

ВЫРАЩИВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ $\text{NaCl} - \text{Dy}^{3+}$ И ИЗУЧЕНИЕ ИХ НЕКОТОРЫХ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ.

В работах (1,2) обнаружено заметное влияние трехвалентных ионов редких земель (р. з.) на электрические и некоторые оптические свойства щелочногалогидных кристаллов (щгк). Была также обнаружена и люминесценция указанных ионов в щгк (3—8). Эта люминесценция линейчатая, и поэтому интерес к активизации редкими землями щгк возрос; однако, выращивание таких кристаллов оказалось нелегким делом.

Предполагается (1, 9, 10), что основной причиной трудности введения р. з. в щгк является полная нерастворимость хлорокисей, гидроокисей и окисей р. з. в расплавах щгк. Галогениды же р. з. легко превращаются при повышении температуры в присутствии следов воды и кислорода в указанные выше соединения. Исходя из этого нами была разработана описанная ниже методика выращивания кристаллов.

Известно, что спектры люминесценции ионов р. з. зависят от симметрии центров люминесценции, т. е. от ближайшего окружения редкоземельного иона. Поэтому представляется интересным проследить по спектрам люминесценции и возбуждения за изменениями в окружении редкоземельного иона, происходящими в результате варьирования условий выращивания и проведения термической и электролитической обработок.

1. Методика исследования

Исходными материалами для выращивания кристаллов служили порошкообразные соли марки «хч» и монокристаллы, полученные из НИИ «Монокристалл» (г. Харьков), где они выращивались методом Киропулоса из «ОСЧ-сырья» и отжигались (изготовлены в 1964 г.) В качестве активатора применялся DyCl_3 , марки «хч» (Новосибирск), (сосуд с активатором хранился в вакууме). Выращивание кристаллов происходило в кварцевых ампулах, куда монокристаллы NaCl помещались расколотыми на пластинки возможно больших размеров. Одновременно в тигель

загружалась примесь и кристаллическая сера. Шихта продолжительное время сушилась (2—3 часа) в вакууме при температурах порядка 100°C . После сушки ампула отпаивалась, помещалась в печь, нагревалась до плавления шихты и после одного-двух часов выдержки опускалась со скоростью 8—30 мм/час в область с градиентом температуры 15 град/см. После кристаллизации расплава температура в печи понижалась в течение 2 часов до 500°C , затем печь отключалась и кристалл остывал вместе с печью.

Люминесценция кристаллов изучалась фотографически при температуре 300°K и 77°K и фотометрически при температуре 300°K . Для исследований при $t^{\circ} = 77^{\circ}\text{K}$ использовался дьюар, изготовленный из увиолевого стекла.

Возбуждение люминесценции осуществлялось осветителем ОИ-18 с лампой СВД-120А и фильтрами УФС-2 и УФС-3, причем стеклянная линза осветителя ОИ-18 была заменена кварцевой.

Люминесценция регистрировалась призменным стеклянным спектрографом ИСП-51с малой камерой на фотоэлементах: 1) аэропленка, панхром типа 10—800 (светочувствительность в единицах ГОСТ — 0,85—1200), 2) РФ-3 (чувствительность 800 обратных рентген, изохром). Полученные негативы фотометрировались на микрофотометре МФ-2. Более точное определение длин волн наблюдаемых линий производилось на дифракционных приборах ДФС-8 (дисперсия $6\text{Å}/\text{мм}$) и ДФС-12 (с фотоумножителем ФЭУ-17А).

Инфракрасная люминесценция исследовалась в лаборатории Ю. К. Воронько*, (ФИАН СССР) в качестве приемника излучения использовался PbS.

Спектры возбуждения изучались при комнатной температуре на установке, представляющей собой двойной монохроматор, в качестве приемника излучения использовался ФЭУ-17. Сигнал регистрировался микроамперметром М-95**.

2. Результаты эксперимента

Часть ампул перед отпаиванием откачивалась до давления 10^{-2} мм рт. ст. В этом случае после кристаллизации, кроме монокристалла, в верхней части ампулы возникал конгломерат, иногда этот конгломерат был бесцветен, иногда окрашен. Остальные ампулы откачивались до давления 10^{-3} мм рт. ст. В этом

* Пользуемся случаем выразить искреннюю благодарность Ю. К. Воронько за проведенные измерения.

** Исследования спектров возбуждения проведены во ВНИИ «Монокристалл» (Харьков) в лаборатории, руководимой Б. С. Скробогатовым, за что искренне благодарим его.

случае кристаллы были совершенны, а на поверхности кристалла наблюдались мельчайшие капли закristаллизовавшейся серы.

Распределение примесей в кристалле, судя по интенсивности люминесценции, неравномерно, и концентрация примеси увеличивается снизу вверх. Кристаллы прозрачны, бесцветны, легко раскалываются по плоскостям спайности.

Спектры люминесценции образцов кристаллов, выращенных в ампулах, предварительно откачанных до 10^{-2} мм рт. ст., не зависят от места выбора образца (такие спектры ниже будем обозначать CI).

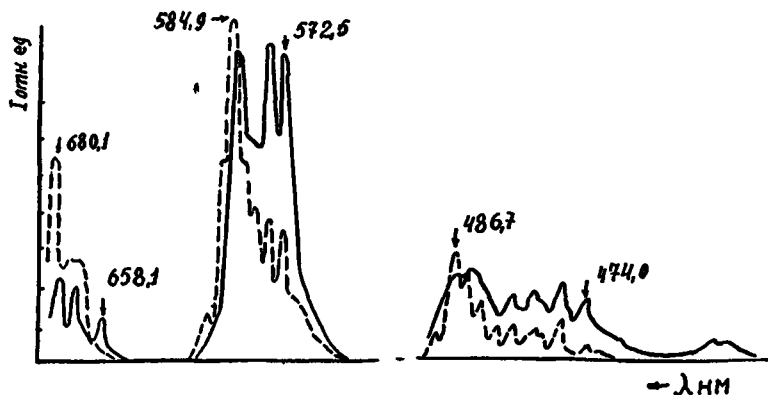


Рис. 1. Спектры люминесценции NaCl—Dy³⁺ (CI)
а) $t^{\circ} = 300^{\circ}\text{K}$; е) $t^{\circ} = 77^{\circ}\text{K}$.

Монокристаллы, выращенные в ампулах, откачанных до давления 10^{-3} мм рт. ст., дают два вида спектров люминесценции. Образцы, выбранные из самой верхней части кристалла (до 10% по высоте), давали спектр, совпадающий со спектром CI. Вся остальная часть кристалла имела отличный от CI спектр люминесценции (ниже будем обозначать его CII).

На рис. 1 (а и е) приведены микрофотограммы спектров люминесценции CI при температурах 300°K и 77°K . Как видно, спектр состоит из трех групп линий в областях 6700Å , 5800Å и 4800Å . Все три группы линий находятся на слабом фоне.

Следует отметить, что среди кристаллов со спектром типа CI, встречаются такие, у которых линии по положению совпадают с CI, но в области 5800Å взаимная интенсивность линий изменяется (ниже будем называть такие спектры CIA).

На рисунке 2 (а и е) показан спектр люминесценции типа CII при температурах 300°K и 77°K . Спектр этого типа, также, как и CI, состоит из трех групп линий в областях 6700Å , 5800Å , 4800Å .

Спектры возбуждения описанных выше кристаллов показаны на рис. 3 и 4. Как видно, в спектрах возбуждения наблюдается несколько нечетко выраженных полос в области 250—350 нм.

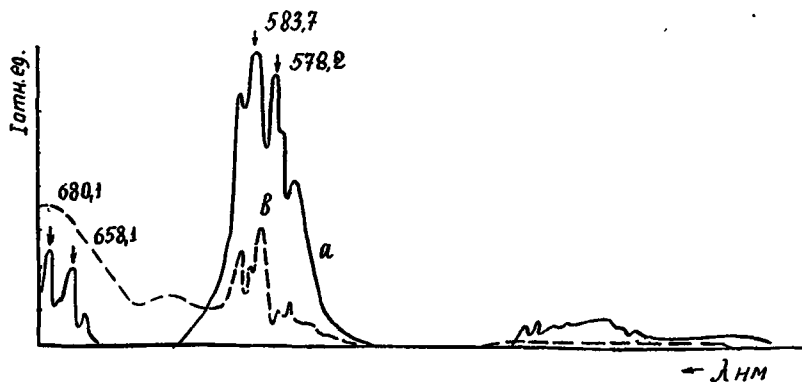


Рис. 2. Спектры люминесценции NaCl—Dy³⁺ (CII)
а) $t^\circ = 300^\circ\text{K}$; б) $t^\circ = 77^\circ\text{K}$.

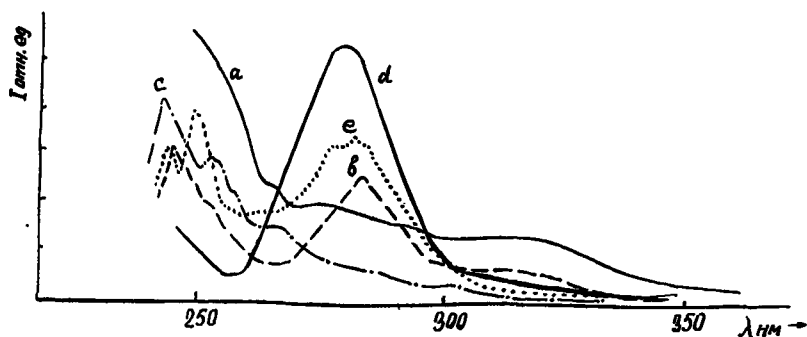


Рис. 3. Спектры возбуждения
а) NaCl—Dy³⁺ (CII) до обработки, $\lambda_{\text{взл.}} = 480 \text{ нм}$
б) NaCl—Dy³⁺ (I), окрашен, $\lambda_{\text{взл.}} = 435 \text{ нм}$
в) NaCl—Dy³⁺ (CII), окрашен, $\lambda_{\text{взл.}} = 580 \text{ нм}$
г) NaCl окрашен, $\lambda_{\text{взл.}} = 435 \text{ нм}$
д) NaCl—S окрашен, $\lambda_{\text{взл.}} = 435 \text{ нм}$

Кристаллы NaCl — Dy³⁺ подвергались обработке в постоянном электрическом поле на воздухе, окрашивались и обесцвечивались с плоских электродов при различных температурах. Поведение кристаллов типа CII и CII в ходе такой обработки резко отличается друг от друга.

Кристаллы типа СI в области температур $330^{\circ} - 450^{\circ}\text{C}$ окрашиваются в синий цвет. В спектре поглощения окрашенных образцов имеется одна интенсивная полоса с $\lambda_{\text{макс}} = 580 \text{ нм}$, совпадающая по положению с коллоидальной полосой в NaCl.

В кристаллах типа СII в области температур $350 - 450^{\circ}\text{C}$ растут дендриты, образцы не окрашиваются. Интенсивность люминесценции увеличивается с увеличением времени пребывания кристалла в электрическом поле без изменения спектра люминесценции.



Рис. 4. Спектры возбуждения NaCl—Dy³⁺ (СII)

- а) до обработки, $\lambda_{\text{изл.}} = 480 \text{ нм}$
- б) окрашен, $\lambda_{\text{изл.}} = 580 \text{ нм}$
- с) обесцвечен, $\lambda_{\text{изл.}} = 580 \text{ нм}$

В области температур $450 - 600^{\circ}\text{C}$ кристаллы типа СI интенсивно окрашиваются цветом, характерным для F-центров в NaCl, однако после быстрого извлечения из печи окраска образца переходит в лиловую. Во всех случаях, когда происходит окрашивание образца, интенсивность люминесценции уменьшается, однако, спектр люминесценции не меняется.

Кристаллы типа СII в указанной области температур также окрашиваются интенсивно в печи цветом, характерным для F-центров, однако при быстром извлечении образца из печи окраска превращается в синюю. Интенсивность люминесценции растет, а в спектре люминесценции происходят значительные изменения (рис. 5 кривая а). Если окраску вывести изменением направления поля, то спектр люминесценции остается измененным (рис. 5, кривая б).

Окрашенные кристаллы типа СII обнаруживают инфракрасную люминесценцию в области $1,6 - 1,8 \mu$. (рис. 5, кривая с). Следует отметить, что в спектрах поглощения таких кристаллов, наряду с F-полосой, наблюдается интенсивная полоса с $\lambda_{\text{макс}} = 580 \text{ нм}$.

Спектр возбуждения $\text{NaCl} - \text{Dy}^{3+} (\text{Cl})$ после электролитического окрашивания при $t^\circ = 500 - 550^\circ \text{C}$ показаны на рис. 3, (кривые *b*, *c*). Видно, что спектр возбуждения кристаллов типа Cl меняется, выделяются три полосы с $\lambda_{\text{макс}} = 245 \text{ нм}$, 285 нм , и 315 нм . Для сравнения были окрашены в тех же условиях образцы чистого NaCl и $\text{NaCl} - \text{S}$, выращенного только с добавлением кристаллической серы. Нужно отметить, что после окрашивания образцы NaCl (монокристаллы получены из Харьковского НИИ «Монокристалл») содержат в спектре поглощения,

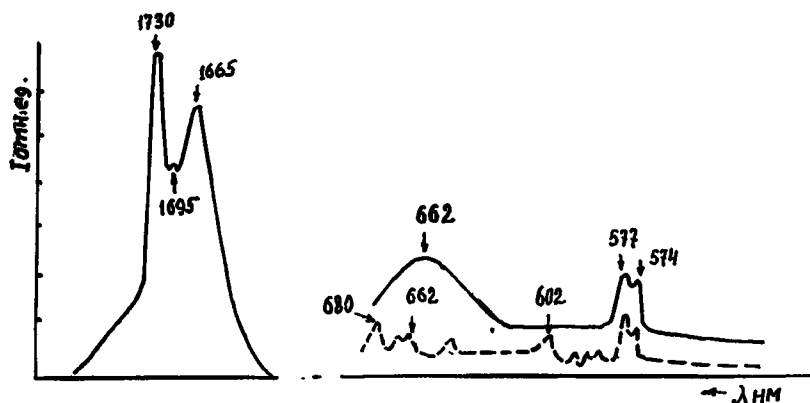


Рис.5. Спектры люминесценции $\text{NaCl} - \text{Dy}^{3+} (\text{Cl})$
a) окрашен, $t^\circ = 300^\circ \text{K}$
в) обесцвечен, $t^\circ = 300^\circ \text{K}$
с) спектр инфракрасной люминесценции окрашенного $\text{NaCl} - \text{Dy}^{3+} (\text{Cl})$, $t^\circ = 77^\circ \text{K}$.

кроме полосы с $\lambda_{\text{макс}} = 470 \text{ нм}$, совпадающей с F -центрами в NaCl , полосу $\lambda_{\text{макс}} = 276 \text{ нм}$. Такие образцы обладают интенсивной люминесценцией в области $400 - 500 \text{ нм}$ ($\lambda_{\text{макс}} = 435 \text{ нм}$). В спектре возбуждения они имеют одну интенсивную полосу с $\lambda_{\text{макс}} = 285 \text{ нм}$ (рис. 3, кривая *d*). До окрашивания эти кристаллы не люминесцировали.

Кристаллы $\text{NaCl} - \text{S}$ после электролитического окрашивания также люминесцируют в области $400 - 500 \text{ нм}$ и в спектре возбуждения имеют полосу $\lambda_{\text{макс}} = 285 \text{ нм}$. Кроме этой полосы, такие кристаллы также как и $\text{NaCl} - \text{Dy}^{3+} (\text{Cl})$, имеют в спектре возбуждения полосы в области $240 - 260 \text{ нм}$ (рис. 3, кривая *e*).

Все описанные выше спектры возбуждения были получены, когда в спектре люминесценции фиксировалась длина волны $\lambda = 435 \text{ нм}$. Если зафиксировать длину волны $\lambda = 580 \text{ нм}$, то спектр возбуждения $\text{NaCl} - \text{Dy}^{3+} (\text{Cl})$ будет состоять только из полос в области $240 - 260 \text{ нм}$. Нужно заметить, что в спектре

возбуждения рентгенизированного кристалла $\text{NaCl} - \text{Dy}^{3+} (\text{CI})$ ($\lambda_{\text{изл}} = 480 \text{ нм}$) нет полосы с $\lambda_{\text{макс}} = 285 \text{ нм}$.

На рис. 4 приведены спектры возбуждения кристаллов $\text{NaCl} - \text{Dy}^{3+} (\text{CII})$ после электролитического окрашивания (кривая *b*, $\lambda_{\text{изл}} = 580 \text{ нм}$). Как видно, его спектр возбуждения отличается от соответствующего спектра $\text{NaCl} - \text{Dy}^{3+} (\text{CI})$ (рис. 3, кривая *c*) наличием широкой полосы в области 270—340 нм. После обесцвечивания спектр возбуждения $\text{NaCl} - \text{Dy}^{3+} (\text{CII})$ в общем не меняется, лишь изменяется форма полосы 270—340 нм, в ней выделяется максимум с $\lambda = 310 \text{ нм}$.

3. Обсуждение результатов

Изложенные выше экспериментальные результаты можно объяснить на основании анализа условий выращивания и допущения о существовании в $\text{NaCl} - \text{Dy}^{3+}$ различных центров люминесценции.

Условия выращивания выбирались нами, исходя из требования микрокомпенсации заряда (II), причем предполагалось, что осуществлять компенсацию могут как катионные вакансии (12), так и специально вводимые при выращивании двухвалентные анионные примеси (13, 14). Вхождение катионных вакансий происходит также в процессе выращивания, когда избыточный положительный заряд $2n$ (n — концентрация ионов Dy^{3+}) влечет за собой отсутствие $2n$ катионов основы.

Кристаллическая сера добавлялась нами из следующих соображений: в случае хорошего вакуума (лучше 10^{-3}) пары серы ($t^{\circ}_{\text{кип}} = 444,5^{\circ} \text{C}$) должны играть роль, аналогичную парам галоида при окрашивании щелочно-галоидных кристаллов в их парах (5) т. е. адсорбируясь на гранях и вдоль поверхности внутренних трещин присоединять электроны хлора, тем самым способствуя возникновению электрического поля, под влиянием которого катионы диффундируют из внутренних частей кристалла на поверхность, в результате чего возникает избыток катионных вакансий.

В то же время, при наличии в объеме ампулы водорода, сера окисляет его образуя H_2S . H_2S , растворяясь в кристалле, вводит ионы S^{2-} в решетку. Химический анализ показал присутствие в кристаллах 0,05% S^{2-} . Таким образом, возникает возможность микрокомпенсации избыточного заряда Dy^{3+} ионами S^{2-} . Образование повышенной концентрации катионных вакансий, а следовательно, и микрокомпенсация ими заряда Dy^{3+} в этом случае маловероятна.

Таким образом, в самих условиях выращивания заключена возможность образования центров люминесценции с различным окружением и различной энергией связи. Анализ оптических свойств вышеуказанных кристаллов подтверждает наши предположения о способах компенсации.

Из геометрических соображений ясно, что наибольшей энергией связи должен обладать центр, в котором компенсация заряда осуществляется ионами S^{2-} в первой координационной сфере; центры, в которых компенсация осуществляется катионными вакансиями во второй, четвертой и более далеких сферах, будут менее устойчивы. Окружение наименее устойчивых центров в ходе электролитического окрашивания может меняться по следующим причинам: во-первых, при температурах F -окрашивания должна разрушаться связь между Dy^{3+} и катионными вакансиями, например, известно (13, 18, 19), что при $t^\circ \geq 500^\circ C$ двухвалентные примесные катионы уже не объединяются с катионными вакансиями, а представляют собой неподвижно расположенные в решетке избыточные положительные заряды; во-вторых, при указанных температурах перенос заряда осуществляется катионными, анионными вакансиями и электронами, что ведет к возможности образования пар вакансий и различных центров окраски. Все это приведет к возникновению новых центров люминесценции с измененным кристаллическим полем, к изменениям в спектрах люминесценции и возбуждения, которые наблюдались в действительности. Причем, разрушение менее устойчивых центров, возникших при выращивании (по нашему предположению — это центры ответственные за спектр люминесценции типа CII, в которых компенсация осуществляется катионными вакансиями), происходит необратимо, спектры люминесценции и возбуждения не восстанавливаются после обесцвечивания (рис. 4, кривая *c*, рис. 5, кривая *b*)

Электролиз $NaCl - Dy^{3+}$ (CII) при температурах $350-450^\circ C$ не приводит к изменению спектра люминесценции. Рост интенсивности люминесценции образца с увеличением времени пребывания под полем можно объяснить, если предположить двойное распределение примеси, т. е. наличие, кроме ионов Dy^{3+} в узлах кристаллической решетки, скоплений ионов Dy^{3+} в дефектных местах. Исследования, проведенные с шгк, содержащими одновалентные и двухвалентные примеси (Me^+ и Me^{2+}), доказали двойное распределение указанных примесей в шгк (12, 20, 21), в частности, показана возможность локализации примесей вблизи дислокаций (22, 23). Для $NaCl - MnCl_2$ (19) обнаружено существование локально нескомпенсированного заряда, компенсация которого осуществляется в довольно крупной области кристалла.

Именно в случае существования центров люминесценции, представляющих собой ион Dy^{3+} в узле с компенсацией катионными вакансиями (CII), электролитическая обработка (без F -окрашивания) и сопровождающая ее закалка приведут к росту числа этих центров, т. к. в этой области температур $NaCl$ проводит только за счет движения катионных вакансий. Нужно заметить, что одна закалка также увеличивает интенсивность люминесценции, но менее эффективно.

Изменения в видимой области спектра люминесценции NaCl—Dy^{3+} (CII) сопровождаются появлением инфракрасной люминесценции (рис. 5 кривая С). По поводу происхождения этой люминесценции можно высказать некоторые соображения: в процессе окрашивания ($t^\circ \approx 500^\circ \text{C}$), когда катионные вакансии удаляются из ближайших координационных сфер, часть ионов Dy^{3+} захватывает электроны F -центров, что приводит к возникновению комплексов из редкоземельного иона, F -центра и вакансий в более удаленных сферах. Сильное кристаллическое поле такого комплекса возможно смещает термы Dy^{2+} , в результате чего полоса люминесценции Dy^{2+} смещается и расширяется (1,6—1,8 μ вместо 2,36—2,5 μ в CaF_2).

Центры, ответственные за спектр люминесценции типа CI, более устойчивы, чем CII, электролитическая обработка не приводит к необратимым изменениям в спектрах люминесценции и возбуждения. Вероятно большая часть этих центров представляет собой ионы Dy^{3+} в узле кристаллической решетки и ионы S^{2-} в ближайших координационных сферах, осуществляющие микрокомпенсацию. В силу относительно меньшей подвижности ионов S^{2-} (I3) электролитическая обработка при температурах 350—450°С не приводит к росту числа люминесцирующих центров (CI), а в силу большей энергии связи такого центра окрашивание при $t^\circ \approx 500^\circ \text{C}$ не вызывает изменения спектра люминесценции Dy^{3+} .

Однако, спектр возбуждения кристаллов NaCl—Dy^{3+} (CI) ($\lambda_{\text{вкл}} = 435 \text{ нм}$) после электролитического окрашивания меняется, появляется интенсивная полоса с $\lambda_{\text{макс}} = 285 \text{ нм}$, которая присутствует также в электролитически окрашенных NaCl , NaCl—S , NaCl—Dy^{3+} (CII).

Эта полоса отсутствует в спектрах возбуждения NaCl—Dy^{3+} (CI) и NaCl—Dy^{3+} (CII), если фиксировать в спектре люминесценции $\lambda = 580 \text{ нм}$. Как было указано выше, появление этой полосы в спектре возбуждения не сопровождается изменениями в линейчатом спектре люминесценции NaCl—Dy^{3+} (CI), а в «беспримесном» окрашенном ведет к возникновению люминесценции в широкой полосе С $\lambda_{\text{макс}} = 435 \text{ нм}$. Поэтому можно утверждать, что сплошной фон спектра люминесценции в области 400—500 нм ($\lambda = 435 \text{ нм}$) связан с возбуждением в области 285 нм . Существованием в спектре поглощения окрашенного «беспримесного» NaCl полосы с $\lambda = 276 \text{ нм}$, наряду с описанными выше полосами в спектрах возбуждения и люминесценции, может быть результатом образования в ходе электрического окрашивания неизвестных центров, возникающих за счет наличия посторонних примесей в исходных монокристаллах NaCl . Можно утверждать, что примеси не вводятся в ходе выращивания в наших условиях, поскольку окрашивались исходные монокристаллы NaCl , также можно утверждать, что эти примеси не вводятся при электриче-

ском окрашивании, так как окрашенные образцы монокристаллов NaCl, выращенных из порошкообразного сырья марки «хч» в нашей лаборатории, не люминесцируют и не поглощают в указанных выше областях. Безусловно, наличие посторонних примесей осложняет интерпретацию наблюдаемых явлений, но в первом приближении, можно считать, что эти примеси не участвуют в ближайшем окружении иона Dy^{3+} и не оказывают влияния на симметрию центров люминесценции. Подтверждением этого положения является неизменность спектра люминесценции Dy^{3+} (Cl) после электрической обработки, несмотря на появление в спектре возбуждения полосы с макс = 285 *н.м.* Возможно, наличие посторонних примесей влияет на механизм люминесценции, но это пока лишь предположения, требующие дальнейших исследований.

Нужно заметить, что обозначение нами кристаллов NaCl — Dy^{3+} «тип Cl» и «тип ClI» не означает, что в каждом из них имеется только один вид центров люминесценции, вероятнее всего что спектры типа Cl и ClI — это результат наложения спектров люминесценции различных центров, но компенсация заряда в этих центрах преимущественно осуществляется предположенными нами способами

Таким образом, можно считать, что спектры люминесценции NaCl — Dy^{3+} зависят от атмосферы, в которой выращены кристаллы. Если в атмосфере присутствует H_2S или другие сульфиды, то микрокомпенсация преимущественно осуществляется ионами S^{2-} . В отсутствие H_2S микрокомпенсация осуществляется катионными вакансиями (ClI). Центры люминесценции типа ClI изменяют свою структуру при электролитическом окрашивании кристаллов. Часть таких центров превращается в сложные комплексы, люминесцирующие в области 1,6—1,8 μ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. Ф. Писаренко. Уч. записки КБГУ. 13, 30, (1961); 15, 262, (1962)
2. В. Ф. Писаренко, С. В. Воропаева, В. В. Попов. Уч. записки КБГУ, 24, 197, (1965).
3. А. В. Долгополова, Л. В. Ковалева, С. А. Сазонова, Б. С. Скоробогатов. Оптика и спектроскопия, 17, 141 (1964).
4. Б. С. Скоробогатов, С. Б. Сазонова, А. В. Долгополова, Л. В. Ковалева. Оптика и спектроскопия, 16, 538. (1964). Изв. АН СССР. сер. физ. 29, 406, (1965).
5. А. В. Долгополова, С. И. Киреева, С. А. Сазонова, Б. С. Скоробогатов. Сб. «Спектроскопия кристаллов». М. 1965.
6. Asundi R. K., Naik R.S., Current. Sci. 34, № 19, 550, (1965).
7. Ф. З. Гильфанов, А. Л. Сталов. Сб. аспирантских работ Казанского ун-та. Физика. Казань, 1965, стр. 10—17.
8. V. F. Pissarenko and S. V. Voropaeva, Phys. St. Sol. 15, 95, (1966).
9. Reisfeld and Glasner, G. Opt. Soc. Amer. 54, № 3, (1964).
10. Б. Т. Коршунов, Д. В. Дробот ЖНХ, 10, 939, (1965).

11. З. А. Трапезникова, ДАН СССР, 74, 465, (1950) ЖЭТФ, 27, 283, (1951).
 12. Е. К. Заводовская, Межвузов. сб. трудов «Действие излучений на свойства материалов». Изд-во Новосиб. гос. ун-та, вып. 2, 1963, стр. 27—30.
 13. G. D. Watkins, Bull. Amer. Phys. Soc, ser. II, 3, 135, (1958).
 14. Ч. Б. Лущик, Н. Е. Лущик, С. Г. Зазубович, И. А. Мууга, Физика щелочногалонидных кристаллов, Рига, 1962, стр. 102.
 15. Н. А. Цаль, М. В. Пашковский, И. Д. Набитович, ФТТ, 6, 1828, (1964).
 16. Н. А. Цаль, М. В. Пашковский, ФТТ, 6, 781, (1964).
 17. И. Я. Мелик—Гайказян, Л. И. Рощина, М. И. Игнатьева, ФТТ, 7, 3465, (1965).
 18. H. Härtel und P. Lütty, z. Phys. 182, 111—122, (1964).
 19. В. Б. Лайзан, А. Я. Витол, Радиационная физика, I, Рига, 1964, стр. 105—120.
 20. Р. И. Гиндина, ИАН СССР, сер. физ. 25, 354, (1961).
 21. K. G. Vansiger, E. E. Schneider, G. Appl. Phys. 33, 1, 383, (1962).
 22. К. Элбаум, УФН, 79, 545, 1963.
-