

УДК 535.37

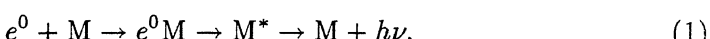
©1993

ЭКСИТОННЫЙ МЕХАНИЗМ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПРИМЕСНЫХ ЦЕНТРОВ В КРИСТАЛЛАХ CsCl

К.У.Ибрагимов, А.Ч.Луцик, Ч.Б.Луцик, А.Г.Фролин, Е.А.Шашина

Для кристаллов CsCl-In и CsCl-Rb при 5–80 К исследованы процессы возбуждения экситонами люминесценции In^{+} - и Rb^{+} -центров. Показано, что благодаря существованию между состояниями свободных и автолокализованных экситонов активационного барьера пробеги экситонов при 5 К достигают 350 постоянных решеток. Выделены промежуточные стадии экситонного механизма при возбуждении или ионизации анионов рядом с Rb^{+} и In^{+} . В CsCl-In при релаксации околопримесных возбуждений обнаружены проявления фотонного умножения.

1. Еще в пятидесятые годы для щелочно-галоидных кристаллов (ШГК) было обнаружено, что селективное создание ультрафиолетовой радиацией экситонов приводит к ионизации F -центров [1] и появлению люминесценции примесных центров [2]. Применительно к кристаллам KI и CsI, легированным ионами M (In^{+} или Tl^{+}), предложена следующая реакция возбуждения свечения $h\nu$ с участием свободных экситонов e^0 :



где возбужденное состояние примеси обозначено M^* . Промежуточная стадия этой реакции (e^0M) может быть создана при возбуждении анионов, расположенных рядом с примесными ионами (в области, получившей название околопримесного D -поглощения) [2–4]. В дальнейшем выяснилось, что в ШГК после рождения экситоны переходят в неподвижное автолокализованное состояние, что могло бы затруднить осуществление реакции (1). Было показано, однако, что реакция (1) реализуется даже при 4 К. Этому благоприятствует наличие между состояниями свободных экситонов (СЭ) и автолокализованных экситонов (АЛЭ) активационного барьера [5–8].

Хотя экситонные механизмы часто привлекаются при интерпретации процессов передачи энергии примесным центрам в твердых телах, конкретные стадии осуществления реакции (1) до сих пор не детализированы. Особый интерес представляет изучение реакции (1) при низких температурах для легированных кристаллов хлоридов щелочных металлов NaCl [9], KCl [10], RbCl [11] и CsCl [12], где околопримесные D -возбуждения спектрально хорошо отделены от примесных возбуждений, а активационный барьер при автолокализации экситонов пока не обнаружен.

Цель настоящей работы: на кристаллах CsCl высокой чистоты [13], кристаллах CsCl-In с примесными и околопримесными электронными воз-

будждениями и кристаллах CsCl-Rb, в которых существуют только око-лопримесные возбуждения, изучить особенности экситонного механизма возбуждения люминесценции примесных центров в простых кубических кристаллах CsCl со структурой $B1$ и сравнить с изученными ранее гра-нецентрированными кубическими кристаллами KCl со структурой $B1$.

2. Основная экспериментальная установка описана в [13,14]. Кристалл помещался в вакуумный криостат. Возбуждение люминесценции в обла-сти 4-10 эВ осуществлялось дейтериевой лампой через монохроматор $VMN = 3$. В актуальной области спектра 8 эВ оптическая ширина щелей 70 мэВ. Проходившее через кристалл миллиметровой толщины све-чение регистрировалось через монохроматор МДР-23 фотоумножителем ФЭУ-106 в режиме счета фотонов. Сканирование и регистрация спек-тров возбуждения люминесценции и спектров люминесценции с внесени-ем всех необходимых поправок были компьютеризированы.

Кристаллы CsCl выращены из расплава методом Стокбаргера с ме-дленным прохождением области полиморфного перехода $B1 \rightarrow B2$, ко-торый сопровождается изменением координационного числа ($6 \rightarrow 8$) и уменьшением объема кристалла на 17%. Лучшее коммерческое сырье до-полнительно подвергалось глубокой очистке обработкой расплава хлор-ом (для удаления ионов Vg^- и I^-) и 60-кратной зонной плавкой, что сни-жало содержание поливалентных ионов до 10^{-8} молярных долей, а со-держание ионов Na^+ и I^- — до 10^{-6} . Однако даже лучшие кристаллы со-держали до 10^{-5} ионов Vg^- , а также ассоциации вакансий. Легиро-ванные ионами Rb^+ и In^+ кристаллы выращивались из очищенного сы-рья методом Стокбаргера. Концентрация ионов In^+ в кристалле опре-делялась по спектрам примесного поглощения с использованием форму-лы Смакулы-Декстера и определенной для KCl-In силе осциллятора в C -полосе $f_c = 0.57$ [15]. Концентрацию ионов Rb^+ в кристалле определя-ли с учетом коэффициента распределения расплав-кристалл (0.8).

3. На рис. 1 приведен по [16] спектр отражения кристалла CsCl при 10 К. Основные максимумы 7.860, 7.936, 8.008, 8.086 и 8.184 эВ соот-ветствуют созданию близких по энергии p^5s - и p^5d -экситонов с p^5 -дырочной и s - или d -электронной компонентами. Учитывая различные по знаку и величине сдвиги пиков отражения CsCl при изменении температуры в [17],

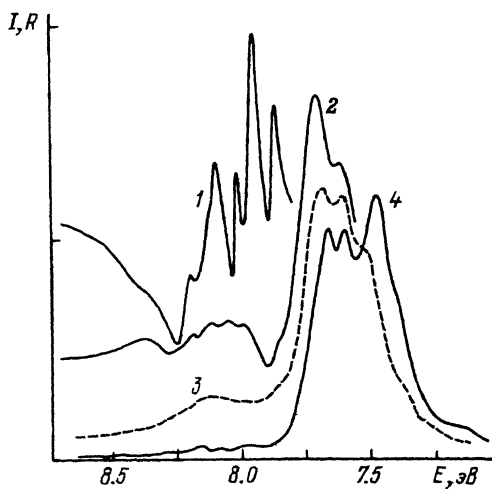


Рис. 1. Оптические характеристики кристаллов CsCl (1,2) и CsCl-Rb (3,4).

Спектр отражения при 10 К (1); спектры возбуждения люминесценции 2.6 ± 0.04 (2), 3.2 ± 0.04 (3) и 3.7 ± 0.04 эВ (4) при 5 К. В области 8 эВ оптическая ширина щелей 5 (1) и 70 мэВ (2, 3)

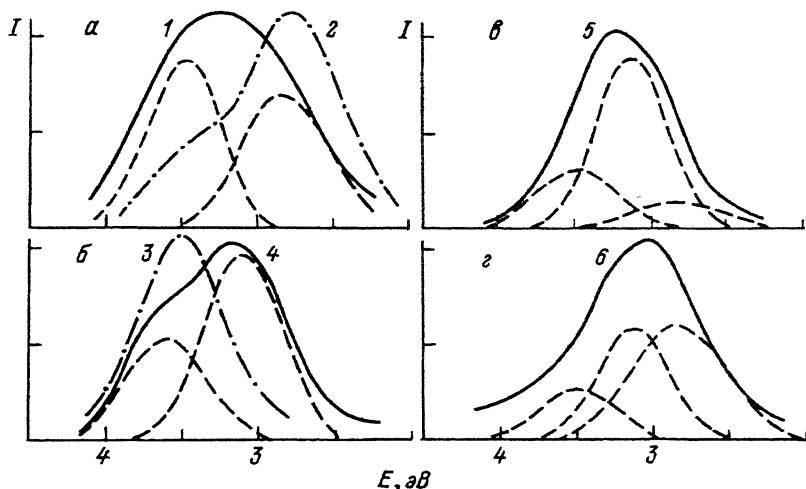


Рис. 2. Спектры люминесценции кристалла CsCl (1-3) при возбуждении фотонами 8.0 ± 0.05 (1, 2) и 7.5 ± 0.03 эВ (3) при 5 (1, 3) и 80 К (2). Спектры люминесценции кристалла CsCl-Rb (4-6) при возбуждении фотонами 7.5 ± 0.03 (4), 7.85 ± 0.03 (5) и 8.95 ± 0.06 эВ (6) при 5 К.

Штриховыми линиями показаны гауссианы, характеризующие элементарные полосы свечения.

первый и четвертый максимумы мы приписали p^5s -экситонам, а второй, третий и пятый максимумы — p^5d -экситонам. Для простоты мы будем пользоваться этой интерпретацией, хотя детальное исследование спектров отражения кристаллов CsI и CsBr при разных гидростатических давлениях показало, что для близких по энергиям p^5s - и p^5d -экситонов такое приближение является грубым [18].

На рис. 2 приведен спектр возбуждения выделенного монохроматором свечения 2.6 эВ для наиболее чистого кристалла CsCl. Как следует из рис. 2,а, для этого кристалла при создании экситонов фотонами 8.0 эВ при 5 К доминируют две полосы люминесценции. Полоса с максимумом $E^I = 2.82$ эВ и полушириной $\delta^I = 0.70$ эВ соответствует, как показал анализ [13-16], π -свечению АЛЭ, а свечение 3.48 эВ (0.60 эВ) в основном обусловлено примесными ионами Br^- . В близкой области спектра (3.55 эВ) в CsCl наблюдается также свечение ионов галоида около ассоциаций вакансий [16]. Как видно из рис. 2,б, свечение в области 3.5 эВ эффективно возбуждается фотонами 7.5 эВ вне области собственного поглощения CsCl. При нагреве кристалла CsCl до 40-80 К соотношение интегральных интенсивностей свечений 3.5 и 2.82 эВ значительно изменяется в пользу свечения АЛЭ (рис. 2,а). Как и в иодидах, и бромидах [6-8,19], в кристаллах CsCl состояния свободных и АЛЭ разделены активационным барьером. При 5 К СЭ имеют настолько большие пробоги, что возбуждают свечение Br^- -центров, концентрация которых не превышает 10^{-5} . Введение в CsCl 10^{-4} молярной доли Na^+ ослабляет при 5 К свечение АЛЭ, а введение 10^{-3} ионов Rb^+ ослабляет свечение АЛЭ в десять раз.

4. На рис. 2,б приведены спектры люминесценции кристалла CsCl-Rb (10^{-3}), измеренные при прямом создании фотонами околорубидиевых электронных возбуждений фотонами 7.5 эВ. В CsCl-Rb доминирует отсутствующая в чистом кристалле CsCl полоса люминесценции 3.12 эВ

(0.55 эВ). Спектр возбуждения этого свечения приведен на рис. 1. Как и в CsBr-Rb [6], наиболее эффективно свечение 3.12 эВ в CsCl возбуждается в области, примыкающей к собственному экситонному поглощению (7.4–7.75 эВ). При оптическом создании p^5s -экситонов фотонами 7.82 или 8.1 эВ интенсивность свечения Rb^+ -центров составляет 0.28 или 0.24 от интенсивности свечения при прямом создании околорубидиевых возбуждений фотонами 7.6 эВ (поглощение света полное). Из приведенного на рис. 2,а спектра люминесценции, возникающей при создании p^5s -экситонов фотонами 7.85 эВ (при облучении фотонами 8.1 эВ спектр практически тот же), видно, что при 5 К свечение Rb^+ -центров в 5 раз интенсивнее, чем свечение АЛЭ. При создании фотонами 8.95 эВ разделенных электронов и дырок (рис. 2,б) интегральное свечение Rb^+ -центров уже слабее свечения АЛЭ. Из рис. 1 следует, что в области межзонных электронных переходов в CsCl при $h\nu > E_g = 8.4$ эВ эффективность возбуждения околорубидиевого свечения в 2–3 раза ниже, чем при облучении в экситонной области. Как и в других ШГК, в CsCl пробеги дырок до автолокализации меньше, чем пробеги свободных экситонов.

5. Экситонный механизм возбуждения люминесценции примесных центров был изучен и для кристалла CsCl-In, содержащего $31 \cdot 10^{-6}$ ионов In^+ . Оптические характеристики этого кристалла при 5, 20 и 40 К приведены на рис. 3,4. При 5 К при прямом возбуждении In^+ -центров с спектрах люминесценции возникают три основные полосы свечения эВ: 2.42(0.25), 2.84(0.28) и 3.42(0.28). Свечение 2.42 эВ возбуждается в области 4.5–6.0 эВ в *A*-, *B*- и *C*-полосах поглощения (рис. 4), которые генетически связаны с электронными переходами $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$, $^1S_0 \rightarrow ^3P_2$ и $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$ в свободных ионах In^+ [20,21], а также в области 6.3–7.7 эВ, которую принято называть *D*-полосой. Спектр возбуждения A_2 -свечения (2.84 эВ) в деталях отличается от спектра возбуждения A_1 -свечения (2.42 эВ), но также охватывает область *A*-, *B*-, *C*- и *D*-полос. Третья полоса люминесценции In^+ -центров (3.42 эВ) не возбуждается в области *A*- и *B*-полос и может быть интерпретирована как *C*-свечение.

По [22], для CsBr-In длинноволновое свечение A_1 поляризовано по оси $\langle 100 \rangle$ и возникает при электронных переходах из тетрагональных минимумов адиабатического потенциала. Коротковолновое свечение A_2 в CsBr-In поляризовано по оси $\langle 111 \rangle$ и осуществляется из тригональных минимумов. Для CsCl-In можно ожидать реализации аналогичной ситуации. При ян-теллеровской трактовке спектров $A_1 = A_T$, а $A_2 = A_X$ при нагреве CsCl-In до 20 К неполносимметричные колебания вызывают существенное изменение в спектрах и резкое ослабление свечения 2.84 эВ. При 40 К, как видно из рис. 3, резко ослабляется *C*-свечение 3.42 эВ.

6. Особый интерес представляла *D*-область возбуждения люминесценции CsCl-In (6.3–7.7 эВ). *D*-полоса обнаружена и исследована для многих ШГК, легированных ртутеподобными s^2 -ионами (Ga^+ , In^+ , Tl^+ , Ge^{2+} , Sn^{2+} , Pb^{2+}) [3,21]. В гомологических рядах ШГК положение *D*-полосы изменяется симбатно с положением экситонных полос чистых кристаллов. Рассматривались три варианта интерпретации *D*-полосы: возбуждение ионов галоида около примесного иона, перенос электрона с иона галоида на ионы щелочного металла или на примесный ион [3]. Реальная ситуация, вероятно, соответствует смешиванию всех трех электронных конфигураций. В коротковолновой части *D*-полос поглощения CsCl-Tl и CsCl-In

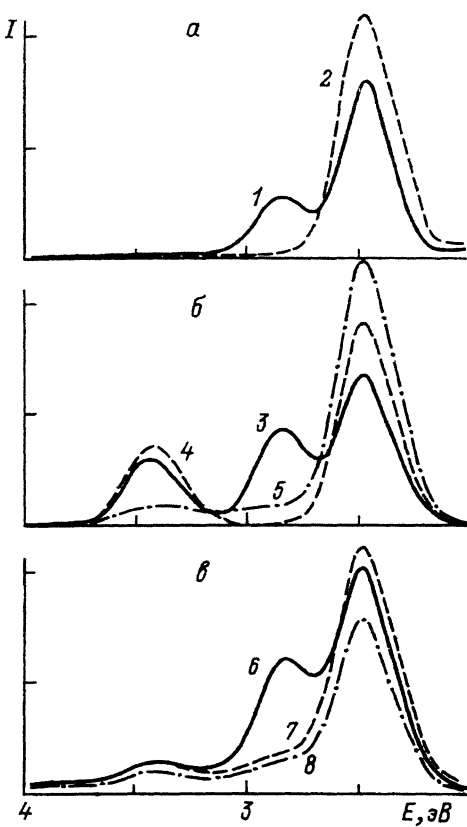


Рис. 3. Спектры люминесценции кристалла CsCl-In при возбуждении фотонами 4.6 ± 0.03 (1, 2), 5.75 ± 0.03 (3-5) и 7.3 ± 0.03 эВ (6-8).

Спектры измерены при 5 (1, 3, 6), 20 (2, 4, 7) и 40 К (5, 8).

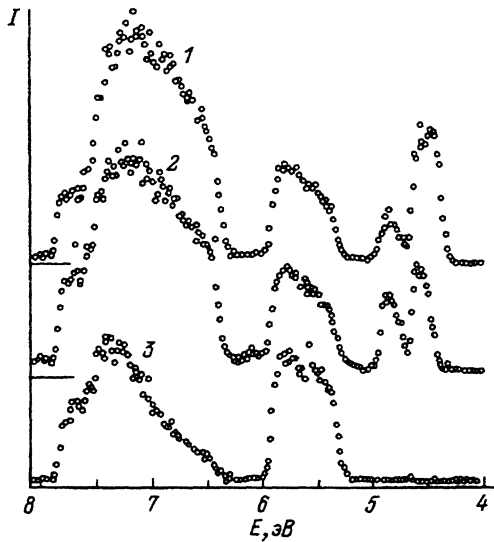


Рис. 4. Спектры возбуждения люминесценции CsCl-In 2.45 ± 0.03 (1), 2.85 ± 0.03 (2) и 3.45 ± 0.03 эВ (3) при 5 К.

после прекращения облучения кристаллов при 5 К фотонами 7.5-7.7 эВ в течение многих минут медленно затухает туннельная люминесценция 2.35 и 2.5 эВ, возникающая после переноса электрона с иона галоида на примесные ионы с образованием Tl^0 , V_K - и In^0 , V_K -пар с участием автолокализованных дырок (V_K). В коротковолновой части D -полосы KCl-Tl и CsCl-Tl возникают также Tl^0 , Tl^{2+} -пары, что свидетельствует о частичной ионизации околопримесных анионов с локализацией электронов на пространственно удаленных от них Tl^+ -центрах. В длинноволновой части D -полосы в основном возбуждается быстрое ($\tau < 1с$) свечение примесных центров.

Как следует из рис. 3, при возбуждении CsCl-In фотонами 7.3 эВ при 5 К видны все три полосы свечения, но контур люминесценции не полностью описывается суммой A_1 -, A_2 - и C -свечений. В области C - и D -полос поглощения в нашем образце происходило полное поглощение возбуждающей радиации. Как следует из рис. 4, при возбуждении в D -полосе интенсивность люминесценции значительно выше, чем при возбуждении в C -полосе. Этот эффект требует специального изучения. Мы встретились

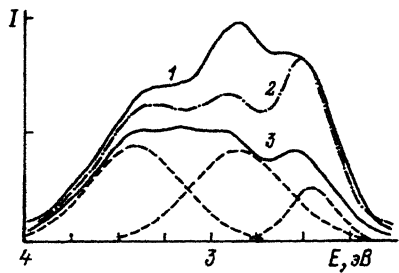


Рис. 5. Спектры люминесценции CsCl-In при возбуждении фотонами 7.86 ± 0.03 эВ при 5(1), 20 (2) и 40 К (3).

Штриховыми линиями показаны гауссианы, характеризующие элементарные полосы для 3.

с интересным случаем последовательного излучения двух фотонов после поглощения одного фотона примесным центром, т.е. с еще одним механизмом фотонного умножения в оптической области спектра (ср.[4,19]). При ионизации хлора рядом с ионом In^+ возможна излучательная рекомбинация одного из двух s -электронов In^+ с галоидной дыркой. Второй фотон рождается при рекомбинации электрона с образовавшимся In^{2+} -ионом. Как следует из рис. 4, эффект наблюдается при измерениях свечения в области 2.42 и 2.84 эВ, но отсутствует в области 3.42 эВ.

7. При оптическом создании в CsCl-In p^5s -экситонов фотонами 7.86 эВ при 5, 20 и 40 К возникает свечение сложного состава (рис. 5). При 40 К в спектре могут быть выделены три основные полосы свечения: люминесценция АЛЭ (2.82 эВ), примесно-дефектное свечение (3.5 эВ) и A_1 -свечение In^+ -центров (2.42 эВ). При 5 К в CsCl-In даже при малой концентрации In^+ -центров ($31 \cdot 10^{-6}$) оптическое создание экситонов ведет к появлению A_1 -, A_2 - и C -свечений, а при 20 К — A_1 - и C -свечений. При оптическом создании экситонов при 5 К фотонами 8.1 эВ суммарное свечение In^+ -центров в 100 раз менее интенсивно, чем при непосредственном создании околоиндиевых возбуждений фотонами 7.3 эВ.

8. В [23,24] для гранецентрированных ШГК исследована возможность определения свободного пробега экситонов до автолокализации по возбуждению экситонами люминесценции примесных центров. Вероятность встречи СЭ с примесным центром p зависит от молярной концентрации примесных центров N , эффективного сечения взаимодействия СЭ с примесным центром σ и среднего пробега экситона до автолокализации l . Простейшая теория дает [24]

$$p = \frac{l\sigma N}{1 + l\sigma N} \quad \text{или} \quad \frac{p}{p-1} = l\sigma N. \quad (2)$$

Величина p определена нами как отношение интенсивностей свечения примесного центра при оптическом создании экситонов и прямом создании околопримесного возбуждения. Для CsCl-Rb с $N = 10^{-3}$ при облучении фотонами 7.82 или 8.1 эВ $p = 0.28$ или $p = 0.24$. По соотношению (2) для CsCl-Rb при 5 К имеем $l\sigma = 330a^3$ или $380a^3$. Для CsCl-In с $N = 31 \cdot 10^{-6}$ мы получили $p = 0.01$, $l\sigma = 320a^3$. В [12] для CsCl-Tl с $N = 50 \cdot 10^{-6}$ мы получили при 5 К $l\sigma = 340a^3$. Из этих данных, принимая эффективное сечение взаимодействия экситона с примесным центром $\sigma = a^2$, можно приблизительно оценить величину пробега экситона до автолокализации при 5 К в CsCl: $l = 350a = 145$ нм.

В таблице мы сопоставили величину l для CsCl при 5 К с величинами l для KCl и RbCl при 5 К и величиной l для NaCl при 80 К [9,10,11].

Характеристики кристаллов хлоридов щелочных металлов при 5 и 300 К: ширина запрещенных зон E_g , положение экситонных полос поглощения E_{ex} , энергия связи экситонов E_B , полная ширина валентных зон E_v , пробег экситонов до автолокализации l , расстояние между ближайшими анионными узлами a , температура отжига автолокализованных дырок T_a

	E_g , эВ	E_{ex} , эВ	E_B , эВ	E_v , эВ	l , а	a , нм	T_a , К
	T , К						
	5			300	5	300	
NaCl	8.75	7.97	0.78	3.0	80	0.396	170
KCl	8.70	7.78	0.92	2.3	<20	0.442	205
RbCl	8.47	7.51	0.96	1.6	<10	0.461	235
CsCl	8.40	7.85	0.55	2.7	350	0.411	185

Для гранецентрированных (В1) кристаллов KCl и RbCl величина l по крайней мере в 10 раз ниже, чем в простом кубическом (В2) кристалле CsCl.

9. В таблице приведены литературные данные о ширине зон запрещенных энергий E_g и положении экситонных полос поглощения E_{ex} при 5 К [19,25,26]. Приведены также полученные фотоэлектрическими методами данные о полных ширинах валентных зон E_v В1-кристаллов [26] и данные о E_v для В2-кристалла CsCl, полученные при изучении спектров кросс-люминесценции при 300 К [27]. Из этой таблицы видно, что при переходе от В1-кристаллов к В2-кристаллу CsCl происходит резкое уменьшение энергии связи экситонов $E_B = E_g - E_{ex}$, резкое расширение валентной зоны и значительное увеличение пробега экситонов до автолокализации. По нашим наблюдениям при переходе от KCl и RbCl к CsCl происходит также при 5 К значительное увеличение пробега дырок до автолокализации. Как следует из таблицы, при переходе от RbCl к CsCl значительно понижается также температура, при которой эффективно идет отжиг автолокализованных дырок в результате их прыжковой диффузии к локализованным на дефектах электронам.

В таблице приведены расстояния между ближайшими анионными узлами в рассматриваемом ряду кристаллов. В ГЦК кристаллах им соответствуют направления $\langle 110 \rangle$, в CsCl — направления $\langle 100 \rangle$. В CsCl анионы расположены значительно ближе друг к другу, чем в KCl и RbCl. Именно это приводит к расширению валентной зоны при переходе от RbCl к CsCl. Так как эффективная масса дырок в ГЦК значительно превосходит эффективную массу электронов, то увеличение в CsCl E_v приводит и к увеличению ширины экситонной зоны, что увеличивает высоту активационного барьера для автолокализации экситонов и величину пробега экситонов до автолокализации (1). По межанионному расстоянию кристаллы CsCl близки к кристаллам NaCl. Как следует из таблицы, многие характеристики CsCl оказываются близкими к характеристикам NaCl. При фазовом переходе В2 \rightarrow В1 в CsCl расстояние между ближайшими анионными узлами возрастает до 0.48 нм. В [25] показано, что при этом резко изменяются спектры фундаментального поглощения, а в [27] по спектрам кросс-люминесценции обнаружено резкое сужение валентной зоны.

10. В заключение отметим, что экситонный механизм возбуждения люминесценции примесных центров несомненно реализуется не только в

ранецентрированных кубических кристаллах иодидов и бромидов щелочных металлов [19,28], но и в простых кубических кристаллах CsCl. Необходимость преодоления активационного барьера при автолокализации экситонов в CsCl обеспечивает при 5 К эффективный перенос энергии экситонами к примесным центрам на расстоянии в сотни постоянных решетки. Становятся необходимыми исследования поляритонных эффектов в кристаллах CsCl высокой чистоты и совершенства.

Авторы благодарны А.Маароосу и О.А.Никифоровой за выращивание кристаллов, а Е.А.Васильченко и Ф.А.Савихину за полезные обсуждения полученных результатов.

Список литературы

- [1] Arker L., Taft E. // Phys. Rev. 1951. V. 81. N 5. P. 698-701.
- [2] Лущик Ч.Б., Лущик Н.Е., Лийдя Г.Г., Тейсс Л.А. // Труды ИФ АН Эст.ССР. 1957. Т. 6. С. 63-81.
- [3] Лущик Н.Е., Лущик Ч.Б., Лийдя Г.Г., Мерилоо И.А. // Труды ИФ АН Эст.ССР. 1964. Т. 28. С. 3-19.
- [4] Ильмас Э.Р., Лийдя Г.Г., Лущик Ч.Б. // Опт. и спектр. 1965. Т. 18. № 3. С. 453-460.
- [5] Экситоны / Под ред. Э.И.Рашбы и М.Д.Стержа. М.: Наука, 1985. 616 с.
- [6] Лущик Ч.Б., Лийдя Г.Г., Васильченко Е.А. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1973. Т. 37. № 2. С. 334-340.
- [7] Куусманн И.Л., Либлик П.Х., Лущик Ч.Б. // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т. 21. № 2. С. 161-163.
- [8] Lushchik Ch., Kuusmann I., Plekhanov V. // J. Luminescence. 1979. V. 18/19. P. 11-19.
- [9] Васильченко Е.А., Лущик Н.Е., Лущик Ч.Б. // ФТТ. 1970. Т. 12. № 1. С. 211-215.
- [10] Lushchik Ch., Kolk J., Lushchik A., Lushchik N. // Phys. Stat. Sol. (b). 1984. V. 86. N 1. P. 219-227.
- [11] Лущик А.Ч., Колк Ю.В., Фрорип А.Г. // Труды ИФ АН Эст.ССР. 1985. Т. 57. С. 7-36.
- [12] Ибрагимов К.Г., Лущик А.Ч., Лущик Ч.Б., Васильченко Е.А., Савихина Т.И. // ФТТ. 1992. Т. 34. № 11. С. 3421-3428.
- [13] Ибрагимов К.Г., Лущик А.Ч., Лущик Ч.Б., Фрорип А.Г., Яансон Н.А. // ФТТ. 1992. Т. 34. № 10. С. 3161-3168.
- [14] Абрамов В.Н., Фрорип А.Г. // Труды ИФ АН Эст.ССР. 1987. Т. 61. С. 164.
- [15] Fukuda A., Inohara K., Onaka R.A. // J. Phys. Soc. Japan. 1964. V. 19. P. 1274-1280.
- [16] Feldbach E., Frorip A., Ibragimov K., Kuusmann I., Lushchik Ch. // J. Physics: Condensed Matter. 1993 (in press).
- [17] Nosento L., Reguzzoni E. // Phys. Rev. B. 1979. V. 19. N 4. P. 2314-2320.
- [18] Laisaar a., Scherbakov V., Kuznetsov A. // High Pressure Research. 1990. V. 3. P. 78-80.
- [19] Лущик Ч.Б., Лущик А.Ч. Распад электронных возбуждений с образованием дефектов. М.: Наука, 1989. 263 с.
- [20] Лущик Ч.Б., Лущик Н.Е. // Труды ИФ АН Эст.ССР. 1957. Т. 6. С. 5-62.
- [21] Vassilchenko E.A., Lushchik N.E., Lushchik Ch.B. // J. Luminescence. 1972. V. 5. N 12. P. 117-131.
- [22] Nagirnyi V., Vaino P., Zazubovich S. // Phys. Stat. Sol. (b). 1991. V. 167. N 2. P. 659-665.
- [23] Васильченко Е.А., Лущик Н.Е., Соовик Х.А. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1974. Т. 38. № 6. С. 1267-1270.
- [24] Алукер Э.Д., Лусис Д.Ю., Чернов С.А. Электронные возбуждения и радиолоуминесценция щелочно-галлоидных кристаллов. Рига: Зинатне, 1979. 251 с.
- [25] Teegarden K.J., Baldini G. // Phys. Rev. 1967. V. 155. N 3. P. 896-907.
- [26] Kunz A.B. // Phys. Rev. B. 1982. V. 26. N 4. P. 2069-2069.
- [27] Ибрагимов К.У., Савихин Ф.А. // ФТТ. 1993. Т. 35. № 6. С. 1409-1416.
- [28] Лущик Ч.Б. Экситоны / Под ред. Рашбы Э.И. и Стержа М.Д. М.: Наука, 1985. С. 362-384.