

ТУННЕЛЬНАЯ И ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННАЯ
ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КРИСТАЛЛОВ NaJ И NaCl

Д. Э. Аболтынь и В. Г. Плеханов

С целью изучения природы донорно-акцепторных пар, ответственных за туннельную люминесценцию кристаллов NaJ и NaCl при гелиевых температурах, исследованы спектры рентгенолюминесценции, фотолюминесценции, туннельной люминесценции, термостимулированной люминесценции и влияние фото- и термостимуляций на туннельную люминесценцию.

В течение последнего десятилетия внимание исследователей сосредоточено на процессах образования радиационных дефектов низкоэнергетическими электронными возбуждениями [1]. Важным успехом в этом направлении является выяснение исключительной роли *F*- и *H*-центров в качестве первичных дефектов, достигнутое с помощью техники транзитного поглощения [2]. Однако прослеживание дальнейшего развития образования множества известных дефектов в зависимости от внешних условий и специфических свойств конкретных кристаллов вряд ли возможно посредством измерения одного лишь наведенного поглощения. Более эффективными (например, по чувствительности) являются люминесцентные методы, в том числе давно известный метод термостимулированной люминесценции (ТСЛ) для надбарьерных процессов и получивший развитие в течение последних лет метод туннельной спектроскопии (исследуется последействие образцов, охлажденных до температуры, исключающей возможность термоионизации изучаемых центров) для подбарьерных процессов преобразования и рекомбинации дефектов. В частности, эти методы хорошо себя зарекомендовали в недавней работе коллектива авторов под руководством Луцки и Витола [3], в которой были получены новые данные о распаде *I*- и *H*-центров в кристаллах KBr и KCl.

Настоящая работа, являясь продолжением работ [3, 4], посвящена изучению природы донорно-акцепторных пар, ответственных за туннельную люминесценцию кристаллов NaJ и NaCl в интервале гелиевых температур, и установлению механизмов их образования и рекомбинации. Для решения этой задачи исследовались спектры рентгенолюминесценции (РЛ), фотолюминесценции (ФЛ) и туннельной люминесценции (ТЛ), а также влияние фото- и термостимуляций на ТЛ, кривые термовысвечивания и спектры ТСЛ. При этом впервые получены кривые термовысвечивания кристаллов NaJ и NaCl в интервале гелиевых температур и установлена природа взаимодействующих дефектов. Обнаружено, что различия экситон-фононного взаимодействия в NaJ и NaCl существенно отражаются на выходе распада электронных возбуждений уже на этапе образования первичных дефектов.

Методика эксперимента

Исследовались кристаллы NaJ, выращенные методом многократной зонной плавки из специально очищенного сырья и NaCl различного происхождения (выращенные методами зонной плавки, Стокбаргера в азотной атмосфере, натуральные).

Образцы (размерами $10 \times 10 \times 1$ мм) выкалывались из монокристаллического блока непосредственно перед экспериментом и с соблюдением необходимых мер предосторожности против окисления (прогрев, азотная атмосфера) монтировались на медный держатель и погружались в иммерсионный гелиевый криостат.

Возбуждение образцов осуществлялось либо рентгеновскими лучами от трубки БСВ2-*W* (45 кВ, 14 мА) через бериллиевое окно толщиной 1 мм, либо ультрафиолетовым светом (5.55—5.95 эВ) от лампы ДДС-400 через двойной монохроматор ДМР-4 со спектральной шириной щелей 0.025 эВ и кварцевые окна криостата.

Фотостимуляция люминесценции производилась от лампы накаливания через монохроматор УМ-2 или через соответствующие наборы фильтров.

Измерения интенсивности люминесценции проводились одновременно в двух взаимно перпендикулярных направлениях (несовпадающих с направлением возбуждающего пучка) высокочувствительным счетчиком фото-

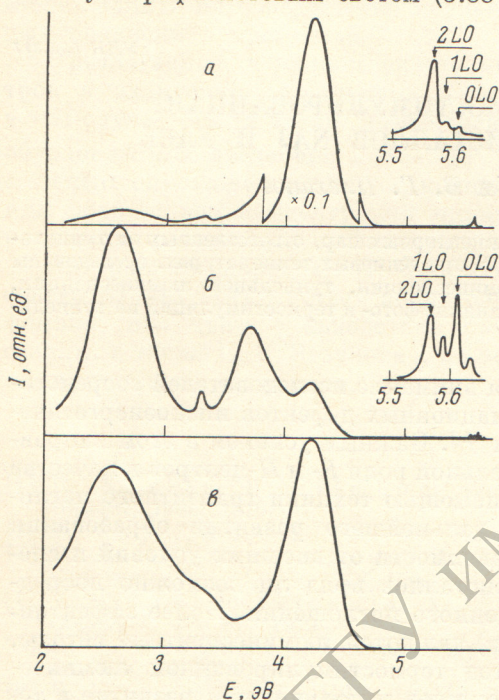


Рис. 1. Спектры РЛ (а), ФЛ при возбуждении квантами света с энергией 5.55 эВ (б) и ТЛ после рентгеновского возбуждения (в) кристалла NaI при 4.2 К.

тонов (охлаждаемый ФЭУ-106) через кварцевые окна криостата и другой монохроматор ДМР-4 (монохроматический тракт) и фотоэлектронным множителем ФЭУ-39 в токовом режиме (интегральный тракт).

Спектры люминесценции, приведенные в настоящей работе, не скорректированы на спектральные характеристики измерительных трактов.

Скорость нагрева при измерении ТСЛ составляла 0.5 К/мин. Температура образца контролировалась по вмонтированным в держатель датчикам (угольные и свинцовые резисторы).

Результаты эксперимента

Спектры люминесценции. На рис. 1 представлены типичные спектры РЛ, ФЛ и ТЛ кристалла NaI, измеренные при 4.2 К. На вставках рис. 1, а и б в более крупном масштабе показаны спектры люминесценции свободных экситонов, зонный характер которой доказан в работе [5]. Все наблюдаемые в условиях стационарного возбуждения полосы люминесценции с максимумами 2.6, 3.3, 3.7 и 4.2 эВ (соотношение интенсивностей их зависит от энергии возбуждающих квантов и температуры образца) известны и интерпретировались в более ранних работах [6, 7]. В настоящей работе внимание сосредотачивалось в основном на полосе 4.2 эВ, представляющей собой триpletное излучение автолокализованных экситонов (АЭ). Это излучение является доминирующим по интенсивности в спектре туннельного послесвечения (рис. 1, в) в интервале гелиевых температур и эффективно стимулируется подсветкой возбужденного кристалла в F - и F' -полосах поглощения.

Полоса с максимумом 2.6 эВ, которая доминирует в спектре ФЛ при возбуждении кристалла в экситонной полосе поглощения (рис. 1, б), в ТЛ при 4.2 К всегда (независимо от энергии возбуждающих квантов) является второй по интенсивности (рис. 1, в) и подсветкой в F - и F' -полосах поглощения не стимулируется. Длительная или интенсивная F -подсветка полосу тушит полностью.

Отмечаем, что: 1) в спектре ТЛ отсутствует полоса с максимумом 3.7 эВ, которая, по [7], появляется только при локализации свободных экситонов;¹ 2) полосы излучения ТЛ несколько уширены по сравнению со спек-

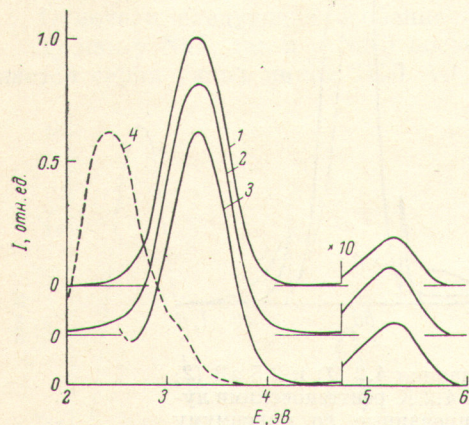


Рис. 2. Спектры РЛ (1), ТЛ после рентгеновского возбуждения (2), ФЛ во время стимуляции светом с энергией квантов 2.0 эВ после рентгеновского возбуждения (3) и ТЛ после обесцвечивания через фильтры ЖС4+ОС14 (4) кристалла NaCl при 4.2 К.

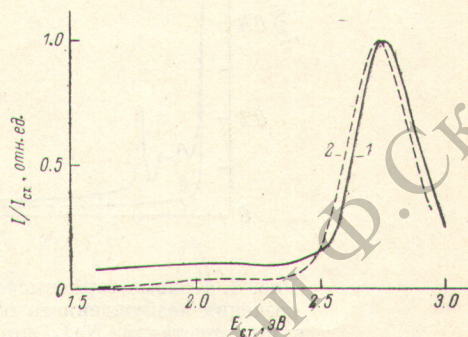


Рис. 3. Спектры фотостимуляции триплетного излучения АЭ с энергией 3.35 эВ возбужденного рентгеновскими лучами кристалла NaCl при 4.2 (1) и 77 К (2), нормированные по максимуму отношения интенсивностей стимулированного I и стимулирующего $I_{ст}$ света.

трами РЛ и ФЛ, что может быть следствием кулоновского взаимодействия между донорными и акцепторными центрами [8].

Рис. 2 демонстрирует спектры РЛ и ТЛ (кривые 1 и 2 соответственно) кристалла NaCl при 4.2 К, содержащие лишь две известные полосы триплетного и синглетного излучений АЭ с максимумами 3.35 и 5.35 эВ соответственно. (Малую интенсивность и небольшой сдвиг синглетной полосы в длинноволновую сторону на рис. 2 следует отнести к спаду чувствительности измерительного тракта в далеком ультрафиолете). Как и в случае NaJ, полосы ТЛ несколько уширены по сравнению со случаем стационарного возбуждения и эффективно стимулируются подсветкой в F - и F' -полосах поглощения. (Спектры стимуляции триплетного излучения представлены на рис. 3).²

Спектр люминесценции во время такой стимуляции (кривая 3 на рис. 2) отличается от спектров РЛ и ТЛ лишь промежуточными значениями полупрозрачности полос. Но, как это было установлено нами уже ранее [4], продолжительные подсветки в F - и F' -полосах поглощения приводят к различным последствиям. Если длительная (или интенсивная) F -подсветка безвозвратно тушит всю люминесценцию в исследованном спектральном интервале, то такая же F' -подсветка, кроме тушения излучения АЭ, приводит к появлению в спектре послесвечения новой полосы с максимумом около

¹ По неопубликованным еще данным Берзини и Интенберга (частное сообщение), поляризованное излучение при 3.7 эВ появляется при рекомбинации электронов с предварительно ориентированными H -центрами.

² Подобные спектры стимуляции излучения АЭ для кристаллов KJ уже в 1970 г. были получены Кинком и Лийдья [9].

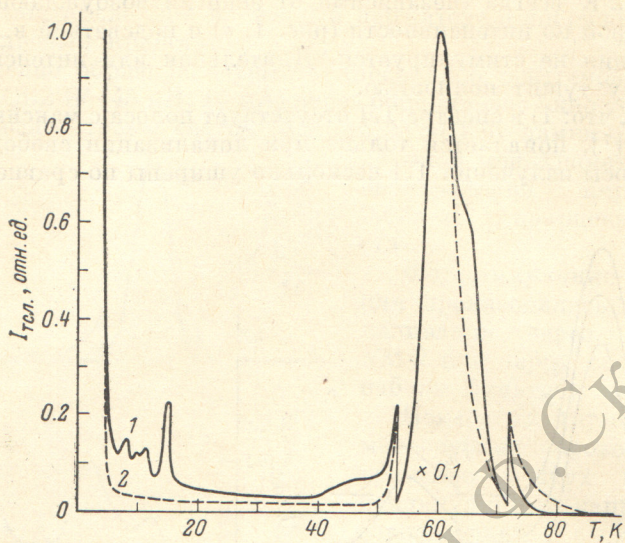


Рис. 4. Кривые термовысвечивания 4.2 (1) и 2.5 эВ (2) свечения возбужденного при 4.2 К рентгеновскими лучами кристалла NaI, нормированные по максимуму интенсивности в V_K -пике ТЛ.

Крутой спад интенсивности около 5 К соответствует затуханию ТЛ после возбуждения.

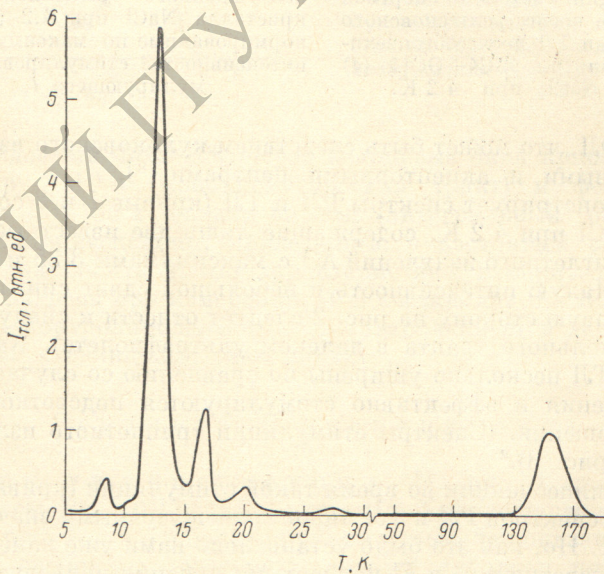


Рис. 5. Кривая термовысвечивания 3.35 эВ свечения возбужденного при 4.2 К рентгеновскими лучами кристалла NaCl.

2.4 эВ (кривая 4 на рис. 2). В последнем случае излучение АЭ может быть восстановлено либо слабой *F*-подсветкой (при этом полоса с максимумом 2.4 эВ исчезает), либо нагревом образца до ближайшего пика ТСЛ.

Кинетика и спектры ТСЛ

Кривые термовысвечивания кристаллов NaJ и NaCl, возбужденных рентгеновскими лучами при температуре жидкого гелия, представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

Спектры ТСЛ в разных интервалах температуры показаны на рис. 6 и 7.

Отмечаем следующие особенности кривых термовысвечивания:

1) как у NaJ, так и у NaCl после рентгеновского возбуждения наблюдается серия узких пиков ТСЛ АЭ в интервале 8—30 К (8.2, 10.1, 11.5,

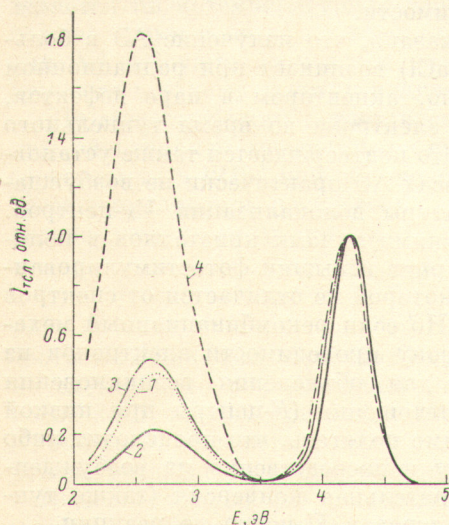


Рис. 6. Спектры ТСЛ возбужденного при 4.2 К рентгеновскими лучами кристалла NaJ при температурах 4.5 (1), 15 (2), 45 (3) и 60 К (4), нормированные на интенсивность свечения при 4.2 эВ.

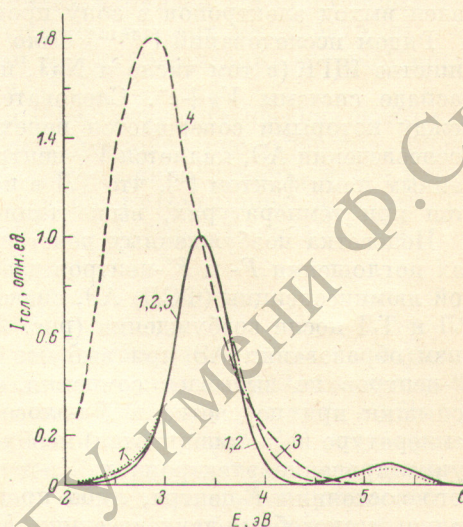


Рис. 7. Спектры ТСЛ возбужденного при 4.2 К рентгеновскими лучами кристалла NaCl при температурах 4.5 (1), 8—20 (2), 27.5 (3) и 150 К (4), нормированные на интенсивность свечения при 3.35 эВ.

14.8 К у NaJ; 8.4, 12.6, 16.7, 19.9 и 27.3 К у NaCl), отсутствующая на кривой термовысвечивания полосы 2.6 эВ у NaJ (кривая 2 на рис. 4);

2) после низкотемпературной серии пиков у обоих кристаллов начинается широкая, относительно «темная» область, в которой не удается выявить какую-либо структуру на фоне слабого, постепенно угасающего свечения (возможно, что остаточное свечение в этом интервале имеет чисто туннельную природу, ибо при фракционном термовысвечивании было обнаружено, что потухшая до того туннельная люминесценция АЭ восстанавливается каждый раз после захода в температурную область выше температуры предыдущего захода);

3) около 60 К у NaJ во всем исследованном участке спектра наблюдается сильный, явно неэлементарный пик ТСЛ, который, по данным работы [10], сопоставляется с температурным интервалом делокализации V_K -центров;

4) у NaCl «темная» область простирается вплоть до широкого и сравнительно невысокого V_K пика [11] при 150 К, во время которого спектр излучения имеет сложный и зависящий от происхождения образца вид;

5) после фотовозбуждения NaJ в экситонной полосе поглощения на кривой термовысвечивания не удалось обнаружить низкотемпературную серию пиков;

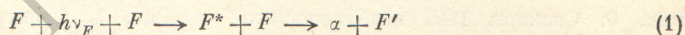
б) ТСЛ отсутствует при нагреве предварительно обесцвеченных F-светом кристаллов.

Обсуждение результатов

Природа дефектов, ответственных за ТЛ. Из рис. 1, 2, 6, 7 видно, что излучение АЭ у кристаллов NaJ и NaCl наблюдается не только во время возбуждения, но и в туннельном послесвечении, и оно стимулируется как оптически, так и термически. Это хорошо согласуется с существующими представлениями о прямом и рекомбинационном образовании АЭ в щелочно-галогидных кристаллах (ЩГК). Более того наличие полос АЭ в спектрах ТЛ при температуре жидкого гелия свидетельствует, что для создания АЭ рекомбинационным путем даже необязателен выход электронов в зону проводимости.

Рядом исследований [10-12] было доказано, что излучение АЭ в большинстве ЩГК (в том числе и NaJ, и NaCl) возникает при радиационном распаде системы $V_K + e^-$. Следовательно, акцептором в паре дефектов, между которыми совершается переход электрона во время туннельного послесвечения АЭ, является V_K -центр. Это подтверждается также установленным нами фактом [4], что ТЛ в полосах АЭ практически не возбуждается при температурах, выше температуры делокализации V_K -центров.

Подсветка возбужденных рентгеновскими лучами кристаллов в полосах поглощения F - и F' -центров дает яркие вспышки фотостимулированной люминесценции (ФСЛ) АЭ, спектр которой не отличается от спектров РЛ и ТЛ после возбуждения (рис. 2). Но если рекомбинационный механизм образования АЭ при выбросе в зону проводимости электронов из F' -центров не вызывает сомнения, то для объяснения возникновения вспышки при подсветке в F -полосе поглощения (F -центры при низкой температуре не ионизируются) необходимо полагать, что происходит либо туннелирование электрона к V_K -центру непосредственно из возбужденного состояния F -центра, либо предварительная конверсия (также туннельным способом) двух соседних F -центров в F' -центр по реакции



с последующей ионизацией вновь образованного F' -центра. Реализация туннельной конверсии (1) в ЩГК при низкой температуре неоднократно наблюдалась экспериментально [13, 14]. В пользу последнего механизма говорит также факт, что после выключения подсветки наблюдается усиленная ТЛ такого же спектрального состава, как и после первоначального возбуждения кристалла.³ С другой стороны, из этого же факта следует заключение, что донорным центром туннельной пары, по-видимому, является F' -центр. Такое заключение подтверждается еще следующими наблюдениями:

- 1) слабая F' -подсветка усиливает ТЛ АЭ (путем «пересадки» электронов на F -центры, расположенные ближе к V_K -центрам);
- 2) сильная F' -подсветка полностью тушит ТЛ АЭ (уничтожаются все F' -центры);
- 3) F -подсветка восстанавливает потухшую ТЛ АЭ (создаются новые F' -центры).

Совсем другой, по-видимому, механизм ответствен за возникновение ТЛ в полосе 2.6 эВ у NaJ. Это излучение весьма эффективно стимулируется термически в интервале V_K пика ТСЛ (рис. 4 и 6). Следовательно, акцептором и в данном случае является V_K -центр. Но отсутствие вспышек ФСЛ в полосе 2.6 эВ при F - и F' -подсветках, как и нечувствительность полосы

³ Во время фотостимуляции идет, по-видимому, не только прямое рекомбинационное (через зону проводимости), но и интенсивное туннельное создание АЭ, о чем свидетельствует среднее между РЛ и ТЛ значение полуширин полос ФСЛ.

к нагреву кристалла вплоть до температур делокализации V_K -центров, указывает, что электрон, туннелирующий к V_K -центру, стартует с глубоко расположенного уровня. Тупение же люминесценции при продолжительной F -подсветке свидетельствует, что этот уровень соответствует основному состоянию F -центра.

Таким образом, приходим к выводу, что полоса послесвечения с максимумом 2.6 эВ у кристаллов NaJ возникает вследствие туннельной рекомбинации между основными состояниями F - и V_K -центров. Такое заключение подтверждается наличием аналогично расположенных $F-V_K$ -полос у кристаллов KBr, KCl [18] и NaCl [4].

ТСЛ и образование дефектов в NaJ и NaCl. На кривых термовысвечивания кристаллов NaJ и NaCl, возбужденных рентгеновскими лучами при 4.2 К (рис. 4, 5), кроме известных V_K пиков ТСЛ, выделяется низкотемпературная серия узких и близко расположенных пиков, во время и после которых наблюдается все тот же спектр излучения АЭ. Обсудим возможные реакции между дефектами, которые могут привести к такому спектру излучения.

По существующим представлениям [1] низкоэнергетические возбуждения электронной подсистемы (экситоны и электронно-дырочные пары), создаваемые в ЩГК при облучении рентгеновскими лучами, могут в процессе термализации распастись с образованием структурных дефектов, согласно известным реакциям Пуули [15] и Херша—Витола [16, 17],



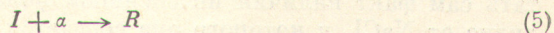
соответственно, или образовать V_K -центры, если дырка автолокализуется, но электрон до рекомбинации захватывается ловушкой. Следовательно, после возбуждения кристалла имеем в нем набор центров α , I , F , H , V_K . Кроме того, если верны наши рассуждения о механизме ТЛ АЭ в предыдущем разделе, то существование интенсивного и длительного туннельного послесвечения АЭ непосредственно после возбуждения указывает на наличие также некоторого количества F' -центров, образующихся, по-видимому, при захвате электронов F -центрами.

Фракционное термовысвечивание NaCl показало, что туннельная люминесценция АЭ восстанавливается каждый раз после прохождения очередного пика ТСЛ низкотемпературной серии даже после предварительного обесцвечивания кристалла F' -светом. Следовательно, во вторичной реакции, проявлением которой являются эти пики, возникают новые F' -центры. Это скорее всего возможно при реакции



в результате которой восстанавливается регулярный узел решетки R и высвобождается электрон, который либо прямо рекомбинирует с одним из V_K -центров (интенсивное свечение АЭ в пике ТСЛ), либо локализуется на другом F -центре, образуя новый F' -центр и обеспечивая тем самым восстановление ТЛ.

Другие возможные реакции



по-видимому, восстанавливают регулярную решетку безызлучательно, о чем свидетельствуют отсутствие ТСЛ и термостимулированной ТЛ после предварительного обесцвечивания кристалла F -светом и тщательные попытки обнаружить свечение, сопровождающее $F-H$ -рекомбинацию [3, 18].

Таким образом, приходим к заключению, что низкотемпературные пики ТСЛ связаны с делокализацией I -центров и их рекомбинацией с F -центрами. «Мультиплетность» пиков, по-видимому, отражает многостадийный

характер рекомбинации взаимно по-разному расположенных I - и F -центров.

Значения энергии активации, определенные при фракционном высвечивании кристалла NaCl методом начального прироста, составляют 12.3, 30.6, 45.1, 56.4 и 61.4 мэВ для пиков с максимумами 8.4, 12.6, 16.7, 19.9 и 27.3 К соответственно и представляются разумными при сравнении с аналогичными оценками для KBr и KCl (см. сводную таблицу в [3]).

Исключением, может быть, является отдельно стоящий небольшой пик при 27.3 К у NaCl, перед которым не было произведено обесцвечивание кристалла F' -светом. Возможно, что он появляется в результате реакции



т. е. является H -пиком. Характерно, что именно в интервале этого пика в спектре ТСЛ (кривая 3 на рис. 7) появляется коротковолновое крыло у полосы 3.35 эВ.

Кратко остановимся еще на одном интересном различии в кривых термовысвечивания NaCl и NaJ.

Выше уже отмечалось, что после фотовозбуждения кристалла NaJ в экситонной полосе поглощения не удалось обнаружить низкотемпературную серию пиков ТСЛ. При сравнении рис. 4 и 5 видно, что и после рентгеновского возбуждения предполагаемые I -пики у NaJ выражены слабее по сравнению с NaCl, в то время как для V_K -пиков соотношение обратное.

Такие соотношения интенсивностей I - и V_K -пиков могут быть объяснены наличием известного низкотемпературного тушения излучения при 4.2 эВ у NaJ [6], с одной стороны, и более сильным температурным тушением излучения АЭ в интервале V_K -пика у NaCl [11], с другой стороны. Однако примерно такое же соотношение интенсивностей V_K -пиков NaJ и NaCl наблюдается и в интегральных кривых термовысвечивания. Вряд ли разумно при этом считать, что температурное тушение излучения одинаково при рекомбинации V_K -центров с различными электронными центрами. Кроме того, высокая интенсивность ТЛ NaJ после возбуждения, как и проведенный нами анализ кинетик затухания ТЛ NaJ и NaCl (готовится к печати), указывает, что, действительно, при тех же условиях возбуждения в NaJ образуется больше V_K -центров, чем в NaCl.⁴

Объяснение этого факта кроется, на наш взгляд, в том фундаментальном различии между NaJ и NaCl, что в NaJ между состояниями свободного экситона и АЭ имеется энергетический барьер, которого нет в NaCl. Следовательно, время жизни до автолокализации у свободного экситона в NaJ больше, и поэтому больше и вероятность диссоциации его на электронно-дырочную пару при рассеянии на существующих в кристалле структурных дефектах (например, α -центрах). Ясно, что в итоге это должно привести к преимущественному образованию V_K -центров за счет создания дефектов (в том числе J -центров) по реакциям (2) и (3). Возможно, именно в одно-временном существовании нескольких эффективных каналов распада возбуждений причина сложного закона накопления F -центров в иодидах, наблюдаемого в экспериментах по транзитному поглощению [19].

Косвенным подтверждением предлагаемого объяснения можно считать сам факт наличия интенсивной полосы ТЛ $F-V_K$ -пар у NaJ в отличие от NaCl, у которого она создается с трудом, а также высокую интенсивность этого свечения во время возбуждения именно в экситонной полосе поглощения (идет интенсивная рекомбинация близких $F-V_K$ -пар).

Для количественной оценки эффективности различных механизмов дефектообразования требуется, по-видимому, сочетание люминесцентных и абсорбционных измерений.

⁴ В принципе, возможны изменения баланса V_K -центров еще до V_K -пика ТСЛ вследствие вторичных реакций типа $I + V_K \rightarrow H$ и $H + \alpha \rightarrow V_K$. Однако отсутствие заметных H -пиков ТСЛ указывает, что вряд ли они играют существенную роль в данном случае.

В итоге настоящей работы установлено, что:

- 1) у кристаллов NaJ и NaCl в интервале гелиевых температур наблюдается интенсивное послесвечение АЭ, которое возникает в результате туннельной рекомбинации электронов из F' -центров с V_K -центрами;
- 2) интенсивное в этом же температурном интервале послесвечение кристаллов NaJ в видимой области спектра (полоса с максимумом 2.6 эВ) обусловлено туннельными переходами электронов между основными состояниями F - и V_K -центров;
- 3) при нагреве возбужденных рентгеновскими лучами кристаллов NaJ и NaCl в интервале температуры 8—30 К наблюдается серия пиков ТСЛ АЭ, которая возникает в результате делокализации I -центров и их рекомбинации с F -центрами;
- 4) затрудненная по сравнению с NaCl автолокализация экситонов в NaJ приводит к понижению эффективности радиационного образования в нем френкелевских дефектов.

Литература

- [1] Ч. Б. Лущик, И. К. Витол, М. А. Эланго. Усп. физ. наук, *12*, 223, 1977.
- [2] M. N. Kabler, R. T. Williams. Phys. Rev., *B18*, 1948, 1978.
- [3] D. E. Aboltn, V. J. Grabovskis, A. R. Kangro, Ch. Lushchik, A. A. O'Connell-Bronin, I. K. Vitols, V. E. Zigar. Phys. Stat. Sol. (a), *47*, 667, 1978.
- [4] Д. Э. Аболтынъ. Электронные и ионные процессы в ионных кристаллах. Межвуз. сб. научн. трудов, *7*, 57, Рига, 1979.
- [5] А. А. О'Коннель-Бронин, В. Г. Плеханов. ФТТ, *21*, 602, 1979.
- [6] M. P. Fontana, H. Blume, W. J. van Sciver. Phys. Stat. Sol., *29*, 159, 1968.
- [7] H. Nishimura, T. Kubota, M. Tomura. J. Phys. Soc. Japan, *42*, 175, 1977.
- [8] F. E. Williams. Phys. Stat. Sol., *25*, 493, 1968.
- [9] R. Kink, G. Liidja. Phys. Stat. Sol., *40*, 379, 1970.
- [10] R. B. Murray, F. J. Keller. Phys. Rev., *153*, 993, 1967.
- [11] R. B. Murray, H. B. Dietrich, F. J. Keller. J. Phys. Chem. Solids, *31*, 1185, 1970.
- [12] M. N. Kabler. Phys. Rev., *A136*, 1206, 1964.
- [13] М. Экабер, Р. А. Шнэгг, И. Рэдин, М. А. Эдерта, С. Жаккар. Изв. АН СССР, сер. физ., *37*, 696, 1973.
- [14] F. Porret, F. Lüty. Phys. Rev. Lett., *26*, 843, 1971.
- [15] D. Pooley. Sol. St. Comm., *3*, 241, 1965.
- [16] H. N. Hersch. Phys. Rev., *143*, 928, 1966.
- [17] И. К. Витол. Изв. АН СССР, сер. физ., *30*, 564, 1966.
- [18] V. J. Grabovskis, I. K. Vitols. J. Luminescence, *20*, 337, 1979.
- [19] J. D' Hertoghe, G. Jacobs. Phys. Stat. Sol. (b), *95*, 291, 1979.

Поступило в Редакцию 4 марта 1980 г.