

Усаров А.С., Эгембердиев Ж., Эрнис кызы Ч.

**ДЕФЕКТТЕРДИН КРИСТАЛЛДАРДЫН ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ МҮНӨЗҮНӨ
ТИЙГИЗГЕН ТААСИРИ**

Усаров А.С., Эгембердиев Ж., Эрнис кызы Ч.

**ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТА НА ХАРАКТЕРИСТИКУ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
КРИСТАЛЛОВ**

A.S. Usarov, Zh. Egemberdiev, Ernis kuzu Ch.

**AFFETS OF DEFECTS ON THE CHARACTERDYTICS
OF LUMINESCENT CRYSTALS**

УДК: 535.37:548.736

Коргошун менен активдештирилген жезгич-галлоиддик кристаллдарды рентген нуру менен дүүлүктүргөн учурда бир канча типтеги, люминесценцияга ээ болгон, коргошун иондорунун (Pb^{2+}, Pb^{+}), түйүндөр аралык галоидтин иондору (X_1^{-}) жана катиондук (v_c^{-}) аниондук (v_a^{+}) вакансиялар менен болгон биригүүсү (ассоциат) аныкталды. Оптикалык жана структуралык касиеттери, алардын пайда болуусу, бузулушу, ошондой эле фото-жана термикалык өз-ара бири-бирине айланышы изилденди. Бул изилденген борборлорду үч группага бириктирсе болот, бул группалар бир канча мүчөлөрдү камтыйт: 1) молекулярдык ион $Pb^{2+} X_2^{-}$ негизиндеги борборлор; 2) $Pb^{2+} X_1^{-}$ - диполдоо негизиндеги борборлор; 3) $Pb^{+} X^{-} v_a^{+}$ негизиндеги лазердик-активдүү борборлор. Көрсөтүлгөндөй, оптикалык мүнөздөмөлөрү, ар-бир мүчөлөр үчүн окшош жана негизги борборлордун ($Pb^{2+} X_2^{-}, Pb^{2+} X_1^{-}, Pb^{+} X^{-} v_a^{+}$) абалдарында электрондук өтүүлөр менен аныкталат, ал эми изилденип жаткан ассоциаттарга кирген башка дефекттер (бузулуулар) чоң эмес таасирин тийгизет деп карасак болот.

Негизги сөздөр: жезгич галоиддик, бириккен боштук, катион, анион, түйүндөр аралык, нурдануу, молекулярдык, ион, экситон, рекомбинация активдештирилген, инверсия, тетрагонал, тригонал, триплет, адиабаттык потенциал, минимум, сымап сымал.

В облученных рентгеновскими лучами щелочногаллоидных кристаллах, активированных свинцом, обнаружено несколько типов люминесцирующих ассоциатов ионов свинца (Pb^{2+}, Pb^{+}) с междоузельными ионами галоида (X_1^{-}) и с катионными (v_c^{-}) и анионными (v_a^{+}) вакансиями. Изучены оптические свойства и детальная структура, процессы создания, разрушения, а также фото-и термостимулированных взаимных превращений этих ассоциатов. Исследованные центры можно объединить в три следующих группы, каждая из которых содержит несколько членов: 1) центры на основе молекулярного иона $Pb^{2+} X_2^{-}$; 2) центры на основе диполя $Pb^{2+} X_1^{-}$; 3) центры лазерно-активного типа на основе $Pb^{+} X^{-} v_a^{+}$. Показано, что оптические характеристики разных членов каждого семейства близки и определяются электронными переходами между состояниями основного ($Pb^{2+} X_2^{-}, Pb^{2+} X_1^{-}, Pb^{+} X^{-} v_a^{+}$) центра, а другие входящие в состав исследуемых ассоциат-

тов дефекты могут рассматриваться как небольшие возмущения.

Ключевые слова: щелоч, галоид, ассоциаты, вакансия, тетрагональный, тригональный, активированный, катион, анион, междоузельные, энергетика, потенциал, адиабатический, поверхность, ян-теллеровских, люминесценция, молекулярный ион, экситон, рекомбинация, электрон, парамагнит, резонанс, анизотропные, изотропные, активация, инверсии.

Several types of luminescent associates of lead ions (Pb^{2+}, Pb^{+}) with interstitial halide ions (X_1^{-}) as well as with cation (v_c^{-}) and anion (v_a^{+}) vacancies are observed in alkali halides x- irradiated at 80 or 295K. Optical properties and a detailed structure of these associates, the processes of their creation and destruction as well as their optically or thermally stimulated transformations are studied. The associates investigated form the thru following groups each containing several types of centres: 1) centres on the basis of a $Pb^{2+} X_2^{-}$ molecular ion 2) centres on the basis a $Pb^{2+} X_1^{-}$ dipole; and 3) centres of the laser-active structure on the basis of a $Pb^{+} X^{-} v_a^{+}$ associate. The optical characteristics of the various centres of each group are shown to be similar. It is concluded that they are determined by electronic transitions between the energy states of the basis associate ($Pb^{2+} X_2^{-}, Pb^{2+} X_1^{-}, Pb^{+} X^{-} v_a^{+}$), and that the influence of some other defects ($v_c^{-}, X_1^{-}, X_2^{-}$, etc) may be considered as a small perturbation.

Key word: alkali, halides, associate, vacancies, cation, anion, interstitial, luminescent, molecular ion, excitons, recombination, actively, inverse, tetragonal, trigonal, triplet, adiclatie, potential, minima, mercure-like.

1. Введение

Двухвалентные ртутеподобные ионы (A^{2+}) в ЦГК, как правило, ассоциированы с компенсирующей их избыточный заряд катионной вакансии v_c^{-} . Вакансия в принципе может находиться в II и IV координационных сферах по отношению к иону примеси, т.е. в направлениях «110» или «100» от него (центры типа $A^{2+} v_c^{-}$ [110] с ромбической (C_{2v}) и $A^{2+} v_c^{-}$ [001] с тетрагональной (C_{4v}) симметрией основного состояния). Искусственно в этих системах

удаётся создать небольшое количество ионов A^{2+} , не ассоциированных с дефектом и обладающих кубической симметрией основного состояния ($A^{2+}[O_h]$ - центров) [1,2,3].

В ЦГК, активированных одновалентными s^2 -ионами (A^+), основные центры люминесценции имеют кубическую симметрию основного состояния. Многочисленными исследованиями показано, что наряду с основными A^+ -центрами в этих кристаллах существуют парные $(A^+)_2$ центры. Их спектральные полосы часто перекрываются с полосами A^+ -центров. Хотя их количество квадратично зависит от концентрации активатора, они присутствуют даже в кристаллах с малой концентрацией примеси. $(A^+)_2$ -центры тоже могут иметь структуру $(A^+)_2 [110]$ или $(A^+)_2 [001]$ в зависимости от взаимного расположения двух ионов A^+ в решетке. Парные центры существуют и в ЦГК с двухвалентными s^2 -ионами.

Кристаллы, выращенные из сырья, не подвергнутого специальной очистке, обычно содержат примеси посторонних галогенов (например Br^- или I^- в KCl), а также ионов щелочных металлов (например Na^+ , Rb^+ в KCl). Их концентрация может быть сравнимой с концентрацией активатора, а спектральные полосы ионов A^+ , возмущенных посторонним ионом (A^+X -центров) близки к полосам A^+ -центров. Аналогичные, а также более сложные центры, создаются в ЦГК со смешанными основаниями.

В облученных ионизирующей радиацией кристаллах известны центры окраски, образующиеся при захвате электронов и дырок ионами активатора (A^{2+} , A^0 , $A^+v_c^-$, $A^{3+}v_c^-$, A^0A^+ , A^0A^0 , A^0X^- , $A^{2+}X^-$ и т.д.) в результате захвата ионами примеси анионных и катионных френкелевских дефектов, создающихся при распаде экситонов, возникают и ассоциаты примеси с интерстициалами и вакансиями (например, центры типа $H_A(A^+)$, $I_A(A^+)$, $H_Z(A^{2+})$, $A^0v_c^-, V_{KLA}(A^+)$ и т.д.). Для целого ряда активаторных центров окраски нами была обнаружена и изучена внутрицентровая люминесценция (см. например [3-11]). Эта люминесценция может служить высокочувствительным и селективным детектором процессов с участием электронов, дырок, интерстициалов и вакансий в кристалле, а также практически не изученных процессов, происходящих в возбужденных S^1 - и P^1 -состояниях примесных центров окраски разной структуры.

Люминесценция ассоциатов s^2 -иона с дефектом в большинстве случаев обусловлена переходами между электронными состояниями примесного иона, возмущенным дефектом. Дефект нарушает энергетическую эквивалентность ян-теллеровских минимумов разных ориентаций на энергетической поверхности адиабатического потенциала (ЭПАП) возбужденного состояния иона примеси. Энергия искажения, вносимого дефектом, как правило, гораздо меньше энергии ян-теллеровского искажения, поэтому дефект обычно рассматривается как возмущение. Несмотря на это, он оказывает весьма существенное влияние на свойства излучения.

Детальное исследование характеристик люминесценции сложных центров разной структуры в ЦГК представляет большой познавательный интерес. Оно важно и в связи с возможностью практического применения кристаллов с анизотропными примесными центрами, в частности, в качестве активных сред для лазеров и оптических запоминающих устройств (см. например [12-20]). Знание характеристик различных сложных активаторных центров в ЦГК совершенно необходимо для надежной интерпретации люминесцентных свойств основных центров в этих системах.

2. Данные методы ЭПР и оптического дихроизма

При облучении ЦГК с s^2 -ионами ионизирующей радиацией создаются электронные и дырочные активаторные центры окраски и ассоциаты s^2 -иона с радиационными дефектами. Если в результате облучения геометрическая структура центра (например, положение v_c^- относительно иона примеси) не изменяется, то исследуя структуру примесных центров окраски методом ЭПР или оптического дихроизма, можно установить структуру исходных $A^{2+}v_c^-$ -центров.

Методы оптического дихроизма, а также спонтанной поляризации были успешно применены нами при исследовании структуры парных электронных индиевых центров в $CsBr-In$ [11, 12]. Этими методами можно определить структуры и центров типа $A^{2+}v_c^-$, но только в случае, если возможно фототермическая ионизация A^{2+} при температурах, когда переориентация диполей $A^{2+}v_c^-$ не происходит. К сожалению, $Ge^{2+}v_c^-$, $Sn^{2+}v_c^-$ и $Pb^{2+}v_c^-$ -центры в ЦГК в этих условиях оптически не разрушаются.

В кристалле $KCl - Pb$ [5] обнаружены два типа люминесцирующих ассоциатов - диполей $Pb^{2+}v_c^-$ с междоузельными атомами галоида - $H_Z(Pb^{2+})$ - центров. При 77К рентгеновскими лучами и оптически генерируются в основном $H_Z(Pb^{2+})$ - центры с излучением 3,35 эВ, а $H_Z(Pb^{2+})$ - центры с излучением 1,8 эВ создаются из них термически. Позднее $H_Z(Pb^{2+})$ - центры двух типов в $KCl-Pb$ были обнаружены методом ЭПР Шумейкером [13]. Было показано, что при 77К создаются ассоциаты интерстициала с $Pb^{2+}v_c^- [110]$ - диполями ($H_Z^{[110]}(Pb^{2+})$ - центры), которые при $T \geq 180K$ превращаются в ассоциаты интерстициала с $Pb^{2+}v_c^- [001]$ - диполями ($H_Z^{[001]}(Pb^{2+})$ - центры) в результате термостимулированного переоскока v_c^- из [110] в [001] положение по отношению к иону Pb^{2+} . Интерстициал в форме молекулярного иона $[X_2]_{ac}$ занимает анионный узел (а) и катионную вакансию (с), ассоциированную с ионом Pb^{2+} . Детальное сопоставление зависимостей числа $H_Z(Pb^{2+})$ - центров двух типов от температуры импульсного прогрева кристалла, измеренных методом поляризо-

ванной люминесценции [3-5] и методом ЭПР [6], позволило однозначно заключить, что центры с излучением 3,35 эВ являются $H_z^{[110]}(Pb^{2+})$ - центрами, а центры с излучением 1,8 эВ - $H_z^{[001]}(Pb^{2+})$ -центрами.

В кристалле $KCl-Pb$ [2] удалось создать Pb^{2+} - центры, не ассоциированные с дефектом ($Pb^{2+}[O_h]$ - центры) путем оптического разрушения при 77K созданных при 295K электронных Pb^{+} - центров кубической симметрии. В кристалле $KBr-Pb$ нами были обнаружены анизотропные центры свинца, представляющие собой, вероятнее всего, ассоциаты иона Pb^{2+} с далекой V_C^- ($Pb^{2+}V_C^- [001]$ - центров) [4], а также три типа $H_z(Pb^{2+})$ - центров: ($H_z^{[110]}(Pb^{2+})$), ($H_z^{[001]}(Pb^{2+})_{тер}$ и ($H_z^{[001]}(Pb^{2+})_{опт}$ с излучением 3,03; 2,0 и 1,9 эВ соответственно. Первые два типа $H_z(Pb^{2+})$ - центров аналогичны описанным выше для $KCl-Pb$. Центры $H_z^{[001]}(Pb^{2+})_{опт}$ возникают в результате захвата диполями $Pb^{2+}V_C^- [001]$ подвижных междоузельных атомов галоида, генерируемых при распаде экситонов, создаваемых рентгеновской радиацией или оптически - в рекомбинационных процессах. Характеристики этих центров, а также процессы их создания и взаимного превращения подробно описаны в [2,4,7]. Методом ЭПР $H_z(Pb^{2+})$ - центры в $KBr-Pb$ не исследованы.

Таким образом в кристаллах KCl и KBr , активированных свинцом, нам удалось наблюдать **шесть разных типов** активаторных центров, для большинства из которых геометрическая структура точно известна. В связи с этим ожидалось, что детальное спектроскопическое исследование и сравнение характеристик люминесценции этих центров является важным источником информации о структуре их возбужденного состояния и происходящих в нем процессах, о характере и относительном вкладе разных взаимодействий в этих центрах, а также о влиянии наличия, положения и структуры дефекта, возмущающего двухвалентный ион примеси, на свойства излучения.

Структура исследованных Pb^{2+} центров схематически представлены на рисунке 1. Их спектральные и поляризационные характеристики тоже схематически изображены на рисунке 2 (см. также таблицу 1). Исследуемые Pb^{2+} - центры шести типов можно разделить на три группы- на $[110]$ -, $[001]$ - и (O_h) -центры. В группу $[110]$ входят ионы Pb^{2+} , возмущенные, близким V_C^- (два типа центров, рис. 2а.). В группу $[001]$ входят ионы Pb^{2+} , возмущение, далекой V_C^- (три типа центров, рис. 2б.) и в группу $[O_h]$ - ионы Pb^{2+} , не ассоциированные с дефектом (один тип центров, 2в). Кроме того, в случае $H_z(Pb^{2+})$ - центров возмущающий ион Pb^{2+} дефект имеет сложную структуру - его можно представить состоя-

щим из двух компонентов $-V_C^-$ и X_i^0 , эта сложная структура весьма своеобразно сказывается на поляризационных и кинетических свойствах излучения.

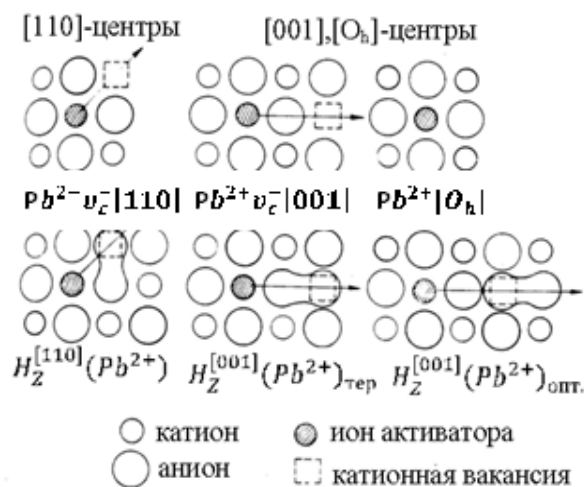


Рис. 1. Схематические модели Pb^{2+} - центров разной структуры в ШГК.

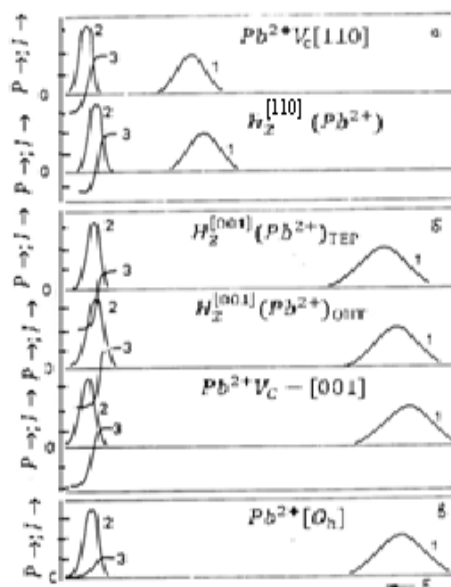


Рис. 2. Схематические изображения спектров излучения (I), возбуждения (2) и поляризация (3) Pb^{2+} - центров разной структуры в ШГК:

- а) - анизотропные центры $[110]$ -типа,
- б) - анизотропные центры $[001]$ -типа,
- в) - изотропные центры $[O_h]$ -типа.

3. Влияние структуры дефекта на спектральные и поляризационные характеристики излучения Pb^{2+} - центров.

Сравнение характеристики $Pb^{2+}V_C^-$ и $H_z(Pb^{2+})$ - центров показало [1-6], что междоузельный атом галоида тоже вызывает некоторое (но более слабое, чем V_C^-) возмущающее воздействие на спектральные характеристики излучения $Pb^{2+}V_C^-$ - центров, приводя к небольшому смещению спектров излучения и по-

глощения (возбуждения) в длинноволновую сторону (табл. 1, рис. 2а) и к некоторому изменению энергетических параметров возбужденного состояния. Вид поляризационного спектра при 80К от присутствия $[X_2^-]$ практически не изменяется (см. рис. 2).

Однако, особенно интересным образом сложная (двухкомпонентная: ν_c^-, X_i^0) структура дефекта $[X_2^-]_{ac}$, возмущающего ион Pb^{2+} , проявляется в поляризационных свойствах излучения $H_z^{[100]}(Pb^{2+})_{тер.}$ - центров. А именно, при $T \geq 110K$ происходит резкая инверсия поляризационного спектра медленного компонента (МК) затухания излучения. Она сопровождается возрастанием (почти вдвое) абсолютных значений степени поляризации (рис. 3, и 4б).

Таблица 1

Характеристики Pb^{2+} - центров разной структуры в кристаллах KCl-Pb и KBr-Pb (в эВ)

Кристалл	Центры	А-поглощения	Ат-излучение		
			E_{mI}	δ_{mI}	S
KCl-Pb	$Pb^{2+}\theta_c^- [110]$	4,57	3,60	0,29	0,93
	$H_z [110](Pb^{2+})$	4,43	3,35	0,33	1,08
	$H_z [001] (Pb^{2+})_{тер.}$	4,38	1,80	0,52	2,58
	$Pb^{2+}[0]$	4,45	1,80	0,48	2,65
KBr-Pb	$Pb^{2+}\theta_c^- [110]$	4,14	3,42	0,22	0,72
	$H_z [110](Pb^{2+})$	3,96	3,07	0,26	0,89
	$H_z [001] (Pb^{2+})_{тер.}$	3,90	1,90	0,48	2,00
	$H_z [001] (Pb^{2+})_{опт.}$	4,00	1,80	0,45	2,20
	$Pb^{2+}\theta_c^- [001]$	4,07	1,70	0,48	2,37

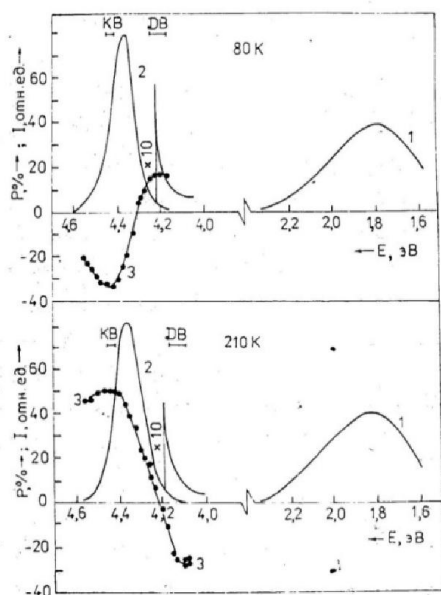


Рис. 3. Спектры излучения (1), возбуждения (2) и поляризация (3) Ат-излучение $H_z [001] Pb^{2+})_{тер.}$ - центров в KCl-Pb при 80 К и 210 К.

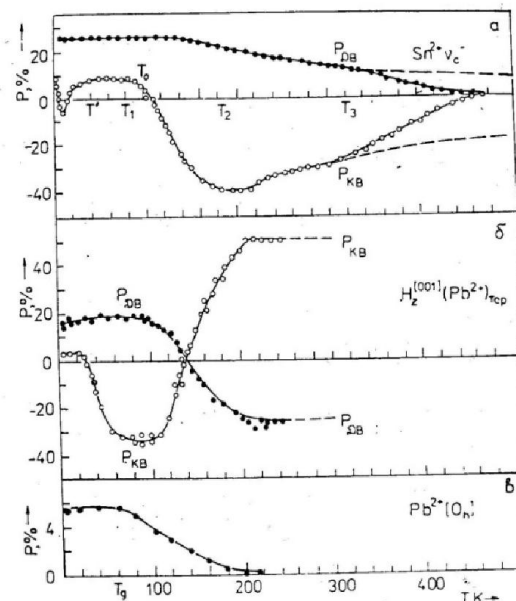


Рис. 4. Температурные зависимости степени поляризации A_T -излучения анизотропных $Sn^{2+}\nu_c^-$ - центров в KCl-Sn (а) и $H_z [001] (Pb^{2+})_{тер.}$ - центров в KCl-Pb (б) при длинноволновом ($P_{дв}$) и коротковолновом ($P_{кв}$) А-возбуждении, а также изотропных $Pb^{2+}[Oh]$ - центров в KCl-Pb.

Исследование кинетики затухания излучения показали, что этот эффект связан с появлением нового компонента в затухании излучения, в 2-3 раза более короткого, чем прежний МК, и обладающего большей (до+60%) степенью поляризации при коротковолновом А-возбуждении (подробнее см., [25]). Светосумма этого нового компонента при $T > 110K$ резко увеличивается а светосумма МК уменьшается. Спектральные характеристики излучения $H_z^{[001]}(Pb^{2+})_{тер.}$ -центра при этом практически не изменяются (рис. 3) Процесс этот обратимый, следовательно, при повышении температуры не происходит ни разрушения исследуемых центров (до 230К), ни превращение их в другие центры. При этом не происходит и «выстраивания» $H_z^{[001]}(Pb^{2+})_{тер.}$ -центров в кристалле даже при длительном возбуждении.

Мы предполагаем, что при возбуждении линейно поляризованным светом в А-полосе поглощения $H_z^{[001]}(Pb^{2+})_{тер.}$ -центра осуществляется частичная диссоциация сложного дефекта (ν_c^-, X_i^0) около Pb^{2+} и перескок X_i^0 на одно из направлений $\langle 100 \rangle$, перпендикулярное оси $Pb^{2+}-\nu_c^-$. Если до перескока минимальной была энергия состояния, ориентированного на ν_c^-, X_i^0 (Z-состояние), то после перескока минимальной оказывается энергия состояния, в котором орбитальная волновая функция Pb^{2+} ориентировано в направлении от Pb^{2+} к X_i^0 , что и приводит к инверсии поляризованного спектра. Этот процесс требует энергии активации, поэтому он включается с повышением температуры. Катионная вакансия при этом остается на месте, обеспечивая «запоминания» исходного состояния.

Термостимулированная переориентация H-центра вокруг примесного иона щелочного металла

(например, $(\text{Na}_B \text{KCl})$ хорошо изучена (см. например [7]). При $T \leq 17\text{K}$ происходит прыжковая диффузия Н-центра вокруг иона Na^+ . В случае возбужденных $\text{H}_2^{[001]}(\text{Pb}^{2+})_{\text{тер.}}$ -центров, однако, Н-центров, «застревает» в новом равновесном положении, возможно, из-за сильной гомеоплярной связи, возникающей между ионом Pb^{2+} в возбужденном состоянии, волновая р- функция которого сильно анизотропна в направлении (100) , и молекулярным ионом $[\text{X}_2^-]_{\text{ас}}$.

В основном s^2 – состоянии волновая функция которого полносимметрична, X_1^0 энергетически наиболее выгодно располагается в $v_{\text{с}}^-$ и после излучательного перехода он возвращается в свою $v_{\text{с}}^-$. В результате этого восстанавливается изотропное распределение возбужденных $\text{H}_2^{[001]}(\text{Pb}^{2+})_{\text{тер.}}$ центров в кристалле.

Насколько нам известно, это – первое наблюдение проявлений таких специфических переориентаций анизотропных центров в кристалле. Фотосимулированные переориентации хорошо изучены для анизотропных центров окраски типа F_A, M, M_A, V_K и др. ШГК (см. например [8]). Установлено, что энергия активации для переориентаций в возбужденном состоянии этих центров на порядок меньше, чем в основном. В связи с этим статические процессы переориентаций приводит к всё большей заселенности их ориентаций, в которых центр больше не возбуждается светом данной поляризации. В результате этого центры «выстраиваются» в определенном направлении в кристалле. Возникает анизотропное поглощение, спонтанная поляризация излучения и т.д. Это явление используется в оптических запоминающих устройствах.

Второй известный тип переориентации – диффузионные прыжки $v_{\text{с}}^-$ вокруг A^{2+} - иона. Проявление этих прыжков в поляризационных характеристиках люминесценции детально изучены нами для $\text{Sn}^{2+} v_{\text{с}}^-$ -центров при $T > 320\text{K}$ [10]. Эти прыжки приводят к полной деполяризации излучения при высоких температурах (рис. 4а).

В отличие от этих случаев, переориентации $\text{H}_2^{[001]}(\text{Pb}^{2+})_{\text{тер.}}$ -центров не приводят ни к деполяризации излучения, ни к выстраиванию центров в кристалле. Преимущественно ориентированные $\text{H}_2^{[001]}(\text{Pb}^{2+})_{\text{тер.}}$ - центры (в направлении, перпендикулярном оси $\text{Pb}^{2+} - v_{\text{с}}^-$ и E_B) существуют в кристалле только в течение времени жизни их в возбужденном состоянии ($\leq 10^{-6}\text{с}$).

Литература:

1. Зазубович С.Г. Поляризованная люминесценция центров Sn^{2+} кубической симметрии в ШГК, //Оптика и спектроскопия. -1974. - Т. 37. - №4. - С. 711-716.
2. Нагирный В.П. Поляризованная люминесценция Pb^{2+} -центров разной структуры в KCl-PbCl_2 //Труды ИФ АН ЭССР, 1984. - Т.55. - С. 198-216.
3. Egemberdiev Zh., Zazubovich S., Nagirnyi V. Polarized Luminescence of Lead Ions Associated with Interstitial Radiation Defects in KCl-PbCl_2 Crystals // Phys.Stat.Sol

- (b)-1982-V 109, №1-P 173-182.
4. Egemberdiev Zh. Zazubovich S. Nagirnyi Decay Kinetics and Polarization of the A_T Emission of Pb^{2+} centres of Different structure in KBr: Pb Br_2 // Phys. Stat.sal (b)-1984. - V.125, 2. - P. 407-414.
5. Эгембердиев Ж. Примесные центры окраски и рекомбинационная люминесценция кристалла KCl-PbCl_2 // Труды ИФ АН ЭССР, 1980. - Т.51. - С. 163-178.
6. Egemberdiev Zh., Seeman V., Zazubovich S., Janson N. Polarized Luminescence and EPR Study of Sn^+ Centres in KCl-Sn Cl_2 Crystals // Phys. Stat Sol -1979. - V. 92. - №1. -P. 335-345
7. Зазубович С.Г., Усаров А.С., Эгембердиев Ж. Люминесцирующие ассоциаты ионов свинца с интерстициалами и вакансиями в KCl-PbCl_2 // Труды ИФ АН Эстонии, 1990. - Т. 67. С. 121-145.
8. Egemberdiev Zh., Zazubovich S., Usarov A.S. Luminescence of Lead Ions Associated with Interstitials and Vacancies in Halides// Phys. Stat. Sol. - 1991. - V. 164. №1. - P. 195-206.
9. Ашимова С. Усаров А.С. Поляризованная люминесценция $\text{H}_A(\text{In}^+)$ -центров в KCl-In и KBr-In // Оптика и спектроскопия. - 1987. - Т. 63. - №5. - С. 1054-1057.
10. Зазубович С.Г., Усаров А.С. Поляризованная люминесценция ассоциатов ионов Sn^+ с анионной вакансией // Оптика и спектроскопия. - 1989. - Т. 67.- №2.-С. 461-463.
11. Зазубович С.Г., Штанько В.И. Парные активаторные центры окраски в кристаллах CsBr-In // Оптика и спектроскопия. - 1970. - Т. 28. - №1. - С. 109-118.
12. Зазубович С.Г. Штанько В.И., Медников А.К., Эгембердиев Ж. Применение ионных кристаллов с анизотропными примесными центрами окраски для оптических запоминающих устройства // ЖПС. - 1979. - Т. 31, №2. - С. 320-326.
13. Delbecq С.Г., Harfard R., Schoemaker D., Yuster P.H. Sn^+ - Centers and Thermal Motion of Associated Vacancies in KCl-SnCl_2 // Phys.Rev. B. - 1976. - V.13. - №8. - P. 3631-3644.
14. Van Puymbroeck W., Schoemaker D. Electron – Spin Resonance Study of Complex Interstitial Halogen H_D – Type Defects in KCl Doped With Divalent Cations // Phys. Rev. B. -1981. - V. 23. - №4. - P. 1670-1684.
15. Прохоров А.М. Новое поколение твердотельных лазеров // УФН. - 1986. - Т. 148, № 1. - С. 7-33.
16. Mollenauer H.F., Vieira N.D., Szeto H. О Properties of the $T^0(1)$ Center in KCl // Phys. Rev. B. - 1983. - V. 27, №9. - P. 5322-5346.
17. Mollenauer H.F., Vieira N.D., Szeto H. Defect Perturbed Metal Atom Centers in Alkali Halides New Class of Highly Stable Laser Active Color Center // Appl. Phys. B. - 1982. - V. 28, №2-3. - P. 306-307.
18. Paus H.J. Color Center Lasers // Intern. Symp. on Lattice Defect Related Properties of Dielectric Materials: Plenary lectures. - Wroclaw, Poland, 1986. - P. 69-100.
19. Баранов П.Г., Ветров В.А., Романов Н.Г., Топа В. Оптически детектируемый магнитный резонанс триплетных возбужденных состояний ионов Ge^{2+} в щелочно – галоидных кристаллах // ФТТ. 1985. - Т. 27, №9. - С. 2749-2751.
20. Baranov P.G., Vetrov V.A., Romanov N.G., ODMR in Triplet Excited States of ns^2 Ions in Alkali Halide Crystals // Phys. Stat. Sol. (b) 1986. - V. 136. - №2. - P. 699-707.

Рецензент: д.ф.-м.н., профессор Таиров М.М.