

УДК 535.37

© 1992

ЭКСИТОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ В КРИСТАЛЛАХ CsCl И CsCl—Tl

К. И. Ибрагимов, А. Ч. Луцик, Ч. Б. Луцик, А. Баймаханов,
Е. А. Васильченко, Т. И. Савихина

Для кристаллов CsCl и CsCl—Tl методами оптической и термоактивационной спектроскопии измерены спектры создания ВУФ-радиацией автолокализованных экситонов и дырок, Tl^0 -центров, а также спектры возбуждения люминесценции Tl^+ , что позволило разделить экситонные и электронно-дырочные процессы. Экспериментально показано, что при 5 и 80 К длина пробега экситонов до автолокализации в простых кубических кристаллах CsCl в десятки раз больше, чем в гранецентрированных кристаллах KCl и RbCl.

1. В [1] начато изучение особенностей собственных электронных возбуждений и дефектов Френкеля в простых кубических (ПК) кристаллах α -CsCl по сравнению с гранецентрированными кубическими (ГЦК) щелочно-галогенидными кристаллами (ЩГК). При температурах $T > 740$ К стабильна модификация β -CsCl (ГЦК). В спектре поглощения тонкой пленки β -CsCl, замороженной быстрым охлаждением $740 \rightarrow 80$ К и изученной при 80 К [2, 3], полоса поглощения со спин-орбитальным расщеплением (7.45 и 7.6 эВ), которая соответствует созданию p^5s -экситонов с электронной s -компонентой, а также полоса поглощения 8.0 эВ, соответствующая созданию p^5d -экситонов. После полиморфного перехода β -CsCl $\rightarrow \alpha$ -CsCl, в результате которого объем кристалла резко уменьшается, поглощение p^5s -экситонов испытывает коротковолновый сдвиг до 7.81 эВ, а поглощение p^5d -экситонов немного смещается в длинноволновую сторону (7.92 эВ), что приводит к сближению и взаимному возмущению p^5s - и p^5d -состояний.

Для ЩГК обнаружено сосуществование свободных экситонов (СЭ) и автолокализованных экситонов (АЛЭ) [5-7]. В ГЦК NaI, KI, RbI, NaBr состояния СЭ и АЛЭ разделены активационным барьером, а при 4 К длина пробега экситонов до автолокализации $l = 10^3 \div 10^4$ а (а — постоянная решетки) [5-7]. В ГЦК кристаллах KCl и RbCl даже при 5 К $l = 10$ а [8, 9]. Так как при переходе CsCl в ПК-модификацию наблюдается значительное сужение экситонных полос поглощения, а ширина валентной зоны α -CsCl больше, чем у RbCl [4], можно было ожидать, что в ПК CsCl величина l будет значительно больше, чем в ГЦК KCl и RbCl.

Цель настоящего исследования — методами низкотемпературной ВУФ-спектроскопии и термоактивационной спектроскопии разделить экситонные и электронно-дырочные процессы и оценить величину l в ПК кристаллах CsCl с ориентированными по $\langle 100 \rangle$ плотноупакованными рядами анионов.

2. Основная экспериментальная установка описана в [1, 10]. Кроме выращенных по специально разработанной методике [1] кристаллов CsCl высокой чистоты с содержанием примесей не более 10^{-7} — 10^{-5} молярных долей, мы изучили полированные пластинки $15 \times 15 \times 1.5$ мм кристалла CsCl—Tl с определенным абсорбционным методом содержанием таллия $5 \cdot 10^{-5}$. Ионы Tl^+ служили

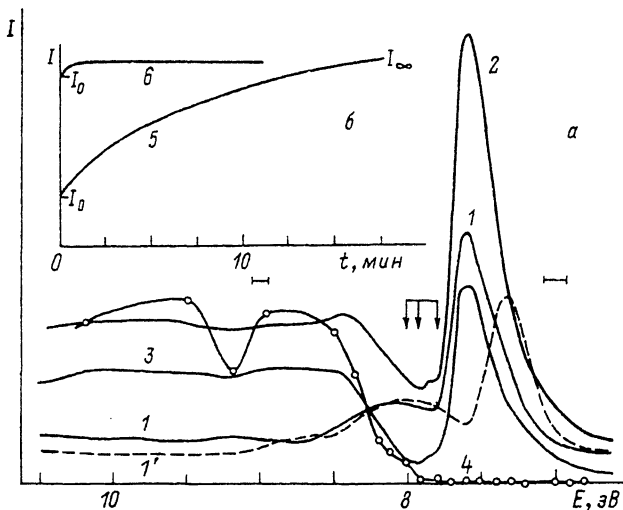


Рис. 1. а) Спектры возбуждения выделенной фильтрами ЖС-4 и СС-5 люминесценции в области 2.6—3.1 эВ, измеренные при 80 К (1—3) и 180 К (1') для кристаллов CsCl: безынерционная часть свечения, $\tau < 1$ с (1, 1'), стационарное свечение (2), разностный спектр кривых 2 и 1 (3). Спектр создания ВУФ-радиацией при 80 К пика ТСЛ 180 К (V_K -центры) (4). б) Зависимости интенсивности свечения CsCl (2.6—3.1 эВ) от времени возбуждения фотонами 8.1 (5) и 10.2 эВ (6) при 80 К.

Приведены оптические ширины щелей, стрелками указаны положения максимумов экситонных полос поглощения при 80 К по [2].

высокочувствительными люминесцирующими зондами при изучении миграции и автолокализации экситонов.

Аналогичные исследования ГЦК ЩГК ранее осуществлены для NaCl—Ag (80 К) [11], KBr—Tl и KBr—I (80 К) [12], KCl—Tl (5 К) [13]. ПК кристаллы в этом отношении изучены мало: CsBr—In (80 К) [12, 14], CsCl—In (300 К) [15].

3. На рис. 1, а приведены измеренные при 80 К спектры возбуждения выделенной фильтрами люминесценции в области 2.6—3.1 эВ при облучении кристалла CsCl равным числом фотонов разных частот. В области от 8.4 до 10.5 эВ лишь часть свечения I_0 разгорается практически безынерционно (аппаратурное время 1 с), основная же часть стационарного свечения I_∞ носит рекомбинационный характер и разгорается до постоянного уровня за многие минуты (рис. 1, б). На рис. 1, а приведены спектры возбуждения стационарного свечения I_∞ , его быстрой компоненты I_0 и разности $I_\infty - I_0$, характеризующей свечение, возникающее при рекомбинации электронов на дефектах. На рис. 1, а приведен также измеренный при 80 К спектр создания ВУФ-радиацией автолокализованных дырок (V_K -центров). За меру числа V_K -центров принята интенсивность пика термостимулированной люминесценции (180 К), сопровождающей отжиг V_K -центров и возникающей при рекомбинации подвижных автолокализованных дырок с F -центрами.

На рис. 1, а приведен спектр возбуждения быстрой люминесценции CsCl, измеренный при 180 К. Соответствующий p^5s -экситонам минимум в спектре возбуждения в соответствии с температурным изменением экситонной полосы поглощения наблюдается при 7.6 эВ.

4. Для лучшего разделения экситонных и электронно-дырочных процессов в CsCl—Tl были изучены центры окраски, создаваемые при 80 К ВУФ-радиацией. После облучения выделенными вакуумным монохроматором ВМР-2 фотонами кристалл нагревался с постоянной скоростью $0.3 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ и измерялась тер-

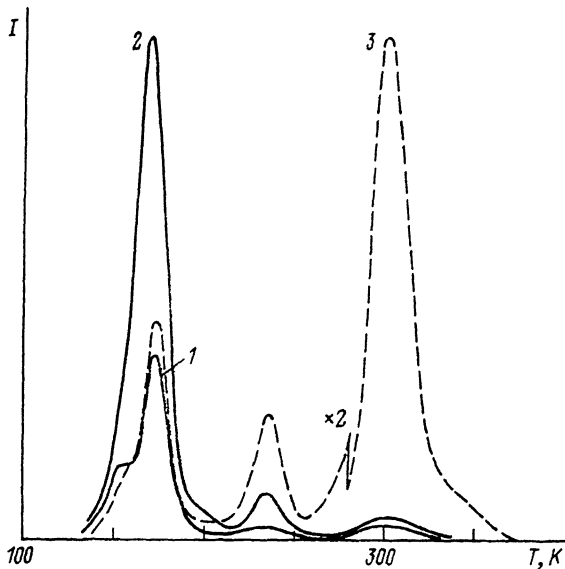


Рис. 2. Кривые термостимулированной люминесценции кристалла CsCl—Tl, облученного при 80 К фотонами, 8.1 (1) или 10.2 эВ (2, 3).

1, 2 — кривые интегральной ТСЛ, 3 — ТСЛ для свечения Tl^+ -центров 3.6 эВ (выделено фильтром УФС-6).

мостимулированная люминесценция (ТСЛ). На рис. 2 приведены характерные кривые интегральной ТСЛ (регистрировалось все излучение в области 2—5 эВ, а также выделенное фильтром УФС-6 ультрафиолетовое свечение Tl^+ -центров) для кристаллов CsCl—Tl, облученные при 80 К фотонами 10.2 или 8.1 эВ. Четко выражены основные пики ТСЛ 160, 180, 240 и 310 К. Пик 310 К отсутствует в чистых кристаллах CsCl и появляется после введения ионов таллия. В этом пике доминирует ультрафиолетовое свечение Tl^+ -центров (3.6 эВ).

После X-облучения CsCl—Tl при 80 К в спектре поглощения, кроме F -полосы (2.15 эВ), появляется интенсивное поглощение с максимумом 3.3 эВ и полушириной 0.75 эВ, которое соответствует V_K -центрам и отжигается при нагреве в области 150—200 К. После облучения появляются также полосы поглощения Tl^0 -центров, которые частично отжигаются при нагреве 150—200 К и полностью исчезают при нагреве 270—320 К.

На основании этих результатов и аналогии с подробно изученными кристаллами KCl—Tl [^{13, 16–20}] мы интерпретируем пик ТСЛ 180 К в CsCl как результат прыжковой диффузии автолокализованных дырок и их рекомбинации с электронами, захваченными ионами Tl^+ . Отжиг Tl^0 -центров осуществляется в CsCl—Tl при 310 К.

5. На рис. 3 приведены спектры создания ВУФ-радиацией V_K - и Tl^0 -центров, за меру числа которых приняты интенсивности пиков ТСЛ 180 и 315 К после облучения CsCl—Tl при 80 К равным числом фотонов разных частот. На рис. 3 приведен также, по данным [²], спектр поглощения тонкой пленки CsCl, измеренный при 80 К. В области фундаментального поглощения CsCl ($h\nu > 7.8$ эВ) эффективность создания Tl^0 - и V_K -центров особенно высока для $h\nu > 8.4$ эВ, где осуществляются межзонные переходы с рождением разделенных электронов и дырок. Хорошо видна корреляция со спектром поглощения: в области максимумов поглощения (10.45 и 9.12 эВ) наблюдаются четкие минимумы в спектрах создания Tl^0 - и V_K -центров, глубина которых превосходит не учитываемый нами эффект селективности отражения кристаллом возбуждающей радиации.

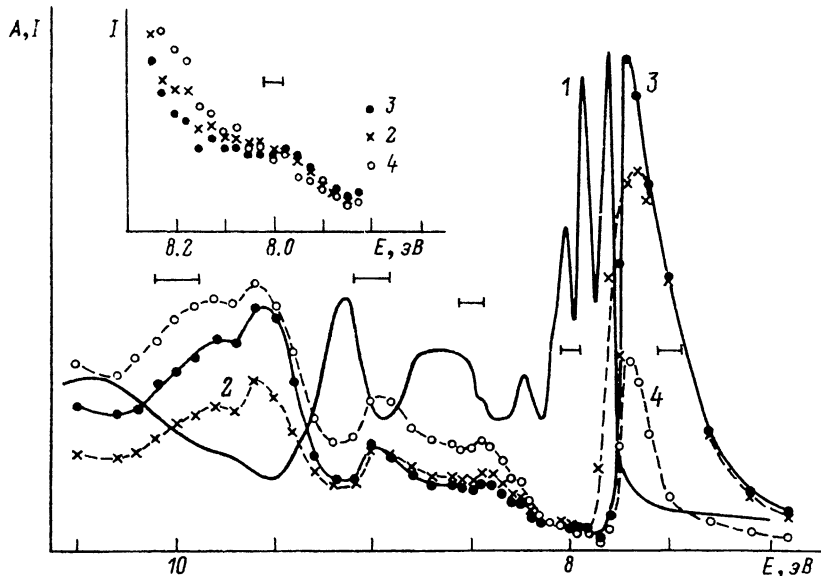


Рис. 3. Спектр поглощения пленки CsCl при 80 К по [2] (1). Спектры создания ВУФ-радиацией пиков ТСЛ 180 (2), 310 (3) (V_K - и Tl^0 -центры соответственно) и 240 К (4).

Приведены оптические ширины щелей при облучении.

В области поглощения 7.80—8.20 эВ, где фотоны создают p^5s - и p^5d -экситоны, эффективность образования Tl^0 - и V_K -центров в десятки раз меньше, чем при межзонных переходах с рождением электронов и дырок. В CsCl—Tl при взаимодействии экситонов с Tl^+ -центрами в основном происходит возбуждение люминесценции Tl^+ -центров. В «грязных» кристаллах CsCl, не прошедших в отличие от остальных изученных нами кристаллов специальной очистки от ионов Li^+ , Na^+ , Sr^{2+} , Ba^{2+} , Bg^- , I^- , облучение фотонами $h\nu > 8.3$ эВ приводит не только к появлению V_K -пиков ТСЛ (160, 180 К), но и к возникновению интенсивных пиков в области 205 К (околопримесные V_K -центры) и 240 К. Последний пик селективно создается также (рис. 3) при облучении в узкой спектральной области 7.6—7.7 эВ и соответствует, по нашим данным, дыркам, захваченным катионными вакансиями.

6. На рис. 4, а приведены измеренные при 5 К спектры рентгенолюминесценции кристаллов CsCl и CsCl—Tl. Возбуждение осуществлялось рентгеновской установкой АРОС (50 кВ, 3 мА, W-анод). Для чистого кристалла в спектре видны две полосы кросс-люминесценции с максимумами 5.2 и 4.6 эВ (подробнее см. [1]). В кристалле CsCl—Tl коротковолновая полоса кросс-люминесценции частично реабсорбируется Tl^+ -центрами, длинноволновая же часть возникающей при электронных переходах между анионной и катионной валентными зонами кросс-люминесценция практически такая же, как для чистого CsCl. В области 2—3.5 эВ спектры рентгенолюминесценции CsCl и CsCl—Tl резко различны: для CsCl доминирует слабое свечение АЛЭ в области 2.6—3.2 эВ, а в CsCl—Tl видны полоса с максимумом 3.9 эВ, как и при прямом фотовозбуждении Tl^+ -центров в А-полосе поглощения (рис. 4, б), а также широкая полоса свечения с максимумом 2.3 эВ, которая по аналогичным данным для KCl—Tl [19, 20] должна быть приписана люминесценции, возникающей при туннельной рекомбинации электронов Tl^0 -центров с локализованными поблизости V_K -центрами. На рис. 4, а приведен спектр туннельной люминесценции, измеренный через 30 мин после окончания X-облучения при 5 К.

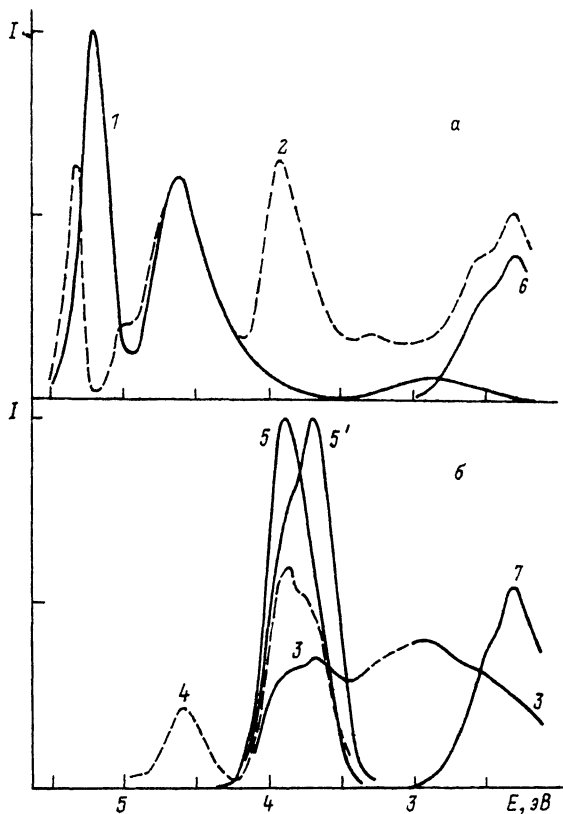


Рис. 4. Спектры рентгенолюминесценции кристалла CsCl (1) и CsCl—Te (2) при 5 К. Спектры люминесценции CsCl—Te при возбуждении фотонами 8.1 (3), 6.1 (4) и 5.1 эВ (5, 5') при 5 (3—5) или 50 К (5'). Спектры туннельной люминесценции CsCl—Tl, измеренные при 5 К через 30 мин после облучения рентгеновскими лучами (6) или фотонами 7.55 эВ (7) при 5 К.

Известно, что в ЩГК X-облучение после сложных промежуточных процессов приводит к созданию анионных экситонов, а также пар разделенных электронов и дырок, причем число последних примерно на порядок превышает число экситонов. Возбуждаемое X-лучами при 5 К свечение Tl^+ -центров в CsCl—Tl может быть возбуждено либо при взаимодействии экситонов с Tl^+ -центрами, либо при последовательном захвате ионами Tl^+ сперва дырки, а затем электрона, либо при частичной реабсорбции кросс-люминесценции CsCl Tl^+ -центрами. Последний процесс исключен при возбуждении CsCl фотонами $h\nu > 14$ эВ, которые, как известно [21], не возбуждают кросс-люминесценцию.

На рис. 5 приведены измеренные при 5 К спектры возбуждения выделенного монохроматором A-свечения Tl^+ -центров в области 3.9 эВ. Это свечение с квантовой эффективностью $\eta = 1$ возникает при прямом возбуждении Tl^+ -центров в A-полосе поглощения (5.1 эВ), со значительно меньшей эффективностью — в области фундаментального поглощения 7.8—9.5 эВ. Селективные минимумы в спектре возбуждения соответствуют максимумам в спектре экситонного или межзонного поглощения. Люминесценция Tl^+ -центров (3.9 эВ) особенно эффективно ($\eta = 0.01$) возбуждается p^2s - и p^2d -экситонами (7.8—8.3 эВ) и с заметно меньшей эффективностью при рекомбинации на таллиевых центрах электронов и дырок ($h\nu > 8.4$ эВ). Пробеги дырок до автолокализации в ЩГК меньше, чем пробеги до автолокализации свободных экситонов. Поэтому в кристаллах CsCl—Tl

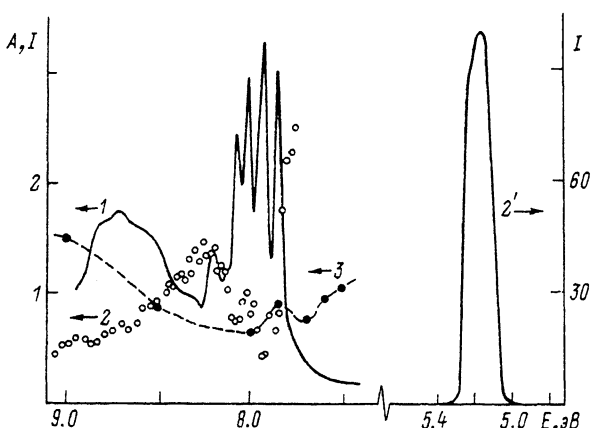


Рис. 5. Спектр поглощения пленки CsCl при 5 К по [3] (1). Спектр возбуждения А-свечения Tl^+ -центров (3.9 эВ) для кристалла CsCl—Tl при 5 К (2, 2'). Спектр возбуждения туннельной люминесценции Te_0 , V_k -пар (2.35 эВ), измеренный через 30 мин после прекращения облучения CsCl—Tl при 5 К (3).

Кривая 2' ослаблена относительно 2 в 30 раз.

с содержанием таллия $5 \cdot 10^{-5}$ эффективность захвата Tl^+ -центрами для дырок меньше, чем для экситонов, что и делает электронно-дырочный механизм возбуждения люминесценции Tl^+ -центров менее эффективным, чем экситонный. При нагреве CsCl—Tl до 180—200 К, когда автолокализованные дырки уже эффективно участвуют в прыжковой диффузии и ионизируют Tl^+ -центры, эффективность электронно-дырочного механизма возбуждения рекомбинационной люминесценции Tl^+ -центров возрастает в несколько раз.

На рис. 4, б приведен спектр люминесценции CsCl—Tl при возбуждении при 5 К фотонами 8.1 ± 0.1 эВ. Оптическое создание экситонов приводит к появлению сравнимых по интенсивностям полос люминесценции 3.9—3.7 эВ (свечение Tl^+ -центров) и в области 3 эВ (свечение АЛЭ). При экситонном возбуждении спектр люминесценции Tl^+ -центров значительно уширен по сравнению со спектром Tl^+ -центров при прямом возбуждении при 5 К фотонами 5.1 эВ, но очень похож на спектр возбуждаемой в А-полосе люминесценции Tl^+ -центров при 50 К (рис. 4, б). Для Tl^+ -центров в ШГК детально изучен эффект Яна—Теллера, приводящий к неэлементарности А-полосы люминесценции и к перераспределению ее A_x - и A_T -компонент при повышении температуры (в CsCl—Tl в пользу длинноволновой A_T -компоненты). При возбуждении Tl^+ -центров экситонами при 5 К A_x - и A_T -состояния заселяются иначе, чем при прямом низкотемпературном фотовозбуждении.

По нашим данным, при 5 К при создании экситонов с $n = 1$ фотонами 8 эВ эффективность возбуждения суммарного A_T - и A_x -свечения Tl^+ -центров в CsCl—Tl ($5 \cdot 10^{-5}$) $\eta = 0.017$ (в 60 раз меньше, чем при прямом возбуждении Tl^+ -центров фотонами 5.15 эВ).

Измерение спектров возбуждения А-свечения Tl^+ -центров при 80 К показало, что в экситонной области спектра квантовая эффективность возбуждения Tl^+ экситонами $\eta = 0.01$.

При 300 К эффективность возбуждения А-люминесценции Tl^+ -центров при оптическом создании экситонов фотонами 8 эВ оказалась в 2—3 раза выше, чем при 80 К. По-видимому, как и в NaCl—Ag и CsBr—Tl [11, 14], при повышенных температурах размораживается прыжковая диффузия автолокализованных экситонов, которые приобретают возможность возбуждать люминесценцию Tl^+ -центров.

7. А-свечение Tl^+ -центров возбуждается в CsCl—Tl не только в А-полосе поглощения (5.1 эВ), но и в С-полосе (6.1 эВ), где возбуждается, кроме того, слабое С-свечение (4.6 эВ). А-свечение Tl^+ -центров возбуждается в CsCl—Tl и фотонами 6.8—7.7 эВ в области элементарной D-полосы возбуждения, которую обычно приписывают возбуждению ионов галоида в непосредственной близости от ионов Tl^+ [13, 22].

Наши эксперименты показали, что в пределах D-поглощения CsCl—Tl наблюдаются эффекты, которые связаны с фотопереносом электронов с ионов хлора на ионы Tl^+ и образованием Tl^0 , V_K -пар. На рис. 5 приведен измеренный через 30 мин после прекращения облучения спектр возбуждения туннельной люминесценции Tl^0 , V_K -пар (2.35 эВ), которые эффективно создаются фотонами 7.3—7.5 эВ, т. е. в области, непосредственно примыкающей к экситонному поглощению CsCl. На рис. 4 приведены спектры туннельной люминесценции, зарегистрированные при 5 К после облучения фотонами 7.7 ± 0.05 эВ или X-лучами.

8. Следуя развитым в [12, 23] теоретическим моделям, оценим теперь по данным о возбуждении экситонами люминесценции Tl^+ -центров пробеги экситонов до их автолокализации (l) в CsCl—Tl. Вероятность захвата экситона примесным центром по [12, 23]

$$p = \sigma l n (1 + \sigma l n)^{-1},$$

где σ — эффективное сечение захвата электрона центром; n — молярная концентрация центров. При малых n имеем $p = \sigma l n$. По нашим данным, в CsCl—Tl при 5 К отношение эффективности возбуждения А-люминесценции Tl^+ -центров при оптическом создании экситонов фотонами 8.25 эВ и при прямом оптическом возбуждении Tl^+ -центров фотонами 5.1 эВ $\eta = 0.017$. Зная величину $n = 5 \cdot 10^{-5}$, получаем $\sigma l = p n^{-1} = 340 a^3$ (a — постоянная решетки). Принимая, как и для CsBr в [12], $\sigma = a^2$, можно оценить для CsCl средний пробег экситона до автолокализации $l = 340 a$. Аналогичная оценка для CsCl—Tl при 80 К дала $l = 200 a$. Для иодидов щелочных металлов, где состояния СЭ и АЛЭ разделены почти непрозрачным для туннельных переходов активационным барьером, различие в величинах l при 5 и 80 К в десятки раз больше, чем в CsCl.

9. Наш результат о значительно большей, чем в KCl и RbCl, величине l в ПК кристаллах CsCl находится в хорошем согласии с результатами фотоэлектрических измерений [4] и теоретическими расчетами полной ширины анионной валентной зоны [4, 24, 25] в ГЦК RbCl и ПК CsCl. В нашей лаборатории Ф. Савихин с использованием вакуумного монохроматора ВМР-2 и импульсного ускорителя электронов ГИН-600 измерил при 300 К полную ширину возбуждаемой одиночными наносекундными импульсами пучка электронов (200 кэВ) кросс-люминесценции кристаллов CsCl, которая при 300 К является доминирующим видом свечения. На уровне 2% максимальной интенсивности быстрая ($\tau < 2$ нс) кросс-люминесценция наблюдается в области от 3.4 до 6.0 эВ и определяется излучательными рекомбинациями электронов анионной валентной зоны с дырками, релаксированными за $\tau < 1$ нс к потолку катионной валентной зоны и локализованными на ионах цезия. Полная ширина спектра кросс-люминесценции CsCl, характеризующая полную ширину анионной валентной зоны, оказалась равной 2.6 эВ, что находится в согласии с фотоэлектрическими измерениями (2.7 эВ) [4] и превосходит ширину валентной зоны в кристаллах RbCl (< 2 эВ).

Для ПК кристаллов CsCl характерно наличие плотноупакованных рядов хлора, «зазор» между которыми (0.49 Å) несколько больше, чем в NaCl (0.32 Å), но значительно меньше, чем в KCl, RbCl и β -CsCl (0.81, 1.31 и 1.3 Å соответственно). Именно это обстоятельство приводит к тому, что в ПК CsCl валентная зона шире, чем в RbCl и KCl, а величина l в CsCl в десятки раз больше, чем в RbCl и KCl [8, 9].

10. На основании исследований, проведенных в нашей лаборатории в прошлые годы [6-9, 11-15], можно утверждать, что в ряду ГЦК кристаллов NaI, KI, RbI, NaBr, KBr, NaCl, KCl, RbCl при 5 К наблюдается значительное уменьшение пробегов экситонов до автолокализации от $10^4 a$ до $10a$. Приведенные в настоящей работе данные показывают, что кристаллы CsCl отнюдь не завершают этот ряд, а из-за рассмотренной выше особенности ПК структуры превосходят по величине l уровень кристалла KBr. Для ПК CsBr при 5 К пробег экситонов до автолокализации $l = 550a$ [11], т. е. еще больше, чем в CsCl.

В заключение выражаем благодарность Н. А. Янсон за выращивание кристаллов.

Список литературы

- [1] Ибрагимов К. И., Лущик Ч. Б., Фрорип А. Г., Янсон Н. А. // ФТТ. 1992. Т. 34. В печати.
- [2] Eby J. E., Teegarden K. J., Dutton D. B. // Phys. Rev. 1959. V. 116. N 5. P. 1099—1105.
- [3] Teegarden K. J., Baldini G. // Phys. Rev. 1967. V. 155. N 3. P. 896—907.
- [4] Poole R. T., Jenkin J. G., Liesegang J., Leckey R. // Phys. Rev. B. V. 11. N 12. P. 5179—5196.
- [5] Куусманн И. Л., Либлик П. Х., Лущик Ч. Б. // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т. 21. № 2. С. 161—163.
- [6] Лущик Ч. Б. Экситоны / Под ред. Э. И. Рашбы и М. Д. Стерджа. М.: Наука, 1985. С. 362—384.
- [7] Лущик Ч. Б., Лийдья Г. Г., Васильченко Е. А. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1973. Т. 37. № 2. С. 334—340.
- [8] Lushchik Ch., Kolk J., Lushchik A., Lushchik N., Tajirov M., Vasilchenko E. // Phys. St. Sol. (b). 1982. V. 114. N 11. P. 103—111.
- [9] Лущик А. Ч., Колк Ю. В., Фрорип А. Г. // Труды ИФ АН ЭССР. 1985. Т. 57. С. 7—36.
- [10] Абрамов В. Н., Фрорип А. Г. // Труды ИФ АН ЭССР. 1987. Т. 61. С. 164—171.
- [11] Васильченко Е. А., Лущик Н. Е., Лущик Ч. Б. // ФТТ. 1970. Т. 12. № 1. С. 211—215.
- [12] Лущик Н. Е., Соовик Х. А. // Труды ИФ АН ЭССР. 1974. Т. 42. С. 61—80.
- [13] Лущик Ч. Б., Васильченко Е. А., Колк Ю. В., Лущик Н. Е. // Труды ИФ АН ЭССР. 1983. Т. 54. С. 38—72.
- [14] Vasilchenko E. A., Lushchik N. E., Lushchik Ch. B. // J. Luminescence. 1972. V. 5. N 2. P. 117—131.
- [15] Лущик Н. Е., Васильченко Е. А. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1969. Т. 33. № 6. С. 988—991.
- [16] Tomiki T. // J. Phys. Soc. Jpn. 1967. V. 23. N 6. P. 1280—1296.
- [17] Satpathi S. // Phys. Rev. B. 1986. V. 33. N 11/12. P. 8706—8715.
- [18] Лущик Ч. Б., Кязембе Х. Ф., Луканцев И. Л. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1969. Т. 33. № 5. С. 863—869.
- [19] Delbecq C. Y., Ghosh A., Yuster P. H. // Phys. Rev. 1966. V. 151. N 2. P. 599—609.
- [20] Delbecq C. Y., Toyozawa Y., Yuster P. H. // Phys. Rev. B. 1974. V. 9. N 10. P. 4497—4505.
- [21] Aleksandrov Yu. M., Makhov V. N., Yakimenko M. N. // Nucl. Instrum. Methods A. 1987. V. 261. N 1. P. 153—155.
- [22] Зазубович С. Г., Лийдья Г. Г., Лущик Н. Е. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1965. Т. 29. № 3. С. 373—379.
- [23] Алукер Э. Д., Лусис Д. Ю., Чернов С. А. Электронные возбуждения и радиолоуминесценция щелочно-галогидных кристаллов. Рига: Зинатне, 1979. 251 с.
- [24] Сахс Т. // Изв. АН ЭССР. Сер. физ., мат. 1980. Т. 29. № 1. С. 55—65.
- [25] Бикметов И. Ф., Соболев А. Б. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 1. С. 268—271.