

УДК 535.37

© 1992

ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЙ И БЕЗЫЗЛУЧАТЕЛЬНЫЙ РАСПАД ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В КРИСТАЛЛАХ CsCl

К. И. Ибрагимов, А. Ч. Лущик, Ч. Б. Лущик,
А. Г. Фрорин, Н. А. Яансон

Для кристаллов CsCl методами низкотемпературной оптической и термоактивационной спектроскопии изучен излучательный распад электронных возбуждений и обнаружены образующиеся при распаде экситонов анионные дефекты Френкеля (F , H - и I -пары). Обсуждены черты сходства и различия в процессах излучательного и безызлучательного распада автолокализованных экситонов в простых кубических и гранецентрированных кубических щелочно-галоидных кристаллах.

1. Собственные электронные возбуждения и дефекты подробно изучены для гранецентрированных кубических (ГЦК) щелочно-галоидных кристаллов (ЩГК). Для ГЦК ЩГК, в частности, изучены три основных канала распада анионных экситонов: с излучением, с рождением пакета фононов (тепловыделение) и образованием дефектов Френкеля в анионной подрешетке (см., например, [1, 2]). При комнатной температуре и нормальном давлении лишь три ЩГК (CsCl, CsBr и CsI) имеют структуру простых кубических (ПК) кристаллов. В этих кристаллах базис содержит один ион Cs^+ с координатами 000 и один ион галоида с координатами $1/2, 1/2, 1/2$. Особенности электронных возбуждений и дефектов в ПК ЩГК изучены пока (в основном на примере CsBr [1]) явно недостаточно.

Цель настоящего исследования — методами низкотемпературной вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) спектроскопии и термоактивационной спектроскопии выявить особенности электронных возбуждений (ЭВ) и дефектов Френкеля (ДФ) в анионной подрешетке для кристаллов CsCl, не доступных большинству лабораторий из-за трудностей их выращивания. Необходимо было также сопоставить процессы излучательного и безызлучательного распада экситонов в ЩГК с ГЦК и ПК структурами.

2. Полиморфный переход высокотемпературной модификации β -CsCl (ГЦК) в низкотемпературную модификацию α -CsCl (ПК) осуществляется при ~ 740 К. Получение совершенных кристаллов α -CsCl возможно либо при выращивании из водного раствора (300 К) [3], либо из расплава с особой техникой прохождения области полиморфного перехода [4]. Нами была реализована вторая возможность. Для получения кристаллов α -CsCl высокой степени чистоты и совершенства мы воспользовались опытом выращивания ГЦК ЩГК [5] с предварительной осушкой сырья особой чистоты, обработкой расплава соли в потоке хлора (очистка CsCl от ионов Br^- и I^-) и сорокакратной зонной плавкой (глубокая очистка от polyvalentных и других примесных ионов).

Верхнюю, наиболее чистую часть слитка расплавляли и без соприкосновения с атмосферой переливали в кварцевую ампулу, которую затем отплавляли и помещали в специальную печь для выращивания кристалла методом Стокбаргера. При понижении температуры осуществляли кристаллизацию ГЦК CsCl. При

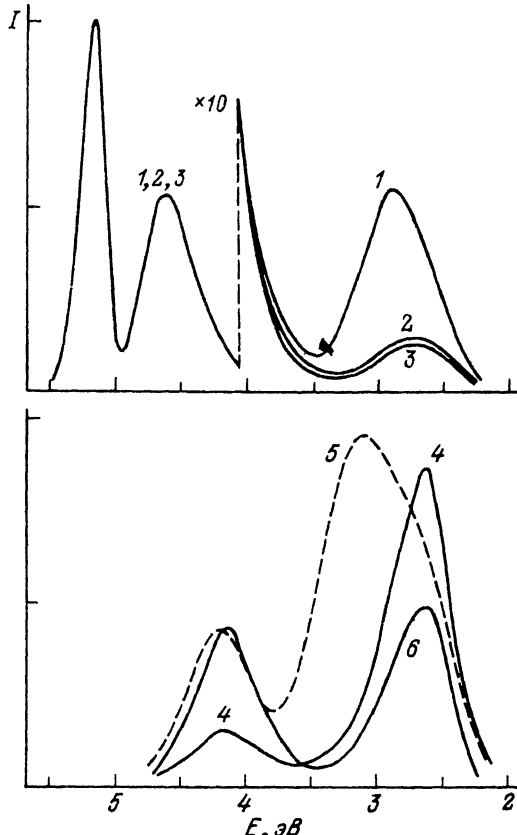


Рис. 1. Спектры рентгенолюминесценции кристалла CsCl-3 при 5 (1), 43 (2), 80 К (3) и спектры туннельной люминесценции CsCl-3, наведенной X-облучением и измеренной при 5 (4), 22 (5) и 43 К (6).

дальнейшем медленном охлаждении в области 770—690 К осуществляли полиморфный переход ГЦК → ПК.

Как показали оценки, полученные нами кристаллы CsCl-3 (как и ГЦК ШГК [5]), содержат изаivalentные примеси OH^- , Br^- , I^- , Li^+ , Na^+ в количестве до 10^{-5} — 10^{-7} молярной доли, а содержание поливалентных примесных ионов не превышало 10^{-7} . В неочищенных кристаллах CsCl-1 содержание Br^- , Na^+ , Ba^{2+} , Sr^{2+} было в десятки раз выше. Необходимость выпиливания и полировки пластинок CsCl размером $15 \times 15 \times 2$ мм вызывала некоторую деформацию кристалла, которую устраняли в некоторых пластинках (CsCl-3A) последующим отжигом при 700 К, что приводило, к сожалению, к загрязнению поверхности ионами натрия.

3. Исследование оптических и термоактивационных характеристик

кристаллов CsCl осуществлено в основном на описанной в [6] установке. Кристалл помещали в вакуумный криостат, позволяющий плавно варьировать температуру в области 5—300 К. Кристалл облучали через бериллиевое окошко рентгеновским излучением установки АРОС (50 кВ, 3 мА, W); через окошко из MgF_2 имелась возможность воздействовать ВУФ радиацией, выделяемой вакуумным монохроматором VMN-3 от дейтериевой лампы ЛДД-2 (50 Вт, окно из MgF_2). Люминесценцию регистрировали через монохроматор МДР-23 фотоумножителем ФЭУ-106, работающим в режиме счета фотонов. Сканирование монохроматоров и регистрация спектров излучения (1.8—6.0 эВ) и возбуждения (4—11 эВ) с внесением в них необходимых поправок осуществляли на базе компьютера РС XT. Термостимулированную люминесценцию облученных кристаллов регистрировали через монохроматор МДР-23 или в интегральном режиме при скорости нагрева 0.05 К/с.

4. Спектры поглощения и отражения тонких пленок CsCl изучены в [7–12]. Нами были подробно изучены низкотемпературные спектры люминесценции кристаллов CsCl (рис. 1, 2). При 5 К в спектрах рентгенолюминесценции доминируют две полосы излучения с максимумами 5.2 и 4.6 эВ с длительностью свечения меньше 2 нс и при 5 К, и при 300 К. Интенсивность этих свечений слабо зависит от температуры. Спектр возбуждения аналогичного свечения в CsBr имеет пороговую энергию 14 эВ [13] и с коротковолновой стороны примыкает к обнаруженным в [14] для CsCl, CsBr и CsI полосам поглощения (~13.5 эВ) катионных экситонов, возникающих при возбуждении Cs^+ . По [15, 16], спектр возбуждения свечений 5.2 и 4.6 эВ в CsCl имеет пороговую энергию 14.1 эВ. При ионизации $5p^5$ -оболочки Cs^+ электрон попадает в зону проводимости, а

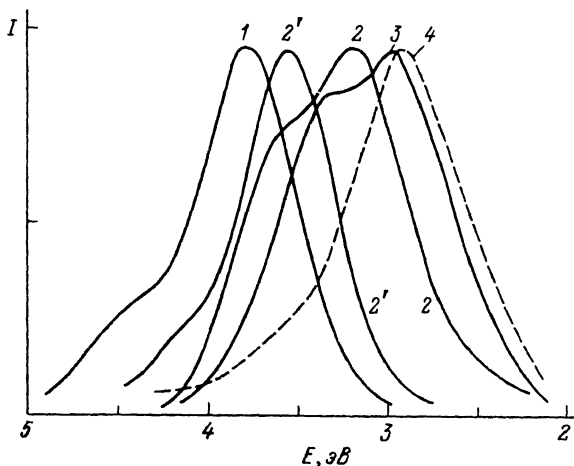


Рис. 2. Измеренные при 5 К спектры люминесценции кристаллов CsCl-1 (1), CsCl-3 (2—4) и CsCl-3A (2') при возбуждении фотонами 7.4 (1), 7.5 (2, 2'), 8.0 (3) и 9.0 эВ (4).

возникающая в цезиевой валентной зоне p -дырка за время меньше 1 нс «всплывает» к потолку зоны и, возможно, автолокализуется. При рекомбинации электронов из валентной зоны $3pCl^-$ с дырками (автолокализованными дырками?) в катионной зоне наблюдается так называемая кросс-люминесценция. Два максимума в спектре кросс-люминесценции CsCl отражают теоретически рассчитанную в [10] двугорбую плотность состояний в валентной зоне $3pCl^-$.

5. В спектрах рентгенолюминесценции CsCl, кроме кросс-люминесценции, при 5 К видны также в несколько раз менее интенсивные полосы в области 3.5—2.0 эВ (рис. 1). При нагреве до 42 К резко ослабляется свечение с максимумом ~3 эВ и остается сохраняющееся и при 80 К устойчивое к тепловому тушению свечение с максимумом 2.7 эВ, которое, как показали исследования, соответствует туннельной люминесценции F , V_K -пар.

После прекращения воздействия на кристалл рентгеновского излучения (X -облучения) при 5 К наблюдается медленно спадающая со временем (в многочасовом диапазоне) туннельная люминесценция (ТЛ), интенсивность которой остается постоянной при 5—14 К. Основная полоса инерционной люминесценции при 2.7 эВ, которая резко ослабляется при подсветке фотонами 2.15 эВ из области F -полосы поглощения, соответствует, как показывает сравнение с ТЛ KCl и KBr [17, 18], прямой туннельной рекомбинации электронов F -центров с локализованными поблизости V_K -центрами (автолокализованными дырками). Вторая, более слабая полоса ТЛ CsCl при ~4.2 эВ, резко ослабляемая фотонами 1.8 эВ из области F' -полосы поглощения, соответствует (как и в KCl [17, 18]) прямой туннельной рекомбинации электронов F' -центров с V_K -центрами. Туннелирование в F' , V_K -парах осуществляется значительно быстрее, чем в F , V_K -парах. После X -облучения при 22 К в спектрах ТЛ при 22 К, кроме свечений 2.7 и 4.2 эВ, хорошо выражено свечение в области 2.8—3.5 эВ, часть которого, как будет показано в п. 8, соответствует излучательной туннельной перезарядке F' , H -пар (ср. с KCl [19, 20]). При 43 К в спектре ТЛ доминируют полосы 4.2 и 2.7 эВ.

6. В спектрах фотолюминесценции CsCl (рис. 2) при возбуждении ВУФ-радиацией (6.5—10.0 эВ) при 5 К отсутствует кросс-люминесценция и при разных частотах возбуждающей радиации доминируют те или иные полосы свечения. В кристаллах CsCl-1, не прошедших специальную очистку от ионов Br^- и I^- , хорошо выражены примесные свечения: при возбуждении в области

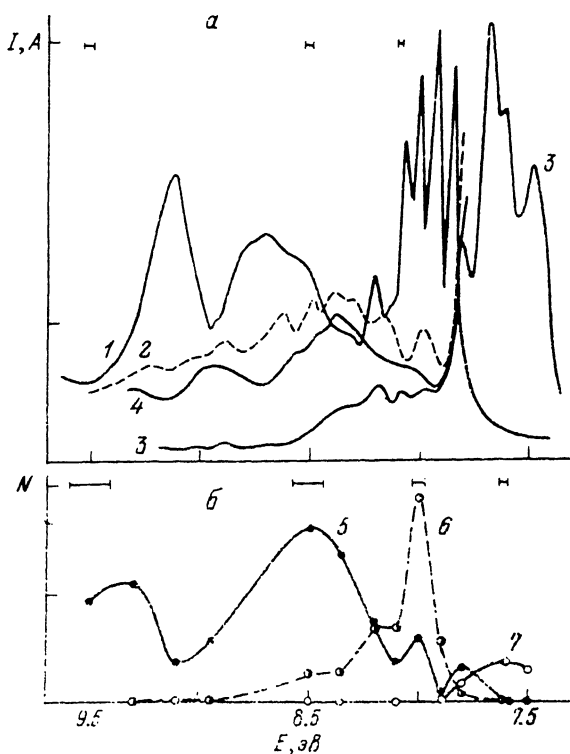


Рис. 3. а) Спектр поглощения пленки CsCl при 10 К по [8] (1). Спектры возбуждения свечений 3.2 (2), 3.7 (3) и 2.8 эВ (4), измеренные при 5 К для кристаллов CsCl-3 (2, 3) и CsCl-3А (4). б) Спектры создания ВУФ-радиацией при 5 К пиков ТСЛ 17 (5), 19 (6) и 68 К (7).

Указаны оптические ширины щелей.

поглощения ионов I^- (при 6.4 эВ) при 5 К хорошо возбуждается свечение 2.6 эВ, а в области поглощения Bg^- , Bg^- -пар (7.4 эВ) возбуждаются свечения 3.8 и 4.4 эВ.

В прошедших тщательную очистку кристаллах CsCl фотоны 7.5 эВ возбуждают свечение в области 3.5 эВ, которое, по-видимому, связано с излучательным распадом экситонов около ассоциаций анионных и катионных вакансий (ср. с KCl и RbCl [21]).

Свечение автолокализованных экситонов (АЛЭ) можно получить при возбуждении кристалла в области переходов зона—зона, что приводит к быстрой безбарьерной автолокализации дырки в регулярных областях решетки. При возбуждении фотонами 8.95 эВ при 5 К в спектрах фотолюминесценции многих образцов CsCl доминирует свечение с максимумом в области 2.9—3.2 эВ (рис. 2). При оптическом создании свободных экситонов возбуждается как собственное свечение АЛЭ, так и свечение экситонов, локализующихся около дефектов.

По нашим оценкам, при возбуждении фотонами 7.85—10 эВ квантовый выход экситонного свечения в CsCl не превышает 3%. Из-за малого квантового выхода при 5 К экситонная люминесценция с трудом выделяется среди других видов свечений. Мы полагаем, что полоса люминесценции АЛЭ в CsCl имеет максимум при ~3 эВ и полуширину ~0.6 эВ, т. е. лежит в более коротковолновой области, чем свечение АЛЭ в KCl и RbCl (2.31 и 2.23 эВ), но в более длинноволновой, чем в NaCl (3.36 эВ). Свечение АЛЭ в CsCl при 5 К (как и в KCl, RbCl) имеет миллисекундную длительность. Большие стоксовы потери и значительная инерционность свечения характерны, как показал теоретический анализ Сонга

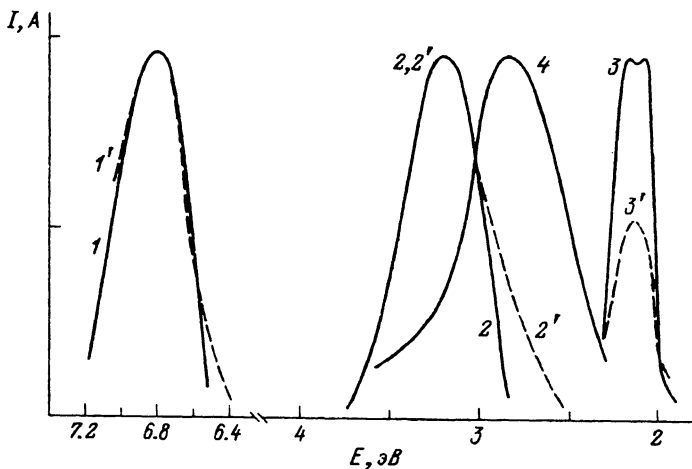


Рис. 4. Оптические характеристики α - и F -центров для кристаллов CsCl-3A (1, 2) и CsCl-3 (1', 2', 3', 3, 4), облученных рентгеновской радиацией (1—4), фотонами 8.1 ± 0.1 эВ (1', 2') при 5 К или излучением ХеСl-лазера при 80 К (3').

1, 1' — спектры стимуляции α -люминесценции (3.2 эВ); 2, 2' — спектры α -люминесценции при стимуляции фотонами 6.8 эВ; 3 — спектр стимуляции ТЛ 2.85 эВ; 3' — спектр поглощения F -центров; 4 — спектр туннельной люминесценции, стимулируемой фотонами 2.05 эВ. Спектры измерены при 5 (1—4, 1', 2') или 80 К (3').

[22, 23], для «нецентральных» асимметричных АЛЭ с дырочной компонентой Cl_2^- , смещенной относительно центрального положения между двумя занимаемыми ею анионными узлами.

7. На рис. 3 приведен измеренный при 10 К спектр поглощения тонкой пленки α -CsCl [8]. Максимум 7.85 эВ, сильно смещающийся при нагреве в длинноволновую область, соответствует p^5s -экситону с электронной компонентой s -типа. Более коротковолновые максимумы 7.92 и 8 эВ слабо зависят от температуры и соответствуют p^5d -экситону.

Спектры возбуждения для свечений 3.7, 3.2 и 2.7 эВ при 5 К для двух прошедших очистку кристаллов CsCl приведены на рис. 3. Собственное свечение АЛЭ в области 2.8—3.3 эВ преобладает при возбуждении фотонами $h\nu_B > 7.8$ эВ, т. е. в области фундаментального поглощения, где при 5 К фотоны 7.80—8.40 эВ создают экситоны, а фотоны 8.4—9.5 эВ — разделенные электроны и дырки.

Особенно хорошо выраженное в кристалле CsCl-3A свечение дефектов (3.7 эВ) эффективно возбуждается в области 7.5—7.7 эВ, слабее — в экситонной области. Электроны и дырки ($h\nu_B > 8.4$ эВ) почти не возбуждают свечение 3.7 эВ.

8. Под действием X -облучения при 5 К в ПСК ШГК создаются пары ДФ двух сортов: анионные вакансии и междоузельные ионы галоида (так называемые α , I -пары), а также F -центры и междоузельные атомы галоида, имеющие структуру двухгалоидных молекул X_2^- , занимающих один анионный узел решетки (F , H -пары) [10]. Как показано на рис. 4, для ПК CsCl X -облучение при 5 К также приводит к созданию α , I -пар. После облучения возникает α -полоса поглощения с максимумом 6.8 эВ, при слабых поглощениях совпадающая с контуром полосы возбуждения для свечения 3.2 эВ (α -люминесценция). Облучение приводит также к созданию F , H -пар. Неэлементарная для ПК CsCl F -полоса поглощения (2.0—2.4 эВ) [24] легко измерима и люминесцентным методом по фотостимулированной в ее пределах люминесценции 2.85 эВ (рис. 4). Свечение 2.85 эВ соответствует туннельной перезарядке F^* , H -пар. Используя высокочувствительную люминесцентную методику, нам удалось обнаружить создание α , I - и F , H -пар ДФ в CsCl и после оптического создания экситонов фотонами

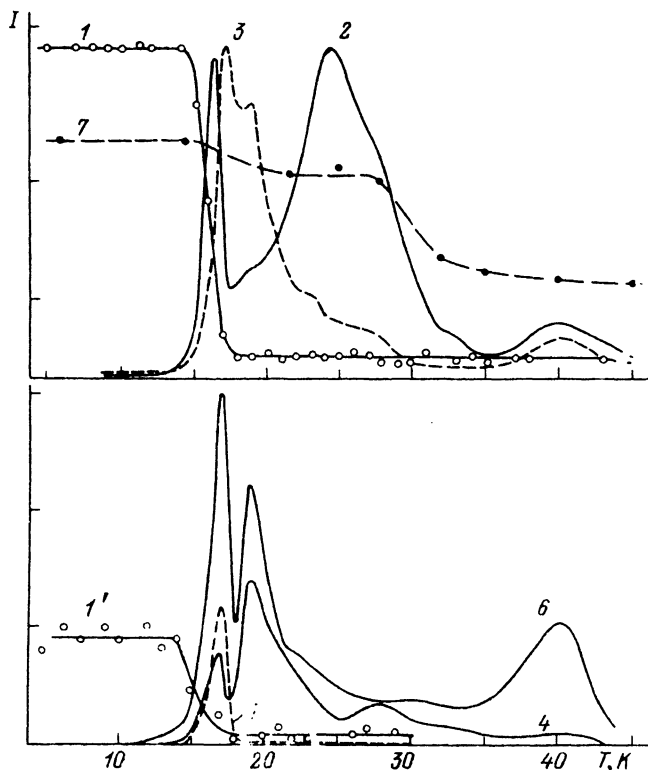


Рис. 5. Термоактивационные характеристики кристаллов CsCl-3A, облученных при 5 К рентгеновской радиацией (1—3, 7), фотонами 8.1 (1', 4) 8.95 эВ (5) или фотонами 8.1 и 8.95 эВ (6).

1, 1' — отжиг люминесцирующих α -центров. Кривые ТСЛ измерены для свечений 2.9 (2), 3.9 эВ (3) или в интегральном режиме (4—6). 7 — отжиг люминесценции 2.85 эВ, стимулируемой фотонами 2.05 эВ.

8.1 эВ. Квантовый выход для экситонного механизма создания α , I -пар в ПК CsCl близок к соответствующей величине для KCl (5%). Облучение кристаллов CsCl излучением ХеСl-лазера в двухфотонном режиме поглощения (8.04 эВ) при 80 К создает p^5d -экситоны, при распаде которых образуются F -центры, регистрируемые прямым абсорбционным методом (рис. 4).

Все эти данные позволяют утверждать, что в CsCl при 5 К наряду с малоэффективным излучательным каналом распада АЛЭ работает и более эффективный безызлучательный канал с рождением анионных ДФ (α , I - и F , H -пары).

9. На рис. 5 приведена кривая отжига созданных X -облучением в CsCl люминесцирующих (при стимуляции фотонами 6.8 эВ) α -центров. В отличие от KCl, где отжиг α -центров идет в широкой области 11—37 К [1], отжиг доминирующей части α -центров в CsCl (как и в кристалле NaCl) идет в узкой температурной области 16—20 К. Отжиг сопровождается интенсивной термоактивированной люминесценцией (ТСЛ), основные пики которой наблюдаются при 17, 19, 25, 30 и 40 К (рис. 5) и 68, 85, 105, 160, 175 и 235 К. Пик ТСЛ 175 К соответствует отжигу V_K -центров и обусловлен прыжковой миграцией и рекомбинацией автолокализованных дырок. На рис. 5 приведена также измеренная в импульсном режиме (все измерения при ~ 10 К) кривая отжига люминесценции 2.85 эВ, стимулируемой фотонами 2.05 эВ в F -полосе поглощения. Основные области уменьшения числа F -центров зарегистрированы при 16—21 и

29—32 К. В области 15—18 К отжигаются почти все α -центры и часть F -центров. Эти процессы связаны с прыжковой диффузией междоузельных ионов хлора, которые частично безызлучательно рекомбинируют с α -центрами, частично — с F -центрами, образовавшимися при захвате анионными вакансиями вторичных электронов. Освобожденные при рекомбинации I - и F -центров электроны затем излучательно рекомбинируют с V_K -центрами с характерным для АЛЭ свечением. В области 30—45 К осуществляется прыжковая диффузия междоузельных атомов галоида, которые частично рекомбинируют с F -центрами, а частично с F' -центрами, образовавшимися при захвате F -центрами вторичных электронов. Дополнительная подсветка облученного CsCl фотонами 1.8 эВ в F' -полосе поглощения резко ослабляет пики ТСЛ в области 23—45 К, а подсветка в области F -полосы ослабляет пики ТСЛ в области 16—21 К.

Были измерены спектры создания некоторых пиков ТСЛ, возникающих после воздействия на кристаллы CsCl (прогретые предварительно до 300 К) при 5 К равного числа фотонов разных частот (рис. 3, б). Пики ТСЛ 17, 19, 25, 40 К возбуждаются лишь в области фундаментального поглощения CsCl, а пик 68 К — лишь фотонами 7.5—7.75 эВ вне области фундаментального поглощения. Пик ТСЛ 17 К эффективно возникает после создания разделенных электронов и дырок ($h\nu \geq 8.4$ эВ). Для появления этого пика требуется не только наличие первичных α , I -пар, но и возникающих при их частичной перезарядке вторичными электронно-дырочными парами F , I , V_K -троек. Пик 19 К особенно эффективно возникает после воздействия фотонами 7.9—8.2 эВ, селективно создающими экситоны. Не исключено, что мы имеем дело с превращением некоторых F , H -пар в F , I , V_K -тройки при взаимодействии с H -центрами вторичных экситонов.

Отношение интенсивностей пиков ТСЛ 17 и 19 К резко увеличивается при возрастании $h\nu$ от 0.16 (7.9 эВ) до более 20 (9.3 эВ). Пик 19 К начинает доминировать (5 : 1) в области $h\nu \geq 8.35 \pm 0.05$ эВ, где в спектре поглощения CsCl (рис. 3, а) наблюдается характерная ступенька, которую можно, вероятно, интерпретировать как начало межзонных переходов с рождением разделенных электронов и дырок. При такой интерпретации узкая полоска в спектре поглощения при 8.19 эВ (рис. 3, а), возможно, соответствует второму члену серии p^3s -экситонов.

Пик ТСЛ при 40 К после облучения при 5 К фотонами 8.1 или 8.95 эВ нами не зарегистрирован. Этот пик хорошо выражен (рис. 4, б) после комбинированного облучения кристалла CsCl фотонами 8.1 эВ, а затем фотонами 8.95 эВ. Фотоны 8.1 эВ создают экситоны, при распаде которых образуются разделенные F - и H -центры. Фотоны 8.95 эВ создают автолокализованные дырки и электроны, частично локализующиеся на F -центрах. Пик ТСЛ 40 К наблюдается при приближении H -центров к F' -центрам, что делает возможной излучательную туннельную перезарядку F' , H -пар, аналогичную описанной выше перезарядке F , H -пар при оптическом возбуждении F -центров.

10. Кратко обсудим основные черты сходства и различия изученных нами ЭВ и ДФ для ПК CsCl и ГЦК ЩГК. Среди ГЦК ЩГК можно выделить два подсемейства. Для первого (RbI, KI, NaI, NaBr, NaCl) характерно существование свободных экситонов, которые эффективно возбуждают люминесценцию примесных ионов и после миграции по кристаллу на расстояния в тысячи постоянных решетки переходят (через активационный барьер) в автолокализованное состояние. Свечение АЛЭ в этой группе ЩГК осуществляется с квантовой эффективностью $\eta \geq 0.5$, и кристаллы имеют высокую стабильность по отношению к радиационным воздействиям при 5 К.

Для второго подсемейства ГЦК кристаллов (KF, KCl, KBr, RbCl, RbBr) характерна быстрая автолокализация экситонов после их создания. Квантовая эффективность сопровождающейся большими стоковыми потерями люминесценции АЛЭ даже при 5 К составляет лишь несколько процентов, и распад

АЛЭ при 5 К осуществляется в основном безызлучательно с рождением F , H - и α , I -пар.

Как было показано выше, для АЛЭ в ПК CsCl также характерны большие стоксовые потери (4.85 эВ), низкий квантовый выход люминесценции ($\eta \geq 0.03$) и сравнимая со случаем KCl эффективность низкотемпературного распада АЛЭ с рождением F , H - и α , I -пар. В этом отношении ПК кристаллы CsCl ведут себя как второе подсемейство ГЦК ШГК.

Одна из важнейших причин доминирующей роли безызлучательного распада АЛЭ с рождением ДФ для ПК CsCl, как и для кристаллов KCl, RbCl и др. [1, 25], состоит в том, что для дырочной компоненты АЛЭ (молекулы Cl_2^+) частоты колебаний существенно превосходят предельные частоты кристаллических колебаний. В результате колебательная энергия концентрируется на малом числе тяжелых частиц, участвующих в локальных медленно затухающих колебаниях. Создается благоприятная ситуация для распада АЛЭ на F , H -пары еще до завершения колебательной релаксации, после которой наблюдается широкополосная люминесценция с большим стоксовым сдвигом. Для первого подсемейства ГЦК ШГК (в частности, NaCl) внутримолекулярные колебания в Cl_2^+ накладываются по частотам на кристаллические колебания и не являются локальными. После быстрой колебательной релаксации, не сопровождающейся рождением ДФ, наблюдается люминесценция с высоким квантовым выходом.

11. При несомненном сходстве процессов распада АЛЭ в ПК CsCl и ГЦК KCl обнаруживаются и существенные различия, особенно в процессах создания и термического отжига α , I -пар. Если в KCl отжиг α , I -пар осуществляется в широком диапазоне температур 11—37 К в несильно разделенных стадиях [1, 17, 19], то в CsCl α , I -пары отжигаются в узкой температурной области 14—18 К. В этом отношении CsCl похож на кристаллы NaCl [26], относящиеся к другому подсемейству ГЦК ШГК, чем KCl и RbCl. Мы считаем, что отсутствие в CsCl (как и в NaCl) пространственно сильно разделенных α - и I -центров объясняется тем, что после рождения F , H -пар и их туннельной перезарядки с образованием α , I -пар возникшие при 5 К междоузельные ионы галоида не могут при 5 К далеко отойти от анионной вакансии в «горячем» состоянии, как это происходит в KCl и ряде других ГЦК ШГК [27].

Для ПК кристаллов CsCl характерно наличие двух рядов ионов хлора. По направлениям (100) расположены плотноупакованные ряды анионов, «зазор» между которыми (0.49 Å) значительно меньше, чем у KCl и RbCl (0.81 и 1.31 Å). В рядах анионов по (110) зазор в ПК CsCl велик (2.7 Å), что создает благоприятные условия для значительных смещений дырочной компоненты АЛЭ, больших стоксовых потерь при колебательной релаксации и для образования F , H -пар при распаде АЛЭ. Зазор же между катионами в ПК CsCl (0.81 Å) значительно меньше, чем в RbCl (1.67 Å), что должно резко уменьшить вероятность низкотемпературного смещения междоузельного иона хлора в краудинной конфигурации.

12. Близкое расположение ионов хлора в рядах по (100) в ПК CsCl обеспечивает существование широкой валентной зоны и большие пробеги экситонов и дырок до их автолокализации по сравнению с кристаллами из второго подсемейства (например, RbCl). Экспериментальные подтверждения существования этих эффектов в ПК CsCl получены нами при исследовании миграции экситонов и дырок в CsCl—Т! и будут изложены в специальной статье.

В заключение приносим глубокую благодарность А. Баймаханову, Е. А. Васильченко, В. В. Мюрку и Т. И. Савихиной за плодотворное участие в некоторых из описанных выше экспериментов и обсуждение полученных результатов.

- [1] Лущик Ч. Б., Лущик А. Ч. Распад электронных возбуждений с образованием дефектов в твердых телах. М., 1989. 263 с.
- [2] Лущик Ч. Б., Васильченко Е. А., Лущик А. Ч., Лущик Н. Е., Соовик Х. А., Тайиров М. М. // Тр. ИФ АН ЭССР. 1980. Т. 51. С. 7—38; 1981. Т. 52. С. 7—52.
- [3] Harvey P. J., Hoodless I. M. // Philos. Mag. 1967. V. 16. P. 543—551.
- [4] Beutin V., Felix F. W., Meier K. // J. Crystal Growth. 1974. V. 23. N 4. P. 353—355.
- [5] Лущик Н. Е., Маароос А. А., Никифорова О. А., Фрорип А. Г., Яансон Н. А. // Тр. ИФ АН ЭССР. 1987. Т. 61. С. 7—32.
- [6] Абрамов В. Н., Фрорип А. Г. // Тр. ИФ АН ЭССР. 1987. Т. 61. С. 164—171.
- [7] Eby J. E., Teegarden K. J., Dutton D. B. // Phys. Rev. 1959. V. 116. N 5. P. 1099—1105.
- [8] Teegarden K., Baldini G. // Phys. Rev. 1967. V. 155. N 3. P. 896—907.
- [9] Nosento L., Reguzzoni E. // Phys. Rev. B. 1979. V. 19. N 4. P. 2314—2320.
- [10] Сакс Т. // Изв. АН ЭССР. Сер. физ., мат. 1980. Т. 29. № 1. С. 55—65.
- [11] Satpathy S. // Phys. Rev. B. 1986. V. 33. N 12. P. 8706—8715.
- [12] Poole R. T., Jenkin J. G., Liesegang J., Leckey R. C. C. // Phys. Rev. B. 1975. V. 11. N 12. P. 5179—5189.
- [13] Александров Ю. М., Куусманн И. Л., Лущик Ч. Б. и др. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 4. С. 1026—1029.
- [14] Ильмас Э. Р., Кинк Р. А., Лийдья Г. Г., Лущик Ч. Б. // Тр. ИФА АН ЭССР. 1963. Т. 23. С. 221—223.
- [15] Aleksandrov Yu. M., Makhov V. N., Syrejschikova T. I., Yakimenko M. N. // Nucl. Instrum. Methods. A. 1987. V. 261. P. 153—155.
- [16] Kubota S., Itoh M., Ruan (Gen) J., Sakuragi S., Hashimoto S. // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 60. N 22. P. 2319—2322.
- [17] Aboltin D. E., Grabovskis V. J., Lushchik Ch. B. et al. // Phys. St. Sol. (a). 1978. V. 47. N 2. P. 667—675.
- [18] Grabovskis V. J., Vitols I. K. // J. Luminescence. 1979. V. 20. N 4. P. 337—342.
- [19] Lushchik Ch., Kolk J., Lushchik A., Lushchik N., Tajirov M. M., Vasilchenko E. // Phys. St. Sol. (b). 1982. V. 144. N 1. P. 103—111.
- [20] Васильченко Е. А., Тайиров М. М. // Тр. ИФ АН ЭССР. 1982. Т. 53. С. 172—192.
- [21] Lushchik A., Lushchik Ch., Lushchik N., Frorip A., Nikiforova O. // Phys. St. Sol. (b). 1991. V. 168. N 2. P. 413—423.
- [22] Williams R. T., Song K. S. // J. Phys. Chem. Sol. 1990. V. 51. N 7. P. 679—716.
- [23] Song K. S., Leung C. H. // Rev. Sol. St. Sci. 1990. V. 4. N 2. P. 357—381.
- [24] Rabin H., Schulman J. H. // Proc. Int. Conf. Semicond. Phys. 1961. P. 733—736.
- [25] Lushchik Ch., Kolk J., Lushchik A., Lushchik N. // Phys. St. Sol. (b). 1984. V. 86. N 1. P. 219—227.
- [26] Лущик А. Ч., Колк Ю. В., Лущик Н. Е., Фрорип А. Г. // Тр. ИФ АН ЭССР. 1986. Т. 58. С. 25—46.
- [27] Lushchik A. Ch., Frorip A. G. // Phys. St. Sol. (b). 1990. V. 161. N 2. P. 525—535.

Институт физики АН Эстонии
Тарту

Поступило в Редакцию
20 мая 1992 г.