

КОНДЕНСАЦИЯ ЛАНҒАН КҮЙДЕГІ ЗАТТАРДЫҢ ФИЗИКАСЫ ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 535.37

А. Баймаханұлы

Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Алматы

ОСТОВНО-ВАЛЕНТНАЯ И ВНУТРИЗОННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КРИСТАЛЛОВ CsCl

Мақалада CsCl кристалдарын 5–750 К температура аралығында УК-жарықпен, рентген сәулелерімен және электрон шоғымен қоздыру кезіндегі кросс-люминесценция мен зона ішіндегі жарқырауларға жүргізілген зерттеулер нәтижесі келтірілген. Өткізгіштік зонадағы сәуле шығаратын, валенттік 3pCl немесе негізгі зоналардағы 5pCs⁺ өтулерге негізделген 1,7–7,3 эВ облыста жататын люминесценция табылды. Электрондар шоғының қуаты артуы салдарынан кросс-люминесценция қарқындылығы төмендейтіні байқалды. Қысқа ғұмырлы Френкель ақаулардың селективті реабсорциясымен байланыстылығына болжам жасалды. Сондықтан бір кристалдың өзінде өздік люминесценцияның барлық түрі кездесетіні дәлелденді, олар: автожинақылған экситондар жарқырауы, зона ішіндегі люминесценция және кросс-люминесценция.

In this work the research of cross-country and inside-zone luminescence in a wide interval of temperatures 5–750K is carried out at excitation of crystals CsCl by UV-light, x-ray and electronic beam with nanosecond duration. It is found out the luminescence in the field of 1.7–7.3 eV, which is connected with radiation transition in conductivity zone and probably in valence zone 3pCl or country zone 5pCs⁺. The reduction of intensity cross-luminescence is observed at increase of power of electron beam. The assumption is made, that it is connected with selective reabsorption by the short-lifetime of Frenkel defects. Thus in the same crystal it was possible to observe all kinds own luminescence: a luminescence of selftrapped excitons, inside-zone luminescence and cross-country luminescence.

Введение

Для щелочно-галлоидных кристаллов известны три разновидности собственных свечений в регулярных областях кристалла: свечение автолокализованных экситонов (АЛЭ), внутризонная люминесценция (ВЗЛ) и кросс-люминесценция (КЛ) (остовно-валентная люминесценция). Наибольший квантовый выход (η) при низких температурах (4–80 К) получен для свечения АЛЭ, которые образуются как при прямом оптическом создании экситонов, так и при рекомбинации электронов с автолокализованными дырками [1, 2]. Излучательные переходы электронов между уровнями зоны проводимости или уровнями валентной зоны в облучаемых кристаллах (электронная ВЗЛ и дырочная ВЗЛ) [3, 4] имеют длительность порядка пикосекунды и наблюдаются в широком диапазоне температур, но их интегральная эффективность мала (около 10^{-4} фотона на одну электронно-дырочную пару).

В последние годы детально изучают также излучательные переходы между электронами анионной валентной зоны и дырками, создаваемыми коротковолновой радиацией в остовой катионной зоне. Эта так называемая кросс-люминесценция, или остовно-валентная люминесценция, в далекой вакуумной области спектра была описана для LiF в пионерской работе [5]. В удобной для практических применений спектральной области 2–8 эВ кросс-люминесценция была опознана по характерным спектрам возбуждения КЛ синхротронной радиацией для кристаллов BaF₂ [6] и CsBr [7], а в дальнейшем во многих простых и сложных галогенидах металлов [8–17]. В [13] было обнаружено, что эффективность КЛ в BaF₂ при облучении α -частицами значительно меньше, чем при возбуждении электронами или фотонами. Используя эту особенность КЛ и регистрируя для LiBaF₂ одновременно кросс-люминесценцию и свечение АЛЭ, которые к тому же имеют различные длительности, была разработана ме-

тодика селективного измерения γ -лучей и тяжелых частиц в смешанных гамма-нейтронных потоках [14, 15]. Механизм практически важного явления — понижения эффективности КЛ при облучении электронами большой плотности — установлен не был. В опубликованных до настоящего времени работах явления КЛ и внутризонной люминесценции (ВЗЛ) изучались порознь, на разных соединениях (КЛ — на системах BaF_2 , CsCl , CsBr , CaCsCl_3 и др., ВЗЛ — на кристаллах NaCl , KCl , RbCl и др.).

Выбирая в качестве основного исследования кристаллы CsCl , мы хотели попытаться одновременно зарегистрировать и количественно изучить оба явления (КЛ и ВЗЛ) в широком диапазоне температур ($5 \div 750$ К), включающем в себя, в частности, и область полиморфного перехода (740 К) кристалла CsCl от низкотемпературной модификации с объемно-центрированной решеткой (координационное число 8) к высокотемпературной модификации с гранецентрированной решеткой (координационное число 6), а также рассмотреть зависимость эффективности КЛ от плотности возбуждения. Наша задача облегчалась тем, что для изучаемых нами кристаллов CsCl предварительно были подробно изучены и исследованы различные виды обычных экситонных и рекомбинационных свечений в регулярных (бездефектных) участках кристалла, а также примесных свечений, связанных с введением в CsCl ионов Br^- , I^- , Ba^{2+} , In^+ , Tl^+ и др. [18, 19].

Объекты исследования и методика эксперимента

Для достижения поставленной цели были проведены измерения спектров излучения во всем доступном нам интервале энергий квантов — от 1,7 до 7,5 эВ и интервале интенсивностей вплоть до минимально регистрируемых. Для измерений использованы монокристаллы CsCl , выращенные в Институте физики Тартуского университета модифицированным методом Стокбаргера (см. подробнее [18]). После вырезания из готового кристалла пластинок размером $15 \times 15 \times 2,5$ мм они отжигались при 690 К для ликвидации наведенных обработкой дислокаций и точечных дефектов. Измерения спектров свечения в области $2 \div 6$ эВ при возбуждении X-лучами при 5 К показали, что, кроме описанных в [20] трех собственных свечений (см. далее), кристаллы CsCl содержали все же и примесные свечения 3,15 и 3,7 эВ, за которые ответственны в основном ионы Rb^+ и ионы Br^- .

При 5 К возбуждение образцов осуществлялось излучением рентгеновской установки АРОС-50 (50 кВ, 3 мА, W) или дейтериевой лампы ЛДД-2 в сочетании с монохроматором VNM-3. Свечение кристаллов разлагалось монохроматором МДР-23 и регистрировалось ФЭУ-106, работающим в режиме счета фотонов [18, 19]. В интервале температур от 80 до 750 К возбуждение производилось импульсами электронного пучка (300 кВ, 3 нс, 100 А см^{-2}), генерируемого разработанным Месяцем и Ковальчуком [21] генератором ГИН-600. Излучение образцов регистрировалось ФЭУ 9863 ВГ, соединенного с осциллографом С1-75, телекамерой и компьютером РС АТ [22]. Все необходимые поправки в спектры внесены.

Собственные свечения кристаллов CsCl

На рисунке 1 представлены спектры излучения кристаллов CsCl и RbCl , измеренные при разных видах возбуждения и различных температурах. При возбуждении CsCl при 5 К в области создания электронно-дырочных пар фотонами с энергией 9,0 эВ ниже порога возбуждения КЛ (14,1 эВ [9, 10, 17]) наблюдается широкая полоса свечения триплетных экситонов с максимумом при 2,9 эВ (кривая 2 на рис. 2а [18, 19]). На схематизированной зонной диаграмме для CsCl (рис. 2) соответствующие переходы изображены стрелкой 3. В более коротковолновой области спектра, где по аналогии с CsBr можно было ожидать появления σ -люминесценции автолокализованных экситонов, полосы с интенсивностью выше фона тракта регистрации обнаружить не удалось.

Возбуждение кристаллов CsCl рентгеновскими лучами при 5 К (кривая 1 на рис. 1а) выявляет наряду с полосой π -люминесценции при 2,9 эВ интенсивные полосы КЛ с максимумами при 4,6 и 5,2 эВ, обусловленные переходами $3p\text{Cl}^- \rightarrow 5p\text{Cs}^+$ [9, 10, 17] (переходы 5 на схеме рис. 2). При возбуждении импульсами электронного пучка спектр CsCl еще более усложняется: помимо полос КЛ выявляются бесструктурное широкополосное свечение с коротковолновым краем около 7,3 эВ, полоса при 2,5 эВ и свечение с энергией квантов меньше 2 эВ. Длительность всех перечисленных свечений, за исключением π -свечения экситонов, короче временного разрешения установки (2 нс), в силу чего они легко фиксируются при наносекундной регистрации, но из-за субмиллисекундного времени затухания π -люминесценции полоса при 2,9 эВ в спектре не проявляется.

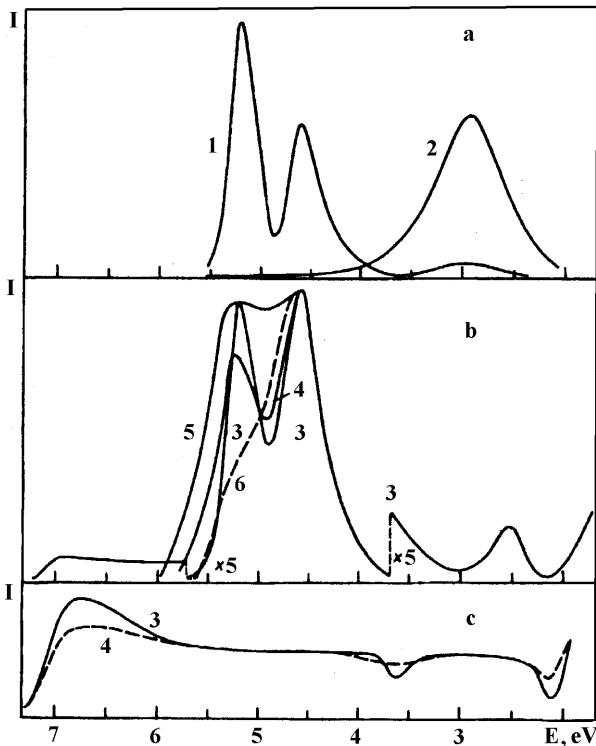


Рис. 1. Спектры излучения кристаллов CsCl (a, b) и RbCl (c), измеренные при возбуждении рентгеновскими лучами (a, 1) фотонами с энергией 9,0 эВ (a, 2) при 5 К или импульсами электронного пучка (b, c) при 80 (5), 300 (4), 690 (5) и 750 К (6), нормированные по максимуму при 4,6 эВ

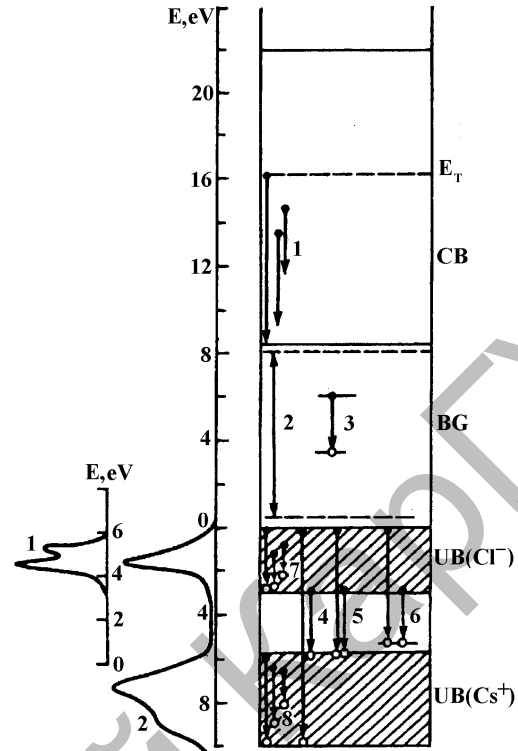


Рис. 2. Спектры кросслюминесценции при 300 К (1) и фотоэлектронной эмиссии по [12] (2) и схематизированная зонная схема CsCl. Стрелками изображены переходы, обуславливающие внутризонную электронную (2), внутризонную дырочную (7, 8) люминесценцию, свечение (возбуждение) нерелаксированных (2) и релаксированных (3) экситонов и кросс-люминесценцию, возникающую при рекомбинации нерелаксированных электронов $3pCl^-$ -зоны с нерелаксированными (4), релаксированными (5) и автолокализованными (6) дырками $5pCs^+$ -зоны. E_T — пороговая энергия создания горячими электронами экситонов

Особенности поведения и природа свечений кристаллов CsCl с изменением температуры образца

Коротковолновая область спектра, представленная в увеличенном масштабе на рисунке 3, содержит широкополосное свечение и полосу при 6 эВ, появляющуюся только после предварительного облучения кристалла CsCl. По характерной бесструктурности широкополосное свечение может быть интерпретировано как внутризонная электронная люминесценция [3] (переходы 1 на схеме рис. 2). Спектр последней для RbCl представлен на рисунке 1c и измерен при возбуждении импульсами электронного пучка при 80 и 300 К (фон рассеянного света при измерении свечения RbCl почти в 300 раз ниже интенсивности широкополосного свечения). Наблюдаемые провалы в спектре в области 3,6 и 2,1 эВ обусловлены реabsорбцией наводимых радиацией короткоживущих H- и F-центров. Выход широкополосного свечения RbCl, оцененный по известному выходу люминесценции CsI [23], составил $4,8 \cdot 10^{-4}$ и оказался сравнимым со значением выхода внутризонной электронной люминесценции [3] других щелочно-галогидных кристаллов — $(5-7) \cdot 10^{-4}$. Если принять, что широкополосное свечение и «фон» в области 3 и 2 эВ, в последнем случае пониженный реabsорбцией излучения F-центрами, имеют одну природу, то выход свечения составит $4 \cdot 10^{-4}$. Поэтому мы полагаем, что в CsCl во всем измеренном спектральном диапазоне присутствует внутризонная электронная люминесценция. Вайсбург с сотрудниками показал [3], что выход ее не зависит от температуры, а коротковолновый край ее должен ограничиваться порогом (E_T на схеме рис. 2) эффекта создания горячими электронами вторичных возбуждений в случае CsCl и RbCl экситонов и, следовательно, находиться в об-

ласти 7,8 и 7,6 эВ соответственно. Расположение края в области 7,3–7,2 эВ обусловлено, наиболее вероятно, реабсорбцией излучения, поглощением ионами хлора около короткоживущих F-центров (β -поглощением).

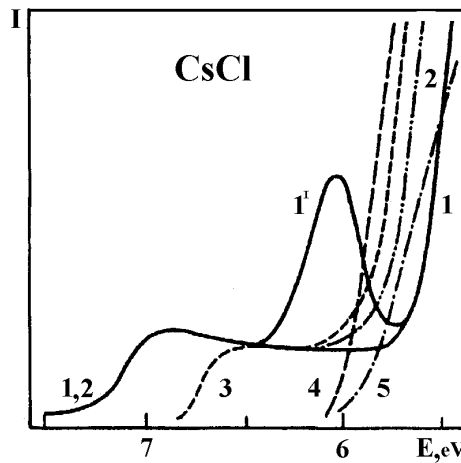


Рис. 3. Коротковолновая область спектра излучения CsCl, измеренная при импульсном возбуждении при 80 (1), 300 (2), 420 (3), 690 (4) и 750 К (5). Спектр 1' получен после предварительного облучения образца 60 импульсами

При повышении температуры выше комнатной край бесструктурного свечения CsCl резко смещается в длинноволновую сторону и при 420 К находится в области 6,6 эВ (кривая 3 на рис. 3) при отсутствии понижения «фона» около 3 и 2 эВ. Резкий сдвиг края мы объясняем тем, что в CsCl в области 400 К идет, как известно, интенсивное создание одиночных анионных вакансий (α -центров), как в результате распада бивакансий, так и в результате более сложных ассоциаций анионных и катионных вакансий. Согласно [19] максимум поглощения α -центров в CsCl расположен при 6,8 эВ. Второй скачок края внутризонной люминесценции (до 6,1 эВ) наблюдается при дальнейшем нагреве образца до 560–580 К. Так как в хлоридах щелочных металлов поглощение междоузельных ионов хлора (I-центров) лежит в области 6,1–6,4 эВ, не исключено, что в CsCl в указанной области температур осуществляется тепловое создание анионных дефектов Френкеля (пар α - и I-центров), которые реабсорбируют внутризонную люминесценцию в области 7,2±0,6 эВ.

В области 6±3 эВ доминирует кросс-люминесценция, отсутствующая в RbCl и не возбуждаемая фотонами 9,0 эВ (рис. 1). По нашим данным, она в 60–70 раз интенсивнее ВЗЛ и при 300 К ее выход равен $3 \cdot 10^{-3}$ (для аналогичного свечения BaF₂ выход равен $2 \cdot 10^{-3}$ [13]). Из-за существенного различия в интенсивностях и отсутствия структуры у ВЗЛ она практически не искажает спектр КЛ. При повышении температуры CsCl пик КЛ при 4,6 эВ несколько уширяется в коротковолновую сторону, а длинноволновый край ее, определяющий низкоэнергетическую границу спектра КЛ и простирающийся вплоть до 3,1 эВ, в пределах ошибки эксперимента не изменяет своей формы вплоть до 750 К. Интенсивность полосы в интервале от 200 до 750 К остается практически постоянной (кривая 1 на рис. 4)¹.

В противоположность этому полоса при 5,2 эВ значительно изменяется как по интенсивности, так и по форме (рис. 1b; рис. 4), в результате чего высокотемпературный край КЛ с нагревом образца смещается в коротковолновую сторону и в температурном интервале от 80 до 400 К скорость его смещения составляет $6,5 \cdot 10^{-4}$ эВ·К⁻⁴ (см. также [9]). Для сравнения отметим, что скорость температурного смещения самой длинноволновой экситонной полосы в CsCl, по данным [24], равна $6,7 \cdot 10^{-4}$ эВ·К⁻¹. Резкое уменьшение интенсивности пика при 5,2 эВ происходит в области температуры полиморфного перехода (кривая 5 на рис. 1,6; кривая 2 на рис. 4) в согласии с данными [25], где приведены качественные спектры излучения кристаллов CsCl при 300 и 780 К. Эффект несомненно связан с изменением анионного окружения ионов Cs²⁺ (при $T < 740$ К вокруг Cs²⁺ расположено 8 ионов, при $T > 740$ К — только 6). Аналогичное изменение спектра КЛ при введении ионов цезия в кристалл RbCl наблюдалось в [26] и следует из теоретических расчетов [27].

¹При использовании толстых кристаллов в области 550–650 К наблюдается повышение интенсивности свечения до 40 %, связанное с повышением отражения свечения от нижележащих слоев из-за температурного градиента. На тонких слоях эффект отсутствует.

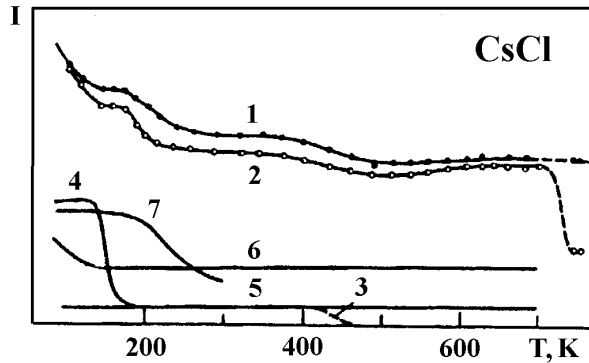


Рис. 4. Температурное тушение свечения CsCl при возбуждении импульсами электронного пучка в области энергий фотонов 4,6 (1), 5,2 (2), 6,6 (3), 6,0 (4), 3,0 (5), 2,5 (6) и 1,7 эВ (7)

На рисунке 2, помимо зонной схемы CsCl, приведены также спектр КЛ при 300 К (кривая 1) и спектр фотоэлектронной эмиссии по [12], измеренный при облучении пленок CsCl синхротронным излучением с энергией фотонов 100 эВ (спектральное разрешение — 0,2 эВ, разрешение анализатора энергии электронов — 0,4 эВ, за начало отсчета принята энергия электронов, выбиваемых светом из верхних состояний валентной зоны). Для удобства сравнения спектры смещены до совпадения положения пика КЛ при 4,6 эВ и пика фотоэлектронной эмиссии при 1,7 эВ. Сравнение спектров показывает, что длинноволновый край КЛ, вплоть до максимума при 4,6 эВ, хорошо повторяет ход спектра фотоэмиссии от дна валентной зоны до максимума; расхождение спектров в области 5,6÷6,0 эВ вполне объяснимо различием в разрешающей способности методик. Наиболее резкие различия видны в области пика КЛ при 5,2 эВ, хотя в спектре фотоэмиссии [28] «припухлость» в ожидаемой области имеется. Из рисунка 2 видно также, что ширина спектра КЛ на 1/30 от высоты пиков составляет 2,8 эВ и практически соответствует ширине валентной зоны $3pCl^-$. Отсутствие уширения спектра КЛ (переходы 4 и 5 на рис. 2) за счет большой ширины (4,5 эВ [12]) остоной зоны $5pCs^+$ приводит к заключению, что до рекомбинации электронов из $3pCl^-$ — зоны с дырками $5pCs^+$ — зоны последние успевают после создания их пучком электронов испытать полную (или почти полную) колебательную релаксацию и «всплыть» к потолку остоной зоны (переходы 5 на рис. 2). Это естественно, так как время затухания КЛ (0,88 нс [17]) значительно длиннее времен релаксационных процессов в зонах ($<10^{-12}$ с). Не исключено, что излучательные переходы электронов из $3pCl^-$ -зоны осуществляются на автолокализованную на ионе цезия дырку. В связи с последним интересно отметить, что введение ионов Va^{2+} в CsCl до 10^{-5} молярных долей приводит к смещению длинноволнового края КЛ в низкоэнергетическую сторону на 0,15 эВ на полувысоте пика при 4,6 эВ без заметного сдвига положения максимумов полос при облучении образца импульсами электронного пучка при 80 К, при 300 К спектры КЛ CsCl и CsCl-Va совпадают. Этот факт свидетельствует о локализации дырки на катионной вакансии, что и обуславливает длинноволновый сдвиг КЛ.

Поведение интенсивностей пиков КЛ с температурой образцов представлено на рисунке 4 (кривые 1, 2). Видно, что тушение свечения происходит не монотонно, как следовало бы из зависимости оже-процессов от температуры [5], а более сложным образом. Для детального объяснения этого следует рассматривать и другие протекающие при возбуждении CsCl процессы [18, 19]. В длинноволновой области спектра при 80 К наблюдаются полоса при 2,5 эВ и начало полосы излучения ниже 2 эВ (рис. 1б), часть последней тушится в области температур 200÷300 К (рис. 4, кривая 7). Полоса при 2,5 эВ испытывает незначительное тушение в области 80÷120 К, после чего не изменяется по интенсивности вплоть до 700 К. Высокая температурная устойчивость и короткое время затухания свечения при 2,5 эВ позволяют связать ее с внутризонными переходами. Такое предположение не противоречит и тому, что энергетический выход свечения не превышает $3 \cdot 10^{-5}$ и по значению близок к приводимому в [16] для внутризонной дырочной люминесценции CsI ($2 \cdot 10^{-5}$). В принципе в области энергий квантов ниже 3 эВ в CsCl может наблюдаться внутризонная люминесценция при переходах как в валентной зоне $3pCl^-$ (7 на рис. 2), так и в остоной зоне $5pCs^+$ (8 на рис. 2). К сожалению, мы пока не можем исключить и того, что в наших кристаллах CsCl присутствуют ионы рубидия в концентрации порядка 10^{-5} молярных долей, вследствие чего в указанную область могут вносить вклад и излучательные переходы $5pCs^+ - 5pRb^{2+}$. Выбор между этими возможностями требует продолжения исследований.

*Зависимость эффективности кросс-люминесценции
от плотности облучения электронами*

Была предпринята попытка промоделировать большую плотность создания электронно-дырочных пар, используя мощные одиночные импульсы электронного пучка ГИН-600, варьируя плотность тока от 10 до 130 $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$. Такие импульсы создавали в CsCl объемные плотности возбуждения от $2\cdot 10^{18}$ до $2,6\cdot 10^{19}$ $\text{эВ}/\text{cm}^3$. На рисунке 5 приведен спектр свечения, возбуждаемого в CsCl быстрыми (3 нс) импульсами электронного пучка при 295 К. Для выделенных двойным монохроматором свечений 4,5 и 5,15 эВ были измерены зависимости их интенсивностей от плотности тока.

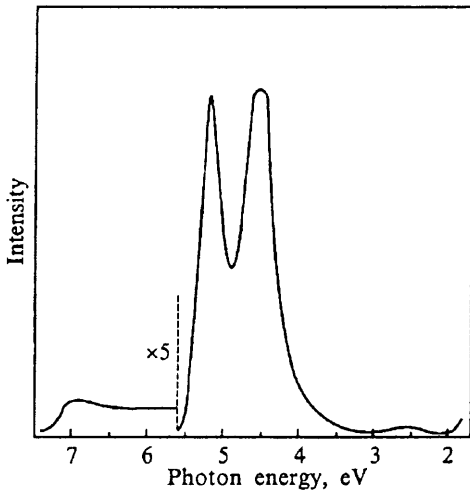


Рис. 5. Спектр быстрых свечений ($\tau \leq 2$ нс) кристалла CsCl при облучении импульсами электронного пучка (300 кэВ, $90 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$) при 295 К

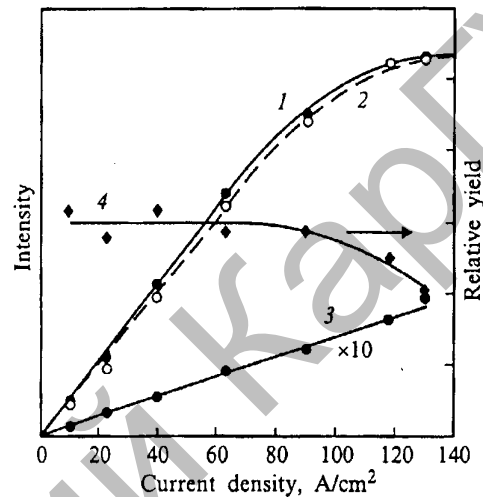


Рис. 6. Зависимости интенсивностей кросс-люминесценции 4,5 (1) и 5,15 эВ (2) и внутризонной люминесценции при 2,5 эВ от плотности тока в импульсе электронного пучка при 295 К. Кривой 4 представлен относительный выход кросс-люминесценции, определенный как отношение интенсивностей кросс-люминесценции (4,5 эВ) и внутризонной люминесценции (2,5 эВ)

Как следует из рисунка 6, в области $10\div 60 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($2\cdot 10^{18}\div 1,2\cdot 10^{19} \text{ эВ}/\text{cm}^3$) интенсивность обеих полос кросс-люминесценции линейно возрастает при увеличении плотности тока. Однако в области $90\div 140 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($1,8\cdot 10^{19}\div 2,6\cdot 10^{19} \text{ эВ}/\text{cm}^3$) наблюдается характерная сублинейность, свидетельствующая, что в этих условиях эффективность возбуждения кросс-люминесценции резко уменьшается. Ситуация при облучении мощным электронным импульсом $130 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ оказалась близкой к ситуации при облучении высокоэнергетичными (6 МэВ) протонами. Отметим, что слабая внутризонная быстрая ($\tau < 10^{-10}$ с) люминесценция кристаллов CsCl, регистрируемая в широкой области спектра (от 1,8 до 7,2 эВ), линейно зависит от плотности тока (рис. 6). На рисунке 6 приведена также зависимость эффективности КЛ 4,5 эВ от плотности тока. При плотности тока $130 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ она уменьшается в 1,5 раза. По нашим оценкам, в CsCl при облучении импульсами электронов энергетическая эффективность кросс-люминесценции $3\cdot 10^{-3}$ $\text{эВ}/\text{эВ}$. Отмеченное понижение интенсивности полос КЛ может быть связано с реабсорбцией излучения наводимыми радиацией дефектами. Если принять другую гипотезу, связывающую свечение при 6 эВ с излучательными переходами $3p\text{Cl}^- \rightarrow 5p\text{Cs}^+$ при больших дозах облучения в нарушенных местах решетки [19], то оценки дают, что эффективность КЛ «дефектных» центров должна быть, по крайней мере, на два порядка выше эффективности «обычных» центров КЛ; при этом длина свободного пробега дырки в катионной зоне должна превышать 10а. Измерение спектров возбуждения свечения при 6 эВ в широкой области спектра (7÷15 эВ) должно помочь сделать выбор между этими интерпретациями.

Заключение

Таким образом, на одном и том же кристалле CsCl нам удалось наблюдать несколько видов собственной люминесценции: свечение автолокализованных экситонов (2,9 эВ; подробнее см. [18, 19]); внутризонную люминесценцию в зоне проводимости и, вероятно, в валентной зоне $3p\text{Cl}^-$ или остов-

ной зоне $5pCs^+$; кросс-люминесценцию при рекомбинации электронов из $3pCl^-$ зоны с релаксированными до потолка остоной $5pCs^+$ -зоны (или автолокализованными) дырками.

В дальнейшем, используя метод пикосекундной спектроскопии, необходимо осуществить поиск слабой «горячей» кросс-люминесценции $CsCl$ в области $h\nu > 6$ эВ при рекомбинации электронов с не испытывавшими колебательной релаксации дырками в $5pCs^+$ -зоне. Наблюдаемые нами эффекты селективной реабсорбции широкополосной внутризонной люминесценции короткоживущими радиационными дефектами (F-, H-, α -, I-центрами) могут открыть, по нашему мнению, новые метрические возможности для количественного изучения дефектов Френкеля в ионных кристаллах.

Выражаю глубокую благодарность Ч.Б.Луцику за постоянный интерес к работе и ценные замечания, а также А.Ч.Луцику и А.Кикас за обсуждение результатов.

Список литературы

1. *Lushchik Ch.B.* Excitons / Ed. by E.I.Rashba, M.D.Sturge. Ch. 12. — North-Holland, Amsterdam, 1982.
2. *Song K.S., Williams R.T.* Self-Trapped Excitons. — Springer-Verlag, Berlin, 1993.
3. *Вайсбург Д.И., Семин Б.Н.* // Изв. РАН. Сер физ. — 1992. — Т. 37. — № 2. — С. 103–106.
4. *Луцик Ч.Б., Луцик А.Ч., Васильченко Е.А., Савихин Ф.А.* // ФТТ. — 1995. — Т. 37. — № 2. — С. 525–530.
5. *Майсте А.Л., Саар А.А., Эланго М.А.* // ФТТ. — 1974. — Т. 16. — № 6. — С. 1720–1723.
6. *Александров Ю.М., Махов В.Н. и др.* // ФТТ. — 1984. — Т. 26. — № 6. — С. 2865–2867.
7. *Александров Ю.М., Куусманн И.Л. и др.* // ФТТ. — 1987. — Т. 29. — № 4. — С. 1026–1029.
8. *Makhov V.N.* // Nucl. Instr Methods A. — 1991. — Vol. 308. — P. 187–189.
9. *Kuusmann I., Kloiber T., Laasch W., Zimmerer G.* Radiat. Effects and Defects in Solids. — 1991. — V. 119. — P. 21–26.
10. *Родный П.А.* // ФТТ. — 1992. — Т. 34. — № 7. — С. 1975–1978.
11. *Makhov V., Becker J. et al.* // Radiat. Effects and Defects in Solids. — 1995. — Vol. 135. — P. 349–355.
12. *Kamada M., Aita O. et al.* // Phys. Rev. B. — 1992. — Vol. 45. — № 22. — P. 12725–12729.
13. *Kubota S., Kanai N., Kuan J.* // Phys. Stat. Sol (b). — 1987. — Vol. 139. — № 2. — P. 635–642.
14. *Rvan C.W.* // Eijk. Nucl. Instr. Methods. — 1997. — Vol. A392. — P. 285–288.
15. *Combos C.M., Dorenbos P., Hollander R.W., Evan C.W.* // Eijk. Nucl. Instr. Methods A. — 1998. — Vol. 416. — P. 364–367.
16. *Алукер Э.Д., Гаврилов В.В., Дейч Р.Г., Чернов С.А.* // Письма в ЖЭТФ. — 1988. — Т. 47. — № 2. — С. 116–117.
17. *Itoh M., Kuboto S., Ruan (Gen) J., Hashimoto S.* // Rev. Solid St. Scien. — 1990. — Vol. 4. — № 23. — P. 467–477.
18. *Ибрагимов К., Луцик А.Ч., Луцик Ч.Б. и др.* // ФТТ. — 1992. — Т. 34. — № 10. — С. 3161–3169.
19. *Ибрагимов К., Луцик А.Ч., Луцик Ч.Б. и др.* // ФТТ. — 1992. — Т. 34. — № 11. — С. 3421–3428.
20. *Lushchik A., Feldbach E.* // J. Lumin. — 1995. — Vol. 63. — P. 273–276.
21. Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков / Под ред. Г.А.Месяца. — Новосибирск, 1976.
22. *Битов В.И., Савихин Ф.А.* // Труды ИФ АН ЭССР. — 1987. — Т. 61. — С. 93–104.
23. *Pooley D., Runciman W.A.* // Phys. C. Solid St. Phys. — 1970. — Vol. 3. — № 8. — P. 1815–1824.
24. *Nosento I., Reguzzoni E.* // Phys. Rev. B. — 1979. — Vol. 19. — № 4. — P. 3214–3220.
25. Акерман С. Г., Горн А. К., Елисеев О.И. // Оптика и спектроскопия. — 1988. — Т. 42. — № 3. — С. 583–585.
26. *Voloshinovskiy A.S., Mikhailik V.B., Rodnyi P.A.* // Int. Conf. on Defects in Ins. Mater: Abstr. — 1992. — P. 119.
27. *Janons J., Rachko Z. et al.* // Ibid. — P. 101.
28. *Poole R.T., Jenkin J., Leckey R.C.* // Phys. Rev. B. — 1975. — Vol. 11. — № 12. — P. 5179–5189.
29. *Rachko Z., Jansons J., Valbis J.* // Sixth Europish Top Conf.: Lattice Defects in Ins. Mater. Sept.: Abstracts. — 1990. — P. 163.