EESTI NSV TEADUSTE AKADEEMIA TOIMETISED. VIII KÖIDE
TEHNILISTE JA FÜÜSIKALIS-MATEMAATILISTE TEADUSTE SEERIA. 1959, NR. 4

ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК ЭСТОНСКОЙ ССР. ТОМ VIII
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК. 1959, № 4

https://doi.org/10.3176/tech.phys.math.1959.4.06

О МЕХАНИЗМЕ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ, АКТИВИРОВАННЫХ Ga^{+}, Ge^{++}, In^{+}, Sn^{++}, Tl^{+}, Pb^{++} *

Ч. Б. ЛУЩИК,
кандидат физико-математических наук

Детальный механизм люминесценции до сих пор остается одной из центральных нерешенных проблем в области физики кристаллофосфоров. Наиболее перспективно решать эту проблему путем исследования весьма простых по составу и структуре монокристаллических щелочно-галоидных фосфоров.

Школой Поля в Геттингене было проведено ставшее теперь классическим исследование щелочно-галоидных кристаллов, активированных таллием.[1] Полученные результаты были обобщены в известной работе Зейтца.[2] По Зейтцу все процессы, связанные с люминесценцией этих фосфоров, протекают внутри центров свечения, представляющих собой ионы, расположенные в регулярных катионных узлах. Кристаллическая решетка, по Зейтцу, служит лишь возмущающей средой и термостатом, окружающим центры люминесценции.

В дальнейшем идеи Зейтца о механизме свечения активированных щелочно-галоидных фосфоров подверглись экспериментальной проверке и теоретической обработке во многих работах (см., например,[3—9]). Как и в Геттингене, в них исследовались в основном щелочно-галоидные кристаллы, активированные таллием. Значительно менее полно изучались кристаллы с примесью свинца [2, 10] и олова [11—13].

В 1955—1957 гг. в Тарту по нашему предложению Н. Е. Лущик синтезировала ряд щелочно-галоидных монокристаллов, активированных индием, галлием и германием.[14, 15]** Это позволило исследовать «двойной гомологический ряд» кристалло фосфоров на основе KCl, KBr, KI, NaCl, активированных шестью ионами-аналогами атома ртути:

Ga^{+}	Ge^{++}
In^{+}	Sn^{++}
Tl^{+}	Pb^{++}

Автором с сотрудниками (Ф. Н. Заитов, В. Я. Карк, Х. Ф. Кяэмбре, Г. Г. Лийдья, Н. Е. Лущик, Э. С. Тийслер, К. К. Шварц, И. В. Яэк) было осуществлено многостороннее исследование щелочно-галоидных кристаллов, активированных всеми этими «ртутеподобными» ионами.[14—27] На основании этих результатов и литературных данных имеется возможность более детально, чем 20 лет назад, рассмотреть вопрос о механизме люминесценции этого класса фосфоров. В настоящей работе обсуждаются природа центров люминесценции и механизм процессов переноса энергии от основного вещества к центрам свечения в активированных щелочно-галоидных кристаллах.

---

* Настоящая работа доложена на III Всесоюзном совещании по теории полупроводников во Львове 7 апреля 1959 г. и на Международной конференции по физике и химии кристаллофосфоров в Грейфсвальде (ГДР) 28 апреля 1959 г.

** Несколько позже фосфоры, активированные индием, были независимо синтезированы Шамовским с сотрудниками [28—30], а затем и некоторыми другими исследователями [31—33].

Центры люминесценции

Природа центров люминесценции исследовалась нами оптическими методами. На рис. 1 в качестве примера приведены спектры поглощения, возбуждения и излучения KBr-фосфоров, активированных галлием, германием, индием, оловом, таллием и свинцом. Проведенное Н. Е. Лущик [14—16] сравнение спектральных закономерностей в этом гомологическом ряду кристаллофосфоров и в записанном выше ряду свободных

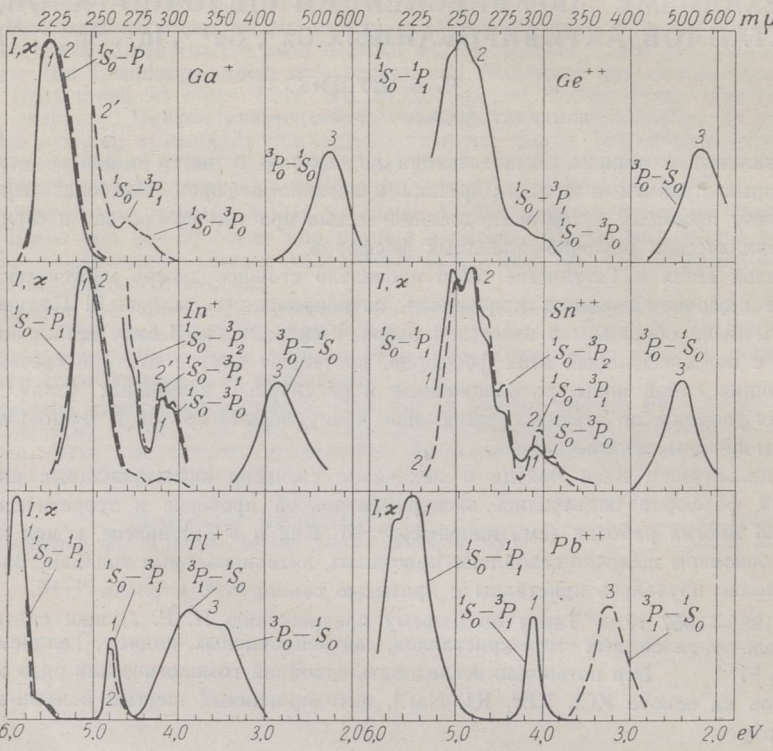

Рис. 1. Спектры поглощения (*1*), возбуждения (*2*) и излучения (*3*) KBr-фосфоров, активированных ионами Ga+, Ge++, In+, Sn++, Tl+, Pb++.

ионов позволило дать спектроскопическое доказательство того, что «ядром» центров люминесценции в исследованных фосфорах служат ртутеподобные ионы Ga^+, Ge^{++}, In^+, Sn^{++}, Tl^+, Pb^{++}. При возбуждении центров люминесценции изменяются электронное состояние ртутеподобного иона и его взаимодействие с кристаллической решеткой. Основные полосы поглощения (возбуждения) KBr-фосфоров соответствуют электронным переходам $^1S_0 \rightarrow {}^3P_0$, $^1S_0 \rightarrow {}^3P_1$, $^1S_0 \rightarrow {}^3P_2$ и $^1S_0 \rightarrow {}^1P_1$ в ионах активатора (см. рис. 1). В результате взаимодействия ртутеподобных ионов с кристаллической решеткой уровень $^1P_1$ расщеплен на три $(2J + 1)$ компонента, а вероятности переходов $^1S_0 \rightarrow {}^3P_0$ и $^1S_0 \rightarrow {}^3P_2$ значительно больше, чем для свободных ионов. Эти эффекты особенно сильно выражены для легких ртутеподобных ионов, в которых отсутствует $4f$-оболочка и «внутренняя экранировка» валентных электронов мала.

В спектрах излучения фосфоров, активированных Ga^+, Ge^{++}, In^+, Sn^{++}, наблюдается одна полоса, связанная с переходами с нижайшего возбужденного уровня на основной (переход $^3P_0 \rightarrow {}^1S_0$). В фосфорах, активированных Tl^+ и Pb^{++}, основная полоса излучения соответствует переходам $^3P_1 \rightarrow {}^1S_0$. Наличие под «уровнем излучения» метастабильного уровня $^3P_0$ приводит к сильной температурной зависимости длительности возбужденного состояния. Этот эффект недавно обнаружен И. К. Плявинь.[33] При благоприятных внешних условиях (температура, давление) в излучении некоторых фосфоров проявляются оба перехода $^3P_1 \rightarrow {}^1S_0$ и $^3P_0 \rightarrow {}^1S_0$.

Квантовый выход люминесценции η фосфоров KBr — Tl, KBr — In, KBr — Ga, KBr — Sn при комнатной температуре близок к единице.[26] Для всех фосфоров при высоких температурах наблюдается сильное внутреннее температурное тушение. Зависимость $\eta(T)$ для всех фосфоров хорошо описывается формулой Мотта.[17–26] Вероятность безызлучательных переходов внутри центров люминесценции зависит от температуры $d = \check{d}_0 \exp(-Q/kT)$.

В одноосцилляторном гармоническом приближении (см., например,[34]) с учетом существенного для исследованных фосфоров эффекта изменения частот колебаний после фотовозбуждения нами получена связь между основными оптическими (положение и полуширина полос поглощения и излучения) и тепловыми (Q) характеристиками центров люминесценции.[15, 16] Экспериментальная проверка этих соотношений [16, 26, 27] обнаружила некоторое систематическое расхождение экспериментальных данных с расчетными, связанное с неучитыванием ангармоничности колебаний и роли неполносимметричных колебаний.

Внутреннее оптическое тушение (см.[35, 15]) в изученных фосфорах обнаружено не было. Квантовый выход люминесценции фосфоров в пределах длинноволновых полос поглощения не зависит от частоты возбуждающего света.[26]

Ртутеподобные ионы, служащие основными центрами люминесценции, расположены, вероятнее всего, в регулярных катионных узлах кристаллической решетки. При больших концентрациях активатора и большом числе точечных (анионные и катионные вакансии), линейных (дислокации) и поверхностных дефектов в моноактивированных щелочно-галоидных кристаллах, кроме основных центров, обнаруживаются также сложные центры люминесценции, в состав которых входят ионы активатора и различные дефекты кристалла.[4, 27, 36] Структура спектров поглощения (возбуждения) этих сложных центров та же, что и для основных центров люминесценции, но все спектральные характеристики обычно несколько смещены в длинноволновую сторону. Люминесценция этих центров поляризована.[37]

Особенно сильно взаимодействуют с дефектами решетки неизоморфные примеси. Проведенное Р. И. Гиндиной [38] ультрамикроскопическое исследование показало, что в отожженных кристаллах NaCl—Pb частицы свинца группируются около дислокаций в объеме кристалла, а также (при определенных условиях отжига) на границах блочной структуры кристалла. После закалки ионы Pb^{++} дисперсно распределяются по объему кристалла.

Рекомбинационная люминесценция

После возбуждения лучами Рентгена или коротковолновыми ультрафиолетовыми лучами щелочно-галоидные фосфоры, активированные ионами Ga^+, In^+, Tl^+, дают яркую и длительную фосфоресцен-

цию, а также термолюминесценцию и оптическую вспышку. Измеренные в Тарту [39—42, 20, 23] спектры стимуляции оптической вспышки этих фосфоров показывают, что свечение возникает после освобождения электронов из F-, M-, N-, O-, Z_1-центров окраски. И. В. Яэк показал, что спектры излучения рентгенизованных фосфоров KCl — Tl, KCl — Pb, KCl — In, KBr — Tl, KBr — In, KBr — Ga при возбуждении в активаторных полосах поглощения и в F-полосе полностью совпадают.[24] Следовательно, при освобождении электронов из F-центров основного вещества возникает свечение, связанное с переходами $^3P \rightarrow {}^1S_0$ в ионах активатора. Этим окончательно доказывается неметастабильность длительной люминесценции щелочно-галоидных фосфоров. Вопреки точке зрения Зейтца [2] можно утверждать (см. также [3, 8, 9]), что длительное свечение этого класса фосфоров носит несомненно рекомбинационный характер.

Рекомбинационная люминесценция активированных ртутеподобными ионами щелочно-галоидных кристаллов возникает не только при оптической (точнее — фототермической) ионизации центров окраски, но и при их тепловой ионизации. В нашей лаборатории с помощью саморегистрирующего «релаксационного комбайна» были подробно исследованы термолюминесценция, термическое обесцвечивание [43] различных центров окраски и неизотермическая релаксация периодически стимулируемой оптической вспышки (термо-оптическое высвечивание [44]) ряда рентгенизованных щелочно-галоидных фосфоров. В качестве примера на рис. 2 мы приводим данные для KBr—Tl. В области 380° K при термической ионизации F-центров (освобождение электронов в этой области температур показано И. К. Витолом «методом динамического конденсатора»[45]) возникает яркая люминесценция ионов Tl^+. Это также электронная рекомбинационная люминесценция.

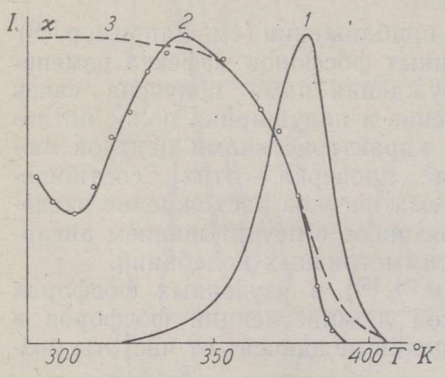

Рис. 2. Термолюминесценция (*1*), термическое обесцвечивание F-полосы (*3*) и термооптическое высвечивание в F-полосе (*2*) рентгенизованного и прогретого до 370° K фосфора KBr — Tl. Скорость нагрева 0,15 град/сек.

Рекомбинационная люминесценция KCl- и KBr-фосфоров возникает и при их возбуждении в активаторных полосах поглощения, соответствующих переходам $^1S_0 \rightarrow {}^3P_1$ и особенно $^1S_0 \rightarrow {}^1P_1$ (рис. 3). Некоторое различие спектров возбуждения стационарного свечения и рекомбинационной люминесценции в области полосы поглощения $^1S_0 \rightarrow {}^1P_1$ связано с неэлементарностью последней и различием выходов фосфоресценции в разных «подполосах» поглощения. Рекомбинационную люминесценцию ионов Ge^{++}, Sn^{++}, Pb^{++} в KCl- и KBr-фосфорах при возбуждении в активаторных полосах поглощения нам наблюдать не удалось. Однако она возникает при рентгенизации фосфоров. Следует полагать, что энергетические уровни центров люминесценции для одновалентных и двухвалентных примесей по-разному расположены относительно энергетических зон основного вещества.

Возникновение F-центров и активаторных центров окраски при облучении галлиевых фосфоров в активаторной полосе поглощения (переход $^1S_0 \rightarrow {}^1P_1$ в ионах Ga^+) наблюдалось в нашей лаборатории

Э. С. Тийслером прямым абсорбционным методом.[25] Интенсивное облучение фосфоров в активаторных полосах поглощения приводит к уменьшению активаторного поглощения. В галлиевых фосфорах последующее освещение в *F*-полосе вызывает увеличение активаторного поглощения.[23,25] Все эти факты естественнее всего связать с возможностью ионизации центров люминесценции. Следует подчеркнуть, что это не прямая оптическая ионизация, так как выход рекомбинационной люминесценции при возбуждении в полосе $^1S_0 \rightarrow {}^1P_1$ резко уменьшается при понижении температуры.[23] Вероятно, это, как и в случае центров окраски, двухступенчатая фототермическая ионизация центров.

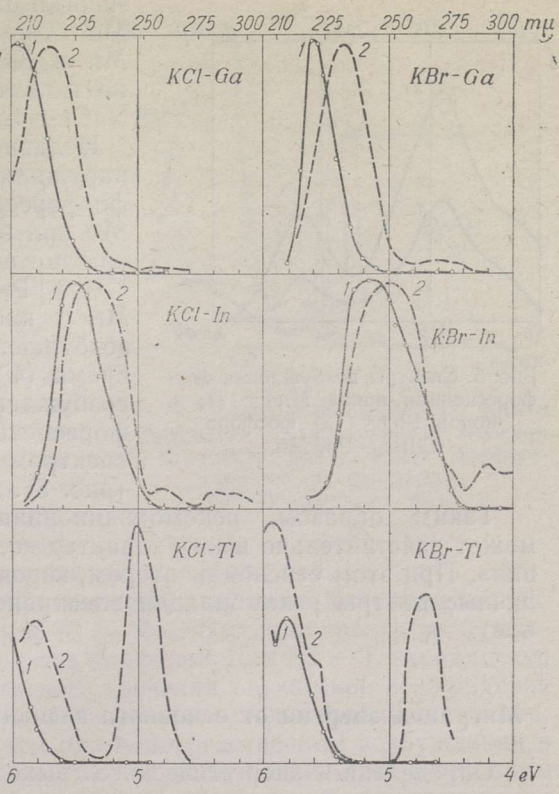

Рис. 3. Спектры возбуждения стационарного свечения (*2*) и рекомбинационной люминесценции (*1*) KCl- и KBr-фосфоров, активированных ионами Ga+, In+, Tl+.

Ионизационный механизм рекомбинационной люминесценции не является единственно возможным. Исследование термолюминесценции KBr—In при низких температурах показало (рис. 4), что в области термического обесцвечивания *F*- и V_1-полос, сопровождающегося освобождением дырок (V_2-полоса при этом возрастает), также возникает свечение ионов In^+.[21, 23] Это — дырочная рекомбинационная люминесценция. Она может возникать, например, в результате рекомбинации свободных дырок с локализованными на центрах люминесценции электронами.

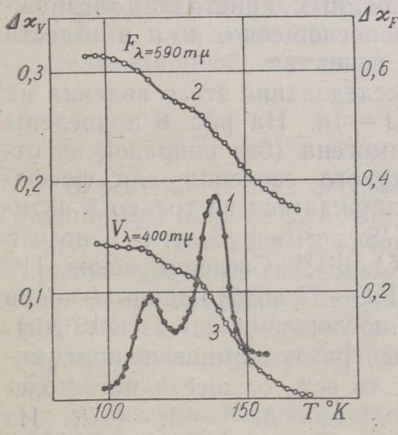

Рис. 4. Термолюминесценция (*1*), термическое обесцвечивание *F*-полосы (*2*) и V_1-полосы (*3*) рентгенизованного фосфора KBr—In. Скорость нагрева 0,10 град/сек.

В литературе уже высказывалась гипотеза о том, что в рекомбинационной люминесценции фосфоров существенную роль может играть акт сенсибилизованной передачи энергии от центров рекомбинации электронов и дырок к неионизованным центрам люминесценции.[46, 39] Этот эффект может существовать и в щелочно-галоидных кристаллах.

По нашему предложению К. К. Шварц исследовал явление сенсибилизованной флуоресценции в большом числе полиактивированных щелочно-галоидных фосфоров.[47] Им наблюдался перенос

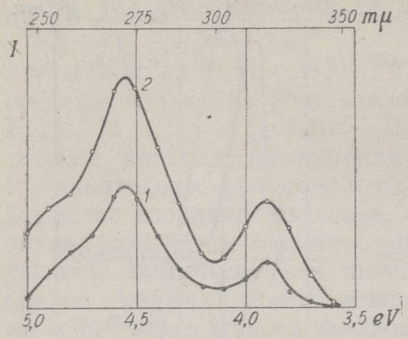

Рис. 5. Спектры возбуждения фосфоресценции ионов Mn^{++} (*1*) и ионов Pb^{++} (*2*) фосфора $CdBr_2$—Pb, Mn.

энергии от ртутеподобных ионов к ионам Mn^{++} не только для систем NaCl — Pb, Mn и KCl — Pb, Mn (см. также [48, 49]), но и для фосфоров NaCl — Tl, Mn и NaCl — In, Mn.

Недавно И. В. Яэк и В. Я. Карк обнаружили явление «сенсибилизованной фосфоресценции». В фосфоре $CdBr_2$— Pb, Mn при возбуждении в свинцовых полосах поглощения (переходы $^1S_0 \rightarrow {}^3P_1$ и $^1S_0 \rightarrow {}^1P_1$ в ионах Pb^{++}) свечение ионов Mn^{++} наблюдается не только в момент возбуждения ионов Pb^{++}, но и длительное время ($t > 10$ сек.) после прекращения возбуждения. Спектр возбуждения фосфоресценции ионов Mn^{++} совпадает со спектром возбуждения ионов Pb^{++} (рис. 5).

Таким образом, рекомбинационная люминесценция кристаллов может действительно иметь характер «сенсибилизованной фосфоресценции». При этом сенсибилизатором, вероятно, могут служить самые различные центры рекомбинации электронов и дырок (дырок и электронов).

Миграция энергии от основного вещества к центрам люминесценции

Определение энергетического выхода люминесценции некоторых щелочно-галоидных кристаллов при возбуждении жесткими излучениями показало, что энергия, поглощенная основным веществом фосфора, передается центрам люминесценции.[50] Обнаруженное недавно в Тарту [39, 21] явление высвечивающего действия рентгеновых лучей также свидетельствует о миграции энергии от основного вещества к примесным центрам (в данном случае — к центрам окраски). Возникает вопрос о механизме этих процессов.

Еще в 1935 г. А. Н. Теренин и Ф. Д. Клемент качественно показали [51], что свечение таллия в щелочно-галоидных кристаллах возбуждается не только в активаторных полосах поглощения, но и в области фундаментального поглощения основного вещества.

Г. Г. Лийдья провел количественное исследование этого явления на фосфорах KJ — Tl, RbJ — Tl, CsJ — Tl, KJ — In. На рис. 6 приведены измеренные относительно антрацена и люмогена (без поправок на отражение) спектры возбуждения стационарного свечения для фосфора KJ — Tl. Люминесценция ионов Tl^+ возбуждается не только в активаторных полосах поглощения (переходы $^1S_0 \rightarrow {}^3P_1$ и $^1S_0 \rightarrow {}^1P_1$), но и в области фундаментального поглощения KJ. [21, 22] Свечение ионов Tl^+ возникает, в частности, при создании в KJ — Tl возбужденных ионов йода — «анионных экситонов» (полоса поглощения с $\lambda_n = 219$ мμ). По-видимому, экситоны, сталкиваясь с центрами люминесценции, аннигилируют, передавая им свою энергию, то есть осуществляется следующая экситонная реакция: $M^+ + ex \rightarrow M^+ex \rightarrow M^{+*} \rightarrow M^+ + h\nu$. Из рис. 6 следует, что свечение ионов Tl^+ в KJ — Tl возникает также и при возбуждении в полосе поглощения с $\lambda_n = 186$ мμ. Эта полоса, по данным работы [52], соответствует переходам «зона-зона», при которых создаются электроны и дырки. При этом выход люминесценции не-

сколько выше, чем при «экситонном возбуждении». Выход люминесценции при возбуждении в области фундаментального поглощения сильно зависит от концентрации активатора. Если последняя значительно превосходит концентрацию остальных дефектов кристаллической решетки, передача энергии центрам люминесценции осуществляется почти без квантовых потерь и квантовый выход перестает расти при увеличении концентрации активатора. На основании приведенных данных мы приходим к выводу, что при возбуждении щелочно-галоидных фосфоров ионизирующими излучениями энергия передается от основного вещества к центрам люминесценции не только экситонами, но и в результате электронно-дырочных процессов.

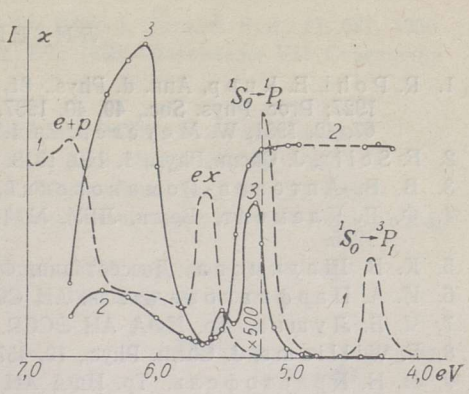

Рис. 6. Спектр поглощения (*1*), спектр возбуждения стационарного свечения (*2*) и спектр возбуждения фосфоресценции (*3*) кристалла KJ—Tl (0,01 мол. %).

Представляет большой интерес выяснить детальный механизм последних. С этой целью Г. Г. Лийдья и И. В. Яэк измерили спектр возбуждения длительной люминесценции ряда фосфоров. Для KJ — Tl такой спектр приведен на рис. 6. Для длительного свечения оптическое возбуждение в области фундаментального поглощения (переходы «зона-зона») оказывается более эффективным, чем при непосредственном возбуждении в ионах Tl^+ (переход $^1S_0 \rightarrow {}^1P_1$). Экситонное возбуждение дает в основном кратковременное свечение, при этом выход длительной люминесценции мал. Так как длительное свечение, как показали специальные опыты, соответствует тепловому освобождению электронов с *F*-уровней, то не вызывает сомнения, что при возбуждении «зона-зона» возникает длительная электронная рекомбинационная люминесценция. При возбуждении «зона-зона» в KJ — Tl возникают *F*-центры, при фототермической ионизации которых наблюдается свечение ионов Tl^+. Это также электронная рекомбинационная люминесценция. Свечение возникает при рекомбинации электронов с дырками, локализованными на центрах свечения, или около центров свечения, или (учитывая возможность сенсибилизационной передачи) даже вдали от центров.

Заключение

В результате многостороннего исследования активированных ртутеподобными ионами щелочно-галоидных кристаллов мы приходим к выводу, что они являются типичными кристаллофосфорами. Процессы, приводящие к их свечению, не могут быть сведены к электронно-колебательным процессам внутри центров люминесценции. Кристаллическая решетка основного вещества служит не только возмущающей средой и термостатом, но и средой, аккумулирующей и передающей энергию возбуждения.

Механизм люминесценции активированных щелочно-галоидных фосфоров сложен, при его рассмотрении необходимо учитывать активную роль электронных, дырочных, экситонных и сенсибилизационных процессов, а также сложную «химию» точечных, линейных и поверхностных дефектов кристаллической решетки.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Pohl, E. Rupp, Ann. d. Phys., **81**, 1161, 1926. R. Hilsch, Zs. f. Phys., **44**, 860, 1927; Proc. Phys. Soc., **49**, 40, 1937. W. Buenger, W. Flecsig, Zs. f. Phys., **67**, 42, 1931. W. Meyeren, Zs. f. Phys., **61**. 321, 1930.
2. F. Seitz, J. Chem. Phys., **1**, 150, 1938.
3. В. В. Антонов-Романовский, Тр. ФИАН СССР, 2, № 2—3,130, 1942.
4. Ф. Д. Клемент, Вестн. ЛГУ, № 4—5, 38, 1946; Тр. ИФА АН ЭССР, № 1, 3, 1955.
5. К. В. Шалимова, Диссертация, ФИАН СССР, 1953.
6. И. А. Парфианович, Изв. АН СССР, сер. физ., **13**, 161, 1949.
7. Ч. Б. Лущик, Тр. ИФА АН ЭССР, № 3, 3, 1955.
8. F. Williams, J. Chem. Phys., **19**, 457, 1951.
9. Н. Н. Кристофель, Тр. ИФА АН ЭССР, № 7, 85, 1958.
10. J. Schulman, R. Ginther, C. Klick, JOSA, **40**, 854, 1950.
11. M. Huniger, J. Rudolph, Zs. f. Phys., **117**, 81, 1940.
12. М. Л. Кац, А. С. Андрианов, ДАН СССР, **96**, 258, 1954.
13. Я. Я. Кирс, Тр. ИФА АН ЭССР, № 4, 108, 1956.
14. Н. Е. Лущик, Тр. ИФА АН ЭССР, № 6, 149, 1957; № 7, 119, 1958, № 7, 134, 1958.
15. Ч. Б. Лущик, Н. Е. Лущик, Тр. ИФА АН ЭССР, № 6, 3, 1957; Изв. АН СССР, сер. физ., **22**, 1347, 1958.
16. Ч. Б. Лущик, Н. Е. Лущик, К. К. Шварц, Тр. ИФА АН ЭССР, № 8, 3, 1958.
17. К. К. Шварц, Тр. ИФА АН ЭССР, № 7, 153, 1958.
18. Ч. Б. Лущик, Н. Е. Лущик, Г. Г. Лийдья, Л. А. Тейсс, Тр. ИФА АН ЭССР, № 6, 63, 1957.
19. Ч. Б. Лущик, Г. Г. Лийдья, Тр. ИФА АН ЭССР, № 7, 193, 1958.
20. Ч. Б. Лущик, В. И. Волин, Тр. ИФА АН ЭССР, № 7, 311, 1958.
21. Ч. Б. Лущик, Г. Г. Лийдья, Материалы VII Совещания по люминесценции, М., 1958.
22. Г. Г. Лийдья, Тр. ИФА АН ЭССР, № 10, 196, 1959.
23. Ч. Б. Лущик, Х. Ф. Кяэмбре, И. В. Яэк, Материалы VII Совещания по люминесценции. М., 1958.
24. И. В. Яэк, Тр. ИФА АН ЭССР, № 10, 166, 1959.
25. Ч. Б. Лущик, Э. С. Тийслер, Тр. ИФА АН ЭССР, № 10, 135, 1959.
26. К. К. Шварц, Материалы VII Совещания по люминесценции, М., 1958.
27. Н. Е. Лущик, Материалы VII Совещания по люминесценции, М., 1958.
28. Л. М. Шамовский, Ю. Н. Жванко, З. Л. Моргенштерн, Оптика и спектроскопия, 2, 821, 1957.
29. Л. М. Шамовский, А. А. Дунина, З. Л. Моргенштерн, Оптика и спектроскопия, 2, 599, 1958.
30. Л. М. Шамовский, Ю. Н. Жванко, Изв. АН СССР, сер. физ., **21**, 557, 1957.
31. F. Williams, B. Segall, P. Johnson, Phys. Rev., **108**, 46, 1957.
32. Н. Л. Кац, В. К. Никольский, Оптика и спектроскопия, **4**, 354, 1958.
33. И. К. Плявинь, Оптика и спектроскопия, **4**, 266, 1958.
34. C. Klick, J. Schulman, JOSA, **42**, 910, 1952.
35. D. Dexter, C. Klick, G. Russel, Phys. Rev., **100**, 603, 1955.
36. Т. А. Абдусадыков, Тр. ИФА АН ЭССР, № 10, 97, 1959.
37. Л. И. Тарасова, П. П. Феофилов, Оптика и спектроскопия, **4**, 696, 1957.
38. Р. И. Гиндина, Тр. ИФА АН ЭССР, № 11 (в печати).
39. Ч. Б. Лущик, Ф. Н. Заитов, В. Я. Карк, Л. А. Тейсс, И. В. Яэк, Материалы V Совещания по люминесценции, Тарту, 1957.
40. Ф. Н. Заитов, В. Я. Карк, Тр. ИФА АН ЭССР, № 6, 82, 1957.
41. Ф. Н. Заитов, Оптика и спектроскопия, **4**, 102, 1958.
42. П. А. Хелленурме, Тр. ИФА АН ЭССР, № 6, 132, 1957; № 7, 340, 1958.
43. Ч. Б. Лущик, Тр. ИФА АН ЭССР, № 1, 57, 1955; Изв. АН ЭССР, **4**, 217, 1955; ЖЭТФ, **30**, 488, 1956.

44. Ч. Б. Лущик, Тр. ИФА АН ЭССР, № 4, 42, 1956; J. Phys. et Rad., **17**, 687, 1956.
45. И. К. Витол, Тр. ИФА АН ЭССР, № 8, 175, 1958; Материалы VII Совещания по люминесценции, М., 1958.
46. J. Franck, Ann. d. Phys. 6F, 2B, **62**, 1948.
47. К. К. Шварц, У. А. Зирнитис, Тр. ИФА АН ЭССР, № 11 (в печати).
48. J. Schulman, R. Ginther, K. Murata, J. Appl. Phys., **18**, 782, 1947.
49. J. Schulman, R. Ginther, C. Klick, J. Electrochem. Soc., **97**, 123, 1950.
50. Л. М. Беляев, М. Д. Галанин, З. Л. Моргенштерн, З. А. Чижикова, ДАН СССР, **105**, 57, 1955.
51. А. Н. Теренин, Ф. Д. Клемент, Уч. зап. ЛГУ, сер. физ., № 1, 1935.
52. E. Taft, H. Philliph, Phys. Chem. Solids, **1**, 159, 1956; **3**, 1, 197.5

Институт физики и астрономии
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
12 V 1959

Ga+, Ge++, In+, Pb++, Sn++ ja Tl+ IOONIGA AKTIVEERITUD LEELISHALOGEENKRISTALLIDE LUMINESTSENTSI MEHHANISMIST

Tš. Luštšik,
füüsikalis-matemaatiliste teaduste kandidaat

Resümee

Autor ja tema kaastöötajad viisid läbi kuue «elavhõbeda sarnase» iooniga (In+, Ga+, Tl+, Sn++, Ge++, Pb++) aktiveeritud leelishalogeenkristallide komplekssе uurimise. Käesolevas artiklis on võetud vaatluse alla luminestsentsitsentrite olemus, rekombinatsioonilise luminestsentsi mehhanism ja energiamigratsiooni mehhanism neis fosfoorides.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia
Füüsika ja Astronoomia Instituut

Saabus toimetusse
12. V 1959

ON THE MECHANISM OF THE LUMINESCENCE OF ALKALI-HALIDE CRYSTALS ACTIVATED BY Ga+, Ge++, In+, Pb++, Sn++, Tl+

Ch. Lushchik

Summary

The author with collaborators has carried out a many-sided investigation of alkali-halide crystals activated by six «mercury-like» ions In+, Ga+, Tl+, Sn++, Ge++, Pb++.
In the present paper the nature of the luminescence centres, the mechanism of recombination luminescence and the mechanism of energy migration in these phosphors have been discussed.

Academy of Sciences of the Estonian S.S.R.,
Institute of Physics and Astronomy

Received
May 12th, 1959