет смысл расстояния между ядрами. Для одного из простейших центров люминесценции - центра I типа в кристаллофосфоре **KCl-Tl**, параметр ρ имеет смысл усредненного расстояния от иона активатора Tl^+ до ближайших шести (т.к. решетка **KCl** - кубическая гранецентрированная) ионов Cl^- . Такая упрощенная однокоординатная “конфигурационная” модель центра представляет собой две кривые, отображающие, соответственно, величину потенциальной энергии невозбужденного и возбужденного центра излучения в зависимости от конфигурационного параметра ρ .

Если пренебречь нулевой колебательной энергией, то минимумы конфигурационных кривых E_{10} и E_{20} характеризуют невозбужденное и возбужденное состояние центра при **0K**. Когда система оказывается в точке E_2 в результате перехода из невозбужденного состояния, допустим, при температуре, близкой к абсолютному нулю (переход $E_{10}-E_2$), то возбужденное состояние оказывается более “нагретым”, чем остальная решетка, и поэтому такой центр будет “остывать”, отдавая избыток энергии в виде фотонов решетки. Такая релаксация совершается очень быстро, за 10^{-13} - 10^{-12} сек, поэтому вероятность излучения до перехода системы в состояние равновесия ничтожно мала. После перехода в состояние равновесия происходит излучательный переход $E_{20}-E_{10}$. Очевидно, $E_2-E_{10} > E_{20}-E_{10}$ или $h\nu_{\text{погл}} > h\nu_{\text{изл}}$. Это и есть математическое выражение закона Стокса- Ломмеля, согласно которому полоса излучения смещена в длинноволновую область спектра по отношению к полосе поглощения.

Если температура настолько велика, что в возбужденном состоянии $E_2 > E_c$, то система может оказаться около точки **C** (критическое состояние) и перейти в основное состояние с испусканием фотонов, т.е. безизлучательным путем. Следовательно, с помощью однокоординатной модели могут быть рассмотрены часто наблюдаемые экспериментально процессы внутрицентрального температурного тушения люминесценции.

Однокоординатная модель центра позволяет также объяснить форму спектров поглощения и излучения и ее зависимость от температуры при введении некоторых предположений относительно вида потенциальных кривых.

Таким образом, зонная модель кристаллофосфора, дополненная однокоординатной моделью центра свечения, позволяет интерпретировать основные экспериментальные данные, связанные с люминесценцией кристаллофосфоров. Однокоординатная модель хорошо объясняет процессы, в которых принимает участие вся кристаллическая решетка фосфора.

§ 4. Законы затухания люминесценции кристаллофосфоров

Одной из важнейших проблем люминесценции кристаллофосфоров является изучение законов изменения интенсивности люминесценции во времени после прекращения возбуждения (законов затухания люминесценции).

Теоретическое рассмотрение законов затухания люминесценции основывается на предположении о мономолекулярном или бимолекулярном характере свечения.

а) Закон затухания внутрицентральной люминесценции.

Легко показать, что закон затухания внутрицентральной люминесценции, имеющей мономолекулярный характер, представляет собой экспоненту.

Пусть

N_0 - число возбужденных центров свечения в момент прекращения возбуждения.

N - число возбужденных центров свечения в некоторый момент времени t

α - вероятность излучательного перехода возбужденного центра свечения в основное состояние.

Если в кристалле отсутствует тушение люминесценции, вероятность безизлучательных переходов полагают равной нулю. Тогда уменьшение числа возбужденных центров свечения- dN за малое время dt равно $\alpha N dt$, т.е.

$$-dN = \alpha N dt; N = N_0 e^{-\alpha t}$$

Интенсивность люминесценции пропорциональна уменьшению числа возбужденных центров свечения в единицу времени:

$$I \cong -dN/dt = \alpha N = \alpha N_0 e^{-\alpha t}; I = I_0 e^{-t/\tau} = I_0 e^{-t/\tau} \quad (1)$$

где I_0 - интенсивность люминесценции в момент прекращения возбуждения, τ - время, за которое начальная интенсивность уменьшается в e раз, т.е. τ - длительность люминесценции. Очевидно, что τ как раз равно среднему времени жизни центра свечения в возбужденном состоянии.

б) Закон затухания рекомбинационной люминесценции

Вначале найдем закон затухания люминесценции в идеализированном случае когда в кристаллофосфоре есть только центры свечения и полностью отсутствуют какие-либо центры захвата. Тогда число ионизированных центров свечения N и электронов в зоне проводимости n в точности равно между собой в любой момент времени.

Если β - вероятность рекомбинации электрона с центром свечения, то уменьшение количества ионизированных центров свечения за время dt можно выразить следующим образом:

$$-dN = \beta N n dt = \beta N^2 dt.$$

Интегрируя, получим:

$$1/N = \beta t + \text{const.}$$

Если отсчёт времени вести от момента снятия возбуждения и через N_0 обозначить число ионизированных центров свечения в момент t , то

$$\text{const} = 1/N_0 \text{ и } 1/N = \beta t + 1/N_0; N = N_0 / (1 + \beta N_0 t)$$

Если пренебречь вероятностью безизлучательных переходов возбужденных центров свечения в основное состояние (как указывалось выше, после рекомбинации электрона с ионизированным центром свечения, последний находится в возбужденном состоянии), то интенсивность люминесценции можно считать пропорциональной $-dN/dt$. Поэтому

$$I \sim dN/dt = \beta N^2; I = \beta N_0^2 / (1 + \beta N_0 t)^2$$

при $t = 0 \quad I = I_0 = \beta N_0^2$

$$I = I_0 / (1 - (\beta I_0)^{1/2} t)^2; \quad I = I_0 / (1 + \alpha t)^2 \quad (2)$$

Таким образом, для кристаллофосфора, не имеющего центров захвата, закон затухания представляет собой гиперболу второго порядка. Опыт показывает, что в некоторых редких случаях затухание люминесценции кристаллофосфоров действительно идет по гиперболе второго порядка. Однако чаще всего, как было указано Беккерелем в 1868 г, экспериментально наблюдаемые законы затухания представляют собой гиперболу с показателем степени меньшим двух:

$$I = I_0 / (1 + \alpha t)^\alpha: \quad \text{где} \quad 1 \leq \alpha \leq 2 \quad (3)$$

Несовпадение выводов приведенного выше теоретического рассмотрения с результатами эксперимента вполне понятно, т.к. вывод закона затухания (2) был проведен для идеализированного положения вещей. Мы рассмотрели фосфор только с одними центрами свечения, без центров захвата. В реальном кристаллофосфоре наряду с центрами свечения имеется большое число различных центров захвата, Кроме того, бывают кристаллофосфоры, содержащие центры свечения двух, трех и т.д. видов. Задача теоретического отыскания закона затухания для реального кристаллофосфора очень сложна. Поэтому мы ограничимся рассмотрением только гипотетического кристаллофосфора, в котором наряду с центрами свечения одного вида имеются центры захвата тоже одного вида (ловушки одинаковой глубины). Введём для такого кристаллофосфора следующие обозначения:

- N** - концентрация ионизированных центров свечения,
- n**, - концентрация электронов, локализованных на центрах захвата (число заполненных ловушек),
- v** - концентрация ловушек,
- n** - концентрация электронов в зоне проводимости,
- σ_z** - эффективное сечение захвата электрона ловушкой,
- σ_p** - эффективное сечение захвата электрона центром свечения,
- ω или **p**** - вероятность теплового освобождения электрона из ловушки глубины **E**.

Постоянные σ_p и σ_z имеют размерность см^2 . В первом приближении σ_p и σ_z можно рассматривать как площадь, ограниченную кругом радиуса, равного максимальному расстоянию, на котором может произойти рекомбинация или захват электрона.

$P = \sigma_p U$ - вероятность рекомбинации электрона с центром свечения,

$\sigma_z U$ - вероятность захвата электрона ловушкой.

Для любого момента времени в процессе затухания люминесценции кристаллофосфора выполняются следующие соотношения:

$$dn/dt = \omega n_z - \beta n N - \sigma_z n U (v - n_z) \quad (4)$$

$$dN/dt = -\beta n N \quad (5)$$

$$dn_z/dt = -\omega n_z + \sigma_z n U (v - n_z) \quad (6)$$

$$N = n + n_z \quad (7)$$

Записанная система не решается в элементарных функциях.

Введем некоторые приближения, основанные на физических соображениях.

Длительность послесвечения определяется большим из двух характеристических времен - средним временем жизни электрона в ловушке ($\tau = 1/\omega$) и средним временем жизни в зоне проводимости t_0 . Если $\tau \sim t_0$, или $\tau < t_0$, то длительность послесвечения будет составлять малые доли секунды. Кристаллофосфор с длительным послесвечением имеет $\tau \gg t_0$, т.е. время жизни электрона в ловушке много больше его времени жизни в зоне проводимости. При выполнении условия $\tau \gg t_0$ можно ожидать малую квазистационарную концентрацию свободных электронов. Приближение, в котором dn/dt полагают равным нулю, т.е. число электронов в зоне проводимости считают некоторой малой постоянной величиной, называют квазистационарным.

В квазистационарном приближении уравнения (4) - (7) принимают следующий вид:

$$\beta n N = \omega n_3 - \sigma_3 n U (v - n_3) \quad (4')$$

$$dN/dt = -\beta n N \quad (5')$$

$$dn_3/dt = dN/dt = -\omega n_3 + \sigma_3 n U (v - n_3) \quad (6')$$

$$N = n_3 \quad (7')$$

Из (4') :

$$n = \omega n_3 / (\beta N - \sigma_3 U (v - n_3))$$

Используя (7') можно записать

$$n = \omega N / (\beta N - \sigma_3 U (v - n_3))$$

Подставив полученное выражение в (5), найдем:

$$\frac{-dN}{dt} = \frac{\beta \omega N^2}{\beta N + \sigma_3 U (v - N)} = \frac{\omega N^2}{N + \frac{\sigma_3 U}{\beta} (v - N)}$$

т.к. $\beta = \sigma_p U$, полученное соотношение можно переписать, введя отношение эффективных сечений захвата и рекомбинации

$$I = \frac{dN}{dt} = \frac{\omega N^2}{N + g \beta (v - N)} \quad (8)$$

Рассмотрим выражение в двух предельных случаях:

а) $\sigma \sim \sigma_p$, т.е. $\gamma = 1$. Соотношение (8) примет вид:

$$\int_0^{-N} \frac{dN}{N^2} = \int_0^t \omega dt; \quad N = \frac{N_0}{1 + \frac{N_0 \omega}{v} t}$$

Интегрируя, получим:

$$I = -\frac{dN}{dt} = \frac{N_0^2 \omega}{v (1 + N_0 \frac{\omega}{v} t)^2}$$

или

$$I = I_0 / (1 + \alpha t)^2$$

т.е., в случае равенства эффективных сечений захвата и рекомбинации закон затухания представляет гиперболу второго порядка

б) Эффективное сечение захвата гораздо меньше эффективного сечения рекомбинации электрона с центром свечения, т.е. $\gamma=0$. Соотношение (8) примет вид

$$-dN/dt=\omega N; N=N_0e^{-\omega t}$$

т.е. затухание рекомбинационной люминесценции в данном случае идет по экспоненте.

Для произвольных значений γ , интегрируя соотношение (8), можно найти зависимость N от t лишь в неявном виде:

$$(1-g)\ln\frac{N_0}{N}+g\left(\frac{1}{N}-\frac{1}{N_0}\right)\omega t \quad (9)$$

Соотношения (8) и (9) представляют собой запись закона затухания люминесценции кристаллофосфора в параметрическом виде. В эти соотношения входят параметры ω, γ, ν, N_0 , определяемые условиями опыта - температурой и временем возбуждения.

Адирович [1] предложил сократить число параметров в уравнениях (8) и (9) проведением подходящей замены переменных:

$\mu=N/\nu$ - безразмерная характеристика светосуммы;

$\beta=(\tau/\nu)I$ — безразмерная интенсивность;

$V=t/\tau$ - время в единицах τ где τ - среднее время жизни электрона в ловушках;

$Z=N_0/\nu$ - характеристика степени возбуждения фосфора;

$L=N/N_0$ - величина, характеризующая светосуммы в текущий момент и начальный момент времени.

Используя введенные обозначения, соотношения (8) и (9) можно переписать в следующем виде:

$$\beta=\frac{Z^2L^2}{g+Z(1-g)L} \quad (8')$$

$$V=(1-g)\ln\frac{1}{Z}+\frac{g}{Z}\left(\frac{1}{L}-1\right) \quad (9')$$

Закон затухания, записанный в виде соотношений (8') и (9') включает два параметра Z и γ и носит название закона затухания в безразмерном виде. Параметры $\omega=1/\tau$ и ν определяют масштаб единиц времени и интенсивности. Для кристаллофосфоров с одинаковыми γ , но различными ν и τ теоретические кривые в безразмерных осях V и β совпадают. Это облегчает анализ кривых затухания. Адирович провел численные расчеты затухания для кристаллофосфоров с различными γ в условиях "насыщения", т.е. при таких условиях возбуждения, когда все ловушки оказываются заполненными электронами. В условиях насыщения

$$Z=N_0 / \nu=1 \quad \text{и} \quad \mu=N / \nu=N / N_0=L$$

Соотношения (8') и (9') принимают вид:

$$\beta = \frac{m^2}{g + (1-g)m} \quad (8'')$$

$$V = (1+g) \ln \frac{1}{m} + g \left(\frac{1}{m} - 1 \right) \quad (9'')$$

Анализ кривых, построенных по расчетным данным, показал, что на основном центральном участке они могут быть аппроксимированы дробной гиперболой:

$$\beta = C / (1+V)^\alpha$$

т.к. $\beta = I_\tau / \nu$, а $V = t / \tau$, можно записать

$$I = I_0 / (1+\alpha t)^\alpha \quad (3)$$

Этот участок кривой затухания был назван беккерелевским.

Область остаточных светосумм характеризуется малой интенсивностью и медленным высвечиванием. Для этой области $\mu=N / \nu \ll 1$ и поэтому $\beta \sim \mu^2 / \gamma$ а $V = \gamma / \mu$. Следовательно, $\beta \approx \gamma / V^2$. Т.к. $V \gg 1$ на дальних стадиях затухания, то к V можно прибавить 1, не внося большой ошибки. Тогда

$$\beta \sim 1 / (1+V)^2,$$

т.е. затухание люминесценции в конце высвечивания идет по гиперболе второго порядка. Этот вывод согласуется с экспериментом.

Теория Адировича впервые объяснила экспериментальную формулу Беккереля для закона затухания кристаллофосфора, а также квадратичную зависимость интен-

сивности люминесценции от времени на дальних стадиях затухания для слабо возбужденных фосфоров. В дальнейшем в работах Антонова- Романовского [2], Фока [3] и других были предприняты попытки теоретического отыскания закона затухания люминесценции кристаллофосфоров с двумя различными сортами центров захвата, учетом эффекта тушения люминесценции и т.д.

§6. Цель лабораторной работы

1. Экспериментальное изучение спектров излучения кристаллофосфоров **ZnS-Cu, ZnS-Ag, ZnS-Cd**.
2. Экспериментальное изучение затухания люминесценции кристаллофосфора **ZnS-Cu**.

§7. Порядок выполнения работы

А). Измерение спектра люминесценции

Измерения и построение спектров проводятся в соответствии с описанием спектрофлуориметра

Б). Нахождение закона затухания **ZnS-Cu**

1. Создать запасенную в кристалле светосумму облучая люминофор путем открытия на **0,5** сек и закрытия шторки **З**.

2. Через **15** сек открыть шторку **5**. Измерять и записывать показания микроамперметра в течение **1** минуты через каждые **5** сек, затем еще **4** мин через каждые **10** сек.

Полученные данные свести в таблицу.

По экспериментальным данным, полученным при наблюдении затухания люминесценции, построить график зависимости **$I_{\text{фз}}$** от **t** .

Полученный график будет передавать ход изменения люминесценции со временем, то есть будет представлять собой закон затухания люминесценции кристаллофосфора. На экспериментальной кривой следует подобрать **I_1, I_2, I_3, I_4** , удовлетворяющие условию

$$I_1/I_2=I_3/I_4 \quad (10)$$

Отметить соответствующие моменты времени t_1, t_2, t_3, t_4 .

На основании (3) и (10) имеем

$$\frac{(1+at_2)^\alpha}{(1+at_1)^\alpha} = \frac{(1+at_4)^\alpha}{(1+at_3)^\alpha}$$

Отсюда

$$a = \frac{(t_1+t_4)-(t_2+t_3)}{t_2t_3-t_1t_4} \quad (11)$$

По значениям t_1, t_2, t_3, t_4 , пользуясь соотношением (11), можем оценить параметр

a. Для отыскания параметра α воспользуемся соотношением

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{(1+at_2)^\alpha}{(1+at_1)^\alpha}$$

из которого следует, что

$$\alpha = \frac{\ln \frac{I_1}{I_2}}{\ln \left[\frac{(1+at_2)}{(1+at_1)} \right]} \quad (12)$$

В выражении (12) все величины известны: I_1, I_2, t_1, t_2 - находятся по экспериментальной кривой, параметр α оценивается на основании соотношения (11).

Используя полученные значения параметров a и α , записать закон затухания кристаллофосфора **ZnS-Cu**.

Примечание: Результаты эксперимента и вычислений следует свести в таблицу:

ϕ°	$\lambda(\text{нм})$	$N_\lambda(\text{мкА})$	$E_0(\lambda)$	$E_{\text{люм}}(\lambda)$

ЛИТЕРАТУРА

1. Адирович Э.И. Некоторые вопросы люминесценции кристаллов М.Л.:ГИТТЛ. 1951г. 350 с.
2. Д. Кюри Люминесценция кристаллов — М.:Издательство иностранной литературы. 1961г. 199 с.
3. Кац М.Л. Люминесценция и электронно- дырочные процессы в фотохимически окрашенных щелочно- галоидных соединениях Саратов:Изд-во Саратовского университета. 1960г. 271 с.
4. Фок М.В. Введение в кинетику люминесценции кристаллофосфоров М.:Наука. 1964г. 283 с.
5. Антонов-Романовский В.В. Кинетика фотолюминесценции кристаллофосфоров М.:Наука. 1966г. 323 с.