

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРИРОДЫ ЦЕНТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ФОСФОРА NaCl-Tl В ШИРОКОЙ ОБЛАСТИ КОНЦЕНТРАЦИЙ АКТИВАТОРА

Н. И. Иванова, А. А. Соловьева и Л. И. Тарасова

Исследовалось влияние концентрации активатора в области 10^{-5} —1.0 мол. % и условий изготовления образцов на спектры люминесценции фосфора NaCl-Tl. Кроме известной полосы Tl⁺-центров 288 нм обнаружено еще девять полос люминесценции, обладающих собственными спектрами возбуждения. Показано, что полосы 357 и 445 нм не связаны с встройкой таллия в NaCl. Полоса 350 нм возникает при растривании фосфора с любой концентрацией таллия. Появление полос 355, 375, 395, 440 и 600 нм обусловлено ростом концентрации активатора. При обсуждении природы центров люминесценции привлекаются представления о многообразии типов встройки активирующей примеси. Исследовалось также влияние концентрации таллия на спектры возбуждения полосы люминесценции 464 нм, принадлежащей фазе TlCl, выпадающей в фосфоре.

Спектральные характеристики щелочногалогенидных фосфоров, активированных тяжелыми металлами, изменяются в зависимости от концентрации активатора и предьстории образца. В настоящее время не вызывает сомнений, что эти изменения связаны с возможностью образования одним активатором ряда центров различной природы, каждый из которых обладает собственным спектром. Однако выбор модели центра в каждом конкретном случае встречается с трудностями, поскольку данные о микроструктуре смешанных кристаллов обычно отсутствуют. Поэтому целесообразно исследовать связь образования тех или иных центров с условиями изготовления фосфоров, которые влияют на характер распределения активатора. В качестве объекта в настоящей работе выбран фосфор NaCl-Tl, спектры которого, по нашим предварительным данным [1], сильно зависят от условий изготовления образцов и их дальнейшей обработки.

Спектры поглощения и излучения NaCl-Tl при малых концентрациях активатора описаны в [2-4]. Единственная полоса люминесценции 288 нм возбуждается в полосах поглощения 255, 215, 200 и 162 нм, называемых соответственно *A*, *B*, *C* и *D*, и приписана ионам Tl⁺, расположенным в катионных узлах решетки.¹ Люминесценцию NaCl-Tl при большой концентрации таллия исследовала Иванова [5], которая обнаружила еще две полосы излучения в области 360 и 600 нм. Полосу 365 нм наблюдали Клемент и Гиндина [6] и Абдусадыхов [7], по данным которого спектр возбуждения этой полосы содержит два максимума 235 и 267 нм. Луцкич [8] приводит другие значения максимумов полос: 356 нм в люминесценции и 225, 272 нм в возбуждении. Таким образом, данные разных авторов о спектрах NaCl-Tl с большой концентрацией активатора несколько расходятся. Ниже будет показано, что в области 340—400 нм существует по крайней мере две полосы излучения, принадлежащие разным центрам. Их относительная интенсивность зависит от концентрации таллия и условий изготовления образца.

¹ Такие центры часто называют основными.

В настоящей работе были исследованы спектры четырех серий образцов NaCl-Tl, полученных кристаллизацией из расплава или водных растворов. Кристаллизация из водных растворов производилась двумя способами. В первом способе растворы, насыщенные хлористым натрием и содержащие разные концентрации таллия, хранились при комнатной температуре без перемешивания. Скорость испарения воды определялась степенью герметизации раствора. В таких условиях вырастали хорошо ограненные кристаллы с размерами от 1—2 до 10 мм. Кристаллы одной серии росли около года, другой — один месяц. Во втором способе растворы, содержащие таллий, насыщались хлористым натрием при температуре кипения. В процессе спокойного кипения растворов выпадали мелкие кристаллы NaCl-Tl. Осадки промывались насыщенным раствором NaCl на бюхнеровской воронке, а затем сушились в эксикаторе. При кристаллизации из расплава смеси солей NaCl и TlCl расплавлялись в запаянных кварцевых ампулах и в течение десяти часов охлаждались от температуры плавления до комнатной. Образцы получались в виде поликристаллов. Для некоторых опытов использовались монокристаллы NaCl-Tl, выращенные по методу Киропулоса, и так называемые диффузионные фосфоры, полученные растиранием смеси солей основания и активатора. Исходный хлористый натрий был марки «особо чистый» или «спектрально чистый». TlCl осаждался хлористым калием из раствора, предварительно перекристаллизованного Tl_2CO_3 , марки «Ч». Вода для приготовления растворов подвергалась двойной перегонке. Образцы анализировались на содержание таллия. Для этого кристаллы растворялись в воде и измерялась величина поглощения в характерной полосе таллия 242 нм. Ошибка определения концентрации не превышала 10%.

Возбуждение люминесценции производилось светом водородной лампы с окном из кристаллического кварца через монохроматор с дифракционной решеткой. При измерении спектров возбуждения распределение интенсивности в спектре лампы учитывалось с помощью салициловокислого натрия или красного люмогена. Спектры излучения измерялись фотоэлектрически через второй монохроматор с решеткой и исправлялись на пропускание монохроматора и чувствительность фотоумножителя. Измерения велись со спектральной шириной щели 1—5 нм для спектров возбуждения и 5—10 нм — для спектров люминесценции. Образцы охлаждались до 90° К или находились при комнатной температуре.

Измерения показали, что спектры люминесценции и возбуждения NaCl-Tl зависят не только от концентрации таллия, но и от способа приготовления фосфора, термической и механической обработки образцов, присутствия воды и от температуры наблюдения. Особенно сложное поведение наблюдается в близкой ультрафиолетовой и синей областях спектра, где существует ряд сильно перекрытых полос излучения. Подбором условий изготовления образцов удалось выделить десять различных полос люминесценции. Их максимумы и минимумы в их спектрах возбуждения приведены в таблице. Было выяснено, что полосы 357 и 445 нм не принадлежат фосфору NaCl-Tl; полосы 288 и 350 нм наблюдаются при любых, в том числе и малых концентрациях таллия, а появление остальных полос вызвано ростом концентрации активатора. Рассмотрим более подробно свойства каждой полосы.

Полоса 357 нм (рис. 1, а, кривые 1, 2) никогда не наблюдается у образцов, приготовленных из водных растворов, и у диффузионных фосфоров. Она появляется в спектре после плавления или прогрева образца при температурах, больших 400° С. Ее интенсивность практически не зависит от концентрации таллия. Это позволяет предположить, что полоса 357 нм не связана с присутствием таллия. Действительно, похожая полоса наблюдалась в спектре неактивированного хлористого натрия [9, 10] и была приписана дефектам, возникающим при прогреве кристаллов на их поверхности. Мы сравнили люминесценцию в области 360 нм различных образцов NaCl, в том числе и особо чистых солей (рис. 1, а, кривые 1', 2') с полосой 357 нм NaCl-Tl и нашли, что они идентичны не только по виду и

Положение максимумов полос люминесценции
и соответствующих им полос возбуждения NaCl-TlCl, нм

Люминесценция	Возбуждение		Концентрационная граница возникновения, мол. %
288 *	200, 215	255	—
350 *	<200	243	—
355	225	255, 265	10 ⁻³
357	~200	255	—
~375 **	~200	~240	—
395	215—235	262	10 ⁻³
~440 **	190—220	?	10 ⁻³
445 *	208	242	—
464 **	200—370	—	—
600	245	272	10 ⁻²

* В работе [1] для этих полос приведены максимумы 298, 380 и 435 нм, полученные из микрофотограмм спектров, не исправленных на спектральную чувствительность пленки.

** Эти полосы не наблюдаются при комнатной температуре.

спектру возбуждения, но и по особенностям появления. У монокристаллов NaCl-Tl, так же как и у кристаллов NaCl, люминесценция 357 нм возникает в результате термической обработки с поверхности, а по мере прогрева усиливается и распространяется вглубь кристалла.

Полоса 445 нм (рис. 1, в, кривые 1, 2) появляется в спектрах фосфора NaCl-Tl только в присутствии воды и может быть надежно отнесена к фазе водного раствора NaCl+TlCl [1]. Присутствие полосы 445 нм в спектрах фосфора, по-видимому, связано с тем, что кристаллизация NaCl-Tl из водных растворов сопровождается ростом концентрации таллия в растворе [11]. В спектрах, активированных таллием хлоридов калия, рубидия и цезия, которые охотно захватывают таллий из раствора, полоса 445 нм никогда не наблюдается.

При малых концентрациях таллия (10⁻⁵—10⁻⁴ мол. %) в спектре люминесценции кристаллов NaCl-Tl, полученных в таких условиях, когда полосы 357 и 445 нм отсутствуют, наблюдается только полоса основных центров 288 нм (рис. 1, б). В результате растирания кристаллов возникает широкая и, по-видимому, элементарная полоса 350 нм (рис. 1, в, кривые 1', 2'). Такая же полоса наблюдается в спектре диффузионных фосфоров. Изучение влияния паров воды на интенсивность полосы 350 нм показывает, что соответствующие ей центры расположены вблизи поверхности кристаллов, и для их образования необходимо некоторое количество воды [1]. Спектр возбуждения полосы 350 нм аналогичен спектру возбуждения люминесценции комплексов таллия в водных растворах щелочных хлоридов (рис. 1, в, кривая 1). Это позволяет предположить, что центры

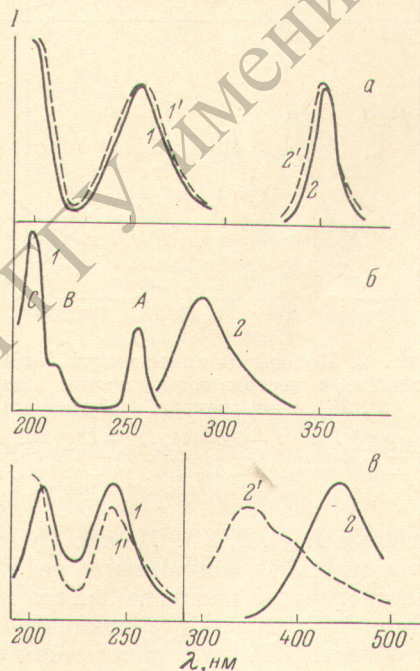


Рис. 1. Полосы люминесценции (2, 2') и соответствующие им спектры возбуждения (1, 1').

а: 1, 2 — монокристалл NaCl-Tl (0.01 мол. % TlCl в расплаве); 1', 2' — NaCl, прогретый при 600° С; б: NaCl-10⁻⁴ мол. % TlCl, полученный из расплава; в: 1, 2 — кристаллы NaCl-10⁻⁴ мол. % TlCl из водного раствора; 1', 2' — те же кристаллы после растирания. T=293° К.

полосы 350 нм по своему строению близки к комплексам таллия с ионами хлора. Растирание кристаллов NaCl-Tl и возникновение полосы 350 нм сопровождается падением интенсивности полосы основных центров 288 нм, которая может быть практически полностью подавлена. Так как основные центры образуются в результате встройки активатора в решетку основания, следует сделать вывод, что растирание переводит таллий из объема кристаллов на поверхность. Это явление наблюдается при любых концентрациях таллия, в том числе на два—три порядка меньших предела его растворимости в NaCl. По-видимому, твердый раствор таллия в NaCl нестабилен уже при малых концентрациях. Поскольку интенсивность полосы 288 нм продолжает падать и после прекращения растирания, можно предположить, что механизм перехода таллия на поверхность связан с диффузией примеси по дефектам, возникающим при растирании кристаллов.

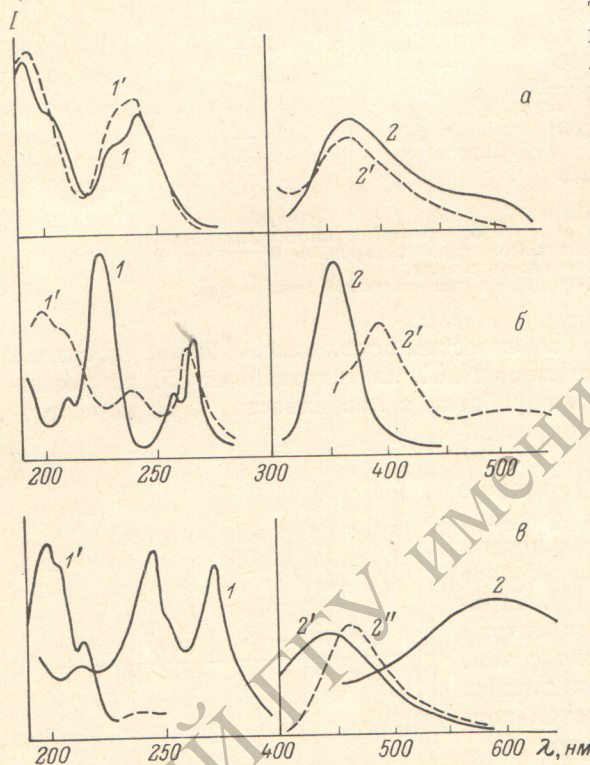


Рис. 2. Полосы люминесценции NaCl-Tl, возникающие с ростом концентрации активатора (2, 2', 2''), и их спектры возбуждения (1, 1').

$T=90^\circ \text{K}$. а: 1 — $\lambda_{\text{л}}=340$, 1' — 380 нм, 2 — $\lambda_{\text{в}}=220$, 2' — 255 нм; б: 1 — $\lambda_{\text{л}}=350$, 1' — 400 нм, 2 — $\lambda_{\text{в}}=225$, 2' — 240 нм; в: 1 — $\lambda_{\text{л}}=600$, 1' — 420 нм, 2 — $\lambda_{\text{в}}=275$, 2' — 200 нм, 2'' — 350 нм.

Изменения спектра NaCl-Tl, обусловленные ростом концентрации активатора, зависят от условий изготовления фосфора. В спектре образцов, полученных очень медленной (в течение года) кристаллизацией из растворов, даже почти насыщенных по таллию, кроме полосы основных центров, появляется всего одна полоса с максимумом около 375 нм, которая наблюдается только при охлаждении образца. Ее положение и форма несколько меняются при изменении длины волны возбуждающего света, а форма полос возбуждения зависит от длины волны люминесценции (рис. 2, а, кривые 1, 1', 2, 2'). Можно думать, что полоса 375 нм неэлементарна, но разрешить ее компоненты не удалось. При быстрой кристаллизации из раствора или расплава вместо полосы 375 нм возникают другие полосы. По мере возрастания концентрации таллия сначала появляется полоса в области 365 нм, аналогичная описанной в работах [5-8]. Изучение зависимости ее формы от длины волны возбуждающего света и вида спектра возбуждения от длины волны излучения позволило установить, что люминесценция в области 365 нм состоит из двух полос: 355 и 395 нм (рис. 2, б, кривые 1, 2, 1', 2'), спектры возбуждения которых сильно перекрываются и искажают друг друга. Относительная интенсивность полос 355 и 395 нм несколько меняется с ростом концентрации таллия в пользу полосы 395 нм, причем более заметно у образцов, приготовленных из расплава. При растирании фосфора полоса 355 нм резко ослабляется, а полоса 395 нм сохраняет высокую интенсивность. Одновременно с полосами 355 и 395 нм появляется слабое свечение во всей видимой области без отчетливо выраженного максимума. При содержании таллия выше 10^{-2} мол. % в этой части спектра развивается широкая полоса с максимумом около 600 нм (рис. 2, в, кривая 2). Спектр ее возбуждения вначале совпадает со спектром воз-

буждения полосы 395 нм, а при увеличении концентрации таллия постепенно сдвигается к положению, указанному в таблице и на рис. 2, *в*, кривая 1. Кроме этих полос в спектре образцов, полученных из расплава, при концентрации таллия около 10^{-2} мол. % появляется характерная низкотемпературная люминесценция фазы TlCl в полосе 464 нм (рис. 2, *в*, кривая 2'' и рис. 3). При кристаллизации фосфора из кипящих растворов присутствие фазы наблюдается и при меньших концентрациях таллия. В этих случаях в спектре наряду с полосой фазы присутствует также низкотемпературная полоса с максимумом около 440 нм (рис. 2, *в*, кривые 1',

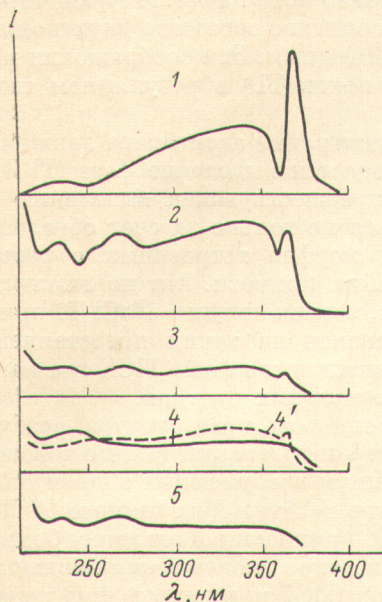


Рис. 3. Спектры возбуждения для $\lambda = 460$ нм при 90° К.

1 — TlCl, 2—5 — кристаллы NaCl-Tl с концентрацией таллия 0.017, 0.008, 0.003, 0.001 мол. % 4, 4' — свежий образец и через 10 дней после изготовления.

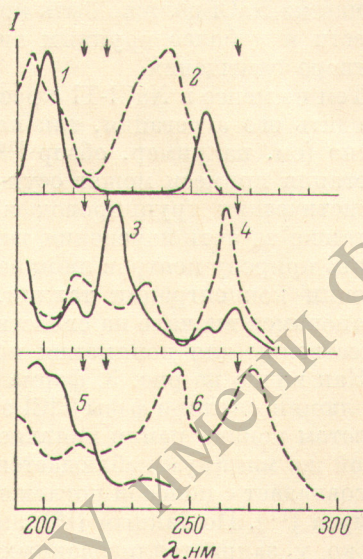


Рис. 4. Спектры возбуждения при 90° К для полос люминесценции NaCl-Tl.

1 — 288, 2—6 — 375, 355, 395, ~440 и 600 нм.

2'), которая исчезает при хранении образцов. Она сильно перекрыта с другими полосами фосфора и с полосой фазы, и выяснить точно ее положение и спектр ее возбуждения не удалось.

При обсуждении природы центров, возникающих в NaCl-Tl с ростом концентрации таллия, прежде всего нужно иметь в виду, что у многих щелочных галогенидов, активированных таллием, индием и галлием, увеличение концентрации активатора приводит к появлению полос, которые могут быть отнесены к парным активаторным центрам $(Me^+)_2$. Замечено [13], что энергетические расстояния между максимумами полос поглощения основных центров и соответствующих полос парных центров для данного активатора поразительно мало меняются при замене аниона основания. Поэтому из данных о спектрах парных центров NaJ-Tl [14] можно оценить вероятное положение полос парных центров NaCl-Tl. Оно отмечено на рис. 4 стрелками, расположенными около 214, 222 и 265 нм. Как видно из рис. 4, только полосы возбуждения люминесценции 355 нм лежат в той же области, где можно ожидать полосы парных центров. Мы попытались исследовать зависимость интенсивности полосы 355 нм от концентрации активатора. Поскольку при концентрациях выше 10^{-2} мол. % хлористый таллий выделяется в виде собственной фазы, пришлось ограничиться сравнительно узкой областью концентраций $(7-17) \times 10^{-3}$ мол. %. Измерения проводились на мелкокристаллических образцах, полученных из кипящих растворов. Роль рассеяния, по-видимому,

можно считать незначительной, так как концентрация таллия достаточно велика, и свет поглощается в поверхностном слое образцов. Оказалось, что интенсивность полосы 355 нм при возбуждении 225, 257 и 267 нм растет пропорционально концентрации таллия, тогда как для полосы парных центров следует ожидать квадратичной зависимости. Таким образом, ни один из спектров, приведенных на рис. 4, не может быть надежно сопоставлен парным центрам. По-видимому, в фосфоре NaCl-Tl устойчивые парные центры не образуются в заметном количестве. Возможно, это связано с плохой растворимостью таллия в NaCl. Такое предположение в данном случае кажется оправданным, поскольку размер иона Tl^+ (1.44 Å) значительно превышает размер иона Na^+ (0.98 Å), и близкое соседство двух ионов Tl^+ в решетке NaCl должно быть крайне невыгодным. Эти соображения можно отнести и к более крупным агрегатам ионов Tl^+ в регулярном твердом растворе замещения.

Тем не менее в NaCl-Tl с ростом концентрации активатора должна происходить его агрегация, так как наблюдается выделение фазы TlCl. Известно (см. например, обзор [15]), что предшествующая выделению фазы агрегация примеси может осуществляться не только за счет образования статистических группировок ионов, изоморфно встроенных в решетку, но также за счет изменения типа встройки примеси. Мы попытались обсудить природу центров люминесценции, возникающих в NaCl-Tl при увеличении концентрации таллия, основываясь на таких представлениях. Остановимся вначале на свойствах люминесценции фазы TlCl, так как они существенны для понимания природы остальных центров.

Как видно из рис. 3, форма длинноволнового края спектра возбуждения люминесценции фазы TlCl зависит от концентрации таллия в фосфоре. С ростом концентрации появляется минимум возбуждения вблизи 362 нм. Такой же минимум наблюдается в спектре возбуждения чистого TlCl [16]. Он совпадает с полосой поглощения TlCl, приписанной экситону большого радиуса [17]. По данным [18], экситонная полоса поглощения наблюдается только у закристаллизованных образцов TlCl и исчезает при переходе к аморфному состоянию. Аналогичные изменения в спектрах возбуждения люминесценции фазы в фосфоре NaCl-Tl на рис. 3 (кривые 2—5), по-видимому, означают, что при больших концентрациях таллия в образце преобладают закристаллизованные частицы фазы, а при малых концентрациях аморфный хлористый таллий. Его кристаллизация происходит со временем. Так, в спектре рис. 3 минимум, соответствующий экситонному пику, виден через десять дней после изготовления образца. Длительное хранение образцов NaCl-Tl, содержащих фазу TlCl, приводит к падению интенсивности ее люминесценции, что, по-видимому, является результатом дальнейшего укрупнения частиц TlCl.

Процессы кристаллизации и укрупнения частиц фазы не оказывают заметного влияния на интенсивность свечения фосфора в полосах 355, 395 и 600 нм. Это позволяет заключить, что центры, ответственные за эти полосы, не являются зародышами фазы. Неустойчива во времени только полоса «440» нм. Можно предположить, что она принадлежит микророзародышам фазы TlCl. Спектр возбуждения полосы «440» нм лежит главным образом в области длин волн, меньших 225 нм, где у TlCl имеются сильные полосы поглощения [18].

Полосы 355 и 395 нм возникают в спектрах кристаллов, выросших из растворов в течение месяца, если концентрация таллия в исходном растворе приближается к насыщению. Одновременно наблюдается резкое увеличение содержания таллия в образце. Так, при возрастании концентрации TlCl в исходном растворе вдвое (от 10^{-3} до $2 \cdot 10^{-3}$ M) концентрация таллия в фосфоре растет в 100 раз (от $9 \cdot 10^{-5}$ до $9 \cdot 10^{-3}$ мол. %). При этом полоса излучения 375 нм, существующая при меньших концентрациях таллия в растворе, практически полностью заменяется полосами 355 и 395 нм. Если кристаллы формируются очень медленно (около года), то из растворов, даже более богатых таллием, в образец входит не более 10^{-4} мол. % TlCl, а в спектре, кроме полосы основных центров, наблюдается только по-

лоса 375 нм. Полоса 600 нм развивается при концентрациях таллия в фосфоре, больших 10^{-2} мол.%, что превышает предел смешиваемости $TlCl$ и $NaCl$.

По-видимому, эти факты указывают, что появление полос 355, 395 и 600 нм связано с таким захватом активатора в кристалл, который становится возможным только в результате локального пересыщения таллием прилегающих к растущему кристаллу областей жидкой фазы. Аналогичный захват примеси легко представить также при кристаллизации фосфора из расплава. Создание локального пересыщения примеси в жидкой фазе способствует ее встройке по типу аномального смешанного кристалла. Можно предположить, что активатор захватывается в виде двухмерных встроок $TlCl$ или микровключений двойных солей типа $nNaCl-mTlCl$. Образование двухмерных встроок активаторной соли рассматривается в работах Шамовского и сотрудников (например, [19]). Из их данных следует, что возникновение таких встроок наиболее вероятно в системах с малой растворимостью активатора, к которым принадлежит и $NaCl-Tl$. Возможность образования двойных солей не следует исключать потому, что в водных растворах и расплавах щелочно-галогидных солей таллий образует галогидные комплексы. Устойчивые двойные соли в системе $NaCl-TlCl$ не обнаружены. Однако известно, что неустойчивые комплексные соли могут стабилизироваться, если они существуют в виде примеси в кристалле основного компонента. Примеры подобных систем описаны в [20, 21].

Полоса 375 нм наблюдается при концентрациях таллия в образце, меньших 10^{-3} мол.%, и только в спектре кристаллов, полученных очень медленной кристаллизацией. В таких условиях в растворе не создается пересыщения, достаточного для образования центров, ответственных за полосы 355, 395 и 600 нм. Как видно из рис. 5, полосы возбуждения люминесценции 375 нм (кривая 1) лежат в той же области, где, согласно [12], возбуждается люминесценция молекул $TlCl$ и комплексов $TlCl_2$, адсорбированных на хроматографическую бумагу из водных растворов $TlCl+NaCl$ (10^{-4} M $TlCl+1$ M $NaCl$ — кривая 2, 10^{-4} M $TlCl+4$ M $NaCl$ — кривая 3). Похожий спектр возбуждения имеет и полоса 350 нм, приписанная нами комплексам таллия, расположенным вблизи поверхности нарушенных кристаллов $NaCl-Tl$ (рис. 5, кривая 4). Можно предположить, что полоса 375 нм принадлежит комплексам или молекулам активатора, захваченным на дефектах роста кристалла. Не исключено, что частицы примеси образуют группировки, так как полоса 375 нм наблюдается только при охлаждении образца.

Таким образом, результаты работы приводят к выводу, что возникновение различных полос в спектре люминесценции фосфора $NaCl-Tl$ связано с изменением типа встройки таллия. Разные типы встройки активатора обладают различной устойчивостью по отношению к механическому воздействию на кристалл. Наименее устойчивы центры, возникающие при малых концентрациях активатора — основные центры и центры полосы 355 нм, которые разрушаются при растирании образца.

Литература

- [1] Л. И. Тарасова, Н. И. Иванова, А. А. Соловьева. Изв. АН СССР, сер. физ., 33, 996, 1969.
- [2] R. Hilsch. Z. Phys., 44, 860, 1927.
- [3] W. Meyer. Z. Phys., 61, 321, 1930.
- [4] A. Fukuda. Sci. of Light (Japan), 13, 64, 1964.

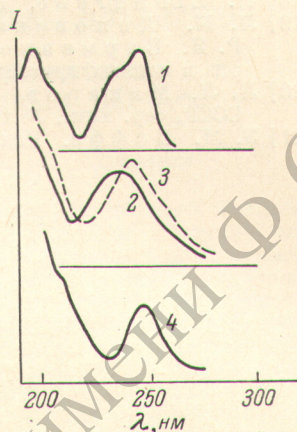


Рис. 5.
Пояснения в тексте.

- [5] Н. И. Иванова. Изв. АН СССР, сер. физ., 15, 748, 1951.
[6] Ф. Д. Клемент, Р. И. Гиндина. Тр. ИФА АН ЭССР, № 4, 3, 1956.
[7] Т. А. Абдусадыхов. Тр. ИФА АН ЭССР, № 10, 97, 1959.
[8] Н. Е. Луцки. Тр. ИФА АН ЭССР, № 10, 68, 1959.
[9] W. E. Spicer. Phys. Rev., 106, 726, 1956.
[10] J. Doleuši, A. Bohun. Z. Naturforsch., 16a, 891, 1961.
[11] И. В. Мелихов, Цю Сяо-Си, М. С. Меркулова. Радиохимия, 2, 144, 1960.
[12] А. П. Жуковский, Н. И. Иванова. Опт. и спектр., 22, 254, 1967.
[13] T. Tsuboi. J. Phys. Soc. Japan, 29, 1303, 1970.
[14] E. Matsui. J. Phys. Soc. Japan, 22, 819, 1967.
[15] Н. И. Иванова, Л. И. Тарасова. Сб. «Успехи фотоники», вып. 3. Изд. ЛГУ, 1974.
[16] В. А. Соколов. Автореф. канд. дисс., Л., 1963.
[17] K. Kobayashi, J. Morita, T. Kawai, M. Kanada, S. Kurita. Techn. Rept. ISSR, ser. A, № 363, 1969.
[18] H. Zinngrebe. Zs. Phys., 154, 495, 1959.
[19] Л. М. Шамовский, В. Т. Дубинчук, Л. М. Родионова, Р. Я. Барменкова. Сб. «Закономерности распределения примесных центров в ионных кристаллах», вып. 2, стр. 22, ВИМС, М., 1974.
[20] Л. Л. Макаров, В. Н. Малышев, В. И. Изотов. Изв. СО АН СССР, сер. хим., № 11, 4, 1965.
[21] Э. М. Иоффе. Радиохимия, 5, 135, 1963.

Поступило в Редакцию 24 октября 1972 г.