

02

Формирование Cr^{2+} – Fe^{2+} кластеров в кристалле $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ © М.Е. Дорошенко¹, Х. Желинкова²¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
119991 Москва, Россия² Чешский технический университет,
11519 Прага, Чешская Республика

e-mail: dorosh@lst.gpi.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

В окончательной редакции 14.03.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

В работе исследованы спектрально-кинетические свойства ионов хрома и железа при низкой (77 К) температуре в кристаллах твердого раствора $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ с содержанием ионов марганца $x = 0.05$ и $x = 0.3$, и показаны различия, наблюдаемые для кристаллов, активированных только ионами хрома, от кристаллов соактивированных ионами хрома и железа. Наблюдаемые различия могут быть объяснены формированием в соактивированных кристаллах кластеров Cr^{2+} – Fe^{2+} .

Ключевые слова: твердый раствор $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$, кластеры Cr^{2+} – Fe^{2+} , спектроскопия поглощения, люминесценция, кинетики затухания.

DOI: 10.21883/OS.2023.04.55548.72-22

Введение

Кристаллы ZnSe , активированные ионами двухвалентного хрома или железа, активно используются при создании эффективных перестраиваемых лазеров среднего ИК диапазона длин волн. В последнее время достигнут существенный прогресс в максимальной выходной мощности и КПД таких лазеров. Так, для кристаллов $\text{ZnSe}:\text{Cr}^{2+}$ максимальный продемонстрированный КПД генерации превышает 60%, а мощность непрерывной генерации составила порядка 140 W. Для кристаллов $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ была продемонстрирована выходная мощность порядка 10 W с эффективностью свыше 40% [1]. В импульсном режиме генерации для кристаллов $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ была продемонстрирована выходная энергия более 1 J [2]. Такой прогресс в развитии лазеров на основе кристаллов $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ позволяет разрабатывать на их основе реальные приборы, например лазерные спектрометры [3]. Основным недостатком лазеров на ионах двухвалентного железа, помимо существенного укорочения времени жизни при повышении температуры, является сложность источников оптической накачки, работающих в области $3\ \mu\text{m}$. Хотя на данный момент уже продемонстрирована возможность накачки ионов двухвалентного железа достаточно компактным источником на основе волокна $\text{ZBLAN}:\text{Er}^{3+}$, для которого была реализована генерация ионов железа с выходной мощностью более 2 W при дифференциальном КПД до 59% [4]. Другим способом существенного упрощения источников оптической накачки ионов Fe^{2+} может служить соактивация кристаллов ZnSe одновременно ионами хрома и железа и использование процесса безызлучательного переноса энергии $\text{Cr}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$. При этом появляется возможность использовать всё многообразие

коммерчески доступных оптических источников накачки для ионов хрома (диапазон длин волн 1500–2300 nm) и реализовать длинноволновую (3500–5300 nm) перестраиваемую генерацию ионов железа. Возможность переноса энергии от ионов хрома к ионам железа была показана для кристалла ZnSe еще в [5–7]. К сожалению, использование процесса переноса энергии $\text{Cr}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ в кристалле ZnSe для реализации лазерной генерации ионов железа пока не продемонстрировано. Более того, в [5,8] наблюдалось тушение люминесценции ионов двухвалентного железа и снижение мощности и эффективности лазерной генерации при соактивации кристалла ZnSe ионами хрома. Однако такая возможность была успешно продемонстрирована для ряда твердых растворов типа $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}:\text{Cr}^{2+}, \text{Fe}^{2+}$ и $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Se}:\text{Cr}^{2+}, \text{Fe}^{2+}$ [9–13].

Возможность формирования кластеров ионов переходных металлов ($\text{Cr}^{2+}, \text{Fe}^{2+}$) в кристаллах селенида цинка (ZnSe) уже обсуждалась в литературе. Было показано заметное изменение спектрально-кинетических свойств при повышении концентрации ионов хрома (максимум спектра люминесценции ионов хрома сдвигается в область больших длин волн, а время затухания люминесценции укорачивается) [14]. Аналогичную ситуацию можно наблюдать и для ионов двухвалентного железа в кристалле ZnSe либо при увеличении концентрации [15], либо при изменении длины волны возбуждения [16]. Однако в соактивированных кристаллах также возможно образование кластеров Cr^{2+} – Fe^{2+} , приводящее к изменению спектральных свойств как ионов хрома, так и ионов железа в таких кластерах из-за модификации локального окружения. При этом такая трансформация спектрально-кинетических свойств ионов хрома и железа в Cr^{2+} – Fe^{2+} кластерах может оказывать существенное влияние на процесс безызлуча-

тельного переноса энергии $\text{Cr}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$. Исследованию возможности образования таких кластерных центров в кристаллах твердого раствора $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}:\text{Cr}^{2+}$, Fe^{2+} с различным содержанием ионов марганца, а также определению их спектральных свойств посвящена предлагаемая работа.

Методы

В экспериментах использовались кристаллы $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}:\text{Cr}^{2+}$, Fe^{2+} с малым ($x = 0.05$) и высоким ($x = 0.3$) содержанием ионов марганца. Исследования проводились при низкой температуре (77 К). Спектры поглощения ионов хрома и железа записывались с использованием криостата tSTAT335x (RTI Ltd.) во FTIR-спектрофотометре Infracum FT-08. Спектры люминесценции и кинетика затухания люминесценции измерялись в азотном криостате Janis VPF-100 или при возбуждении в полосу поглощения ионов хрома импульсным наносекундным YLF:Er-лазером с длиной волны 1735 nm, или при непосредственном возбуждении ионов железа импульсным наносекундным лазером YAG:Er с длиной волны 2940 nm. Для регистрации излучения использовались: в области люминесценции ионов хрома ~ 2300 nm IBSG PD36 05, а в области люминесценции ионов железа ~ 4400 nm – Vigo PVI-6, подключенные к цифровому осциллографу. Все сигналы записывались в цифровой форме с помощью компьютера.

Результаты и обсуждение

На рис. 1,*a* приведены экспериментально измеренные низкотемпературные (77 К) спектры поглощения ионов хрома в кристаллах твердого раствора $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}:\text{Cr}^{2+}$ с различным содержанием ионов марганца. Для сравнения на рисунке приведен измеренный в аналогичных условиях спектр поглощения ионов хрома в кристалле ZnSe. Как видно из рисунка, для кристаллов, содержащих в качестве активатора только ионы хрома, спектры поглощения при увеличении содержания ионов марганца (x) отличаются в основном в длинноволновой части спектра, а коротковолновый край для всех кристаллов практически совпадает. При этом, как наблюдалось и ранее [17], чем выше содержание марганца x в твердом растворе, тем больше спектр смещается в длинноволновую область. На рис. 1,*b* приведены спектры поглощения ионов хрома для кристаллов $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ с различным содержанием ионов марганца, соактивированных ионами хрома и железа. Спектр поглощения кристалла $\text{ZnSe}:\text{Cr}^{2+}$ здесь аналогичен приведенному на рис. 1,*a* и показан для сравнения. Как следует из рисунка, для соактивированных ионами железа кристаллов форма спектров поглощения ионов хрома отличается от не соактивированных. Здесь помимо изменения в длинноволновой части спектра

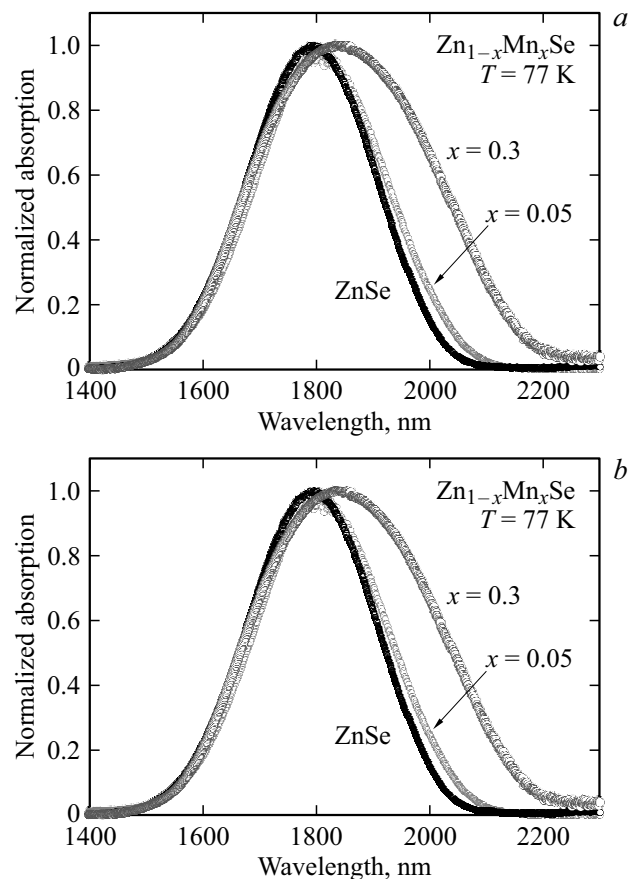


Рис. 1. Низкотемпературные спектры поглощения ионов хрома в твердых растворах $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ с различным содержанием марганца x , активированных только ионами хрома (*a*) и соактивированных ионами хрома и железа (*b*).

поглощения, как на рис. 1,*a*, хорошо наблюдаются изменения и в коротковолновой части, особенно заметные для кристалла $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ ($x = 0.3$) с более высоким содержанием ионов марганца.

Как показано на рис. 2,*a*, простейшая аппроксимация низкотемпературного (77 К) спектра поглощения ионов хрома в кристалле $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ ($x = 0.3$) возможна с использованием одного гауссова контура (рис. 2,*a*, штриховая линия). Для соактивированного кристалла аппроксимация спектра поглощения возможна двумя гауссовыми контурами, один из которых по всем (ширина линии, положение максимума) своим параметрам, кроме амплитуды, соответствует гауссову контуру, полученному для кристалла, активированного только ионами хрома. При этом дополнительная полоса имеет максимум с более высокой частотой (более коротковолновая линия в спектре поглощения) при близкой ширине линии. Разница в положениях максимумов этих линий достаточно существенна и составляет порядка 350 cm^{-1} . Эта дополнительная коротковолновая линия поглощения по всей видимости связана с формированием в соактивированном кристалле $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}:\text{Cr}^{2+}$, Fe^{2+} ионов хрома с модифицированным локальным окружением [18],

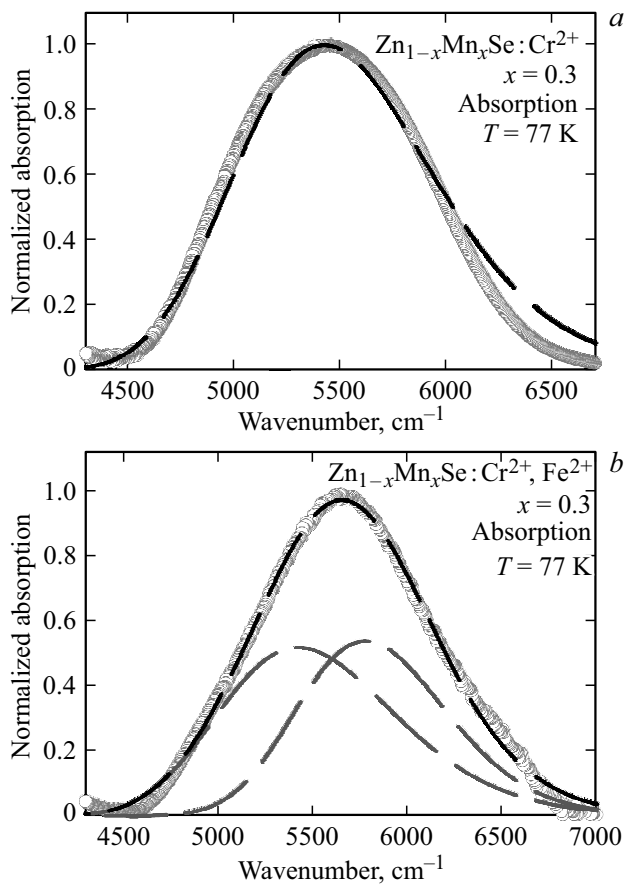


Рис. 2. Разложение на гауссовы контуры низкотемпературных спектров поглощения ионов хрома в твердом растворе $Zn_{1-x}Mn_xSe$ ($x = 0.3$), активированного только ионами хрома (a) и соактивированного ионами хрома и железа (b).

связанным с наличием в кристалле дополнительно ионов железа.

Низкотемпературные (77 K) спектры люминесценции ионов хрома в кристалле $Zn_{1-x}Mn_xSe:Cr^{2+}$ ($x = 0.05$) для случая активации ионами хрома и соактивации одновременно ионами хрома и железа приведены на рис. 3, a. На рисунке также показан край спектра поглощения ионов железа в кристалле $Zn_{1-x}Mn_xSe:Fe^{2+}$ ($x = 0.05$). Видно, что спектры люминесценции, как и спектры поглощения ионов хрома, для соактивированного кристалла вновь существенно отличаются от не соактивированного. Причем если разницу в длинноволновой части спектра люминесценции можно объяснить влиянием поглощения части люминесценции ионов хрома ионами железа (из рисунка видно, что спектр люминесценции ионов хрома перекрывается со спектром поглощения ионов железа), то изменения в коротковолновой части спектра люминесценции, как и для спектра поглощения, по всей видимости связаны с изменением локального окружения ионов хрома в соактивированном кристалле. При увеличении содержания ионов марганца в твердом растворе до $x = 0.3$ (рис. 3, b), помимо наблюдавшегося ранее смещения максимума спектра люминесцен-

ции ионов хрома в длинноволновую область с ростом x [17], видны также и значительно более существенные изменения в коротковолновой части спектра люминесценции при соактивации кристалла ионами железа. При этом заметно, что смещение спектров поглощения ионов хрома в длинноволновую область с увеличением содержания ионов марганца (x) увеличивает степень их перекрытия со спектром поглощения ионов железа в кристалле $Zn_{1-x}Mn_xSe:Fe^{2+}$ (рис. 3, b), что должно обеспечивать условия для более эффективного переноса энергии $Cr^{2+} \rightarrow Fe^{2+}$.

Поскольку спектр люминесценции ионов хрома в кристалле ZnSe и твердых растворов на его основе содержит две линии, аппроксимация спектра поглощения люминесценции в кристалле $Zn_{1-x}Mn_xSe:Cr^{2+}$ ($x = 0.3$) осуществлялась двумя гауссовыми контурами, как показано на рис. 4, a. Аналогично случаю спектров поглощения для аппроксимации спектра люминесценции ионов хрома в соактивированном кристалле дополнительно к этим двум линиям (параметры аппроксимации двух контуров, за исключением амплитуды, не менялись) необходимо добавить третью, более высокочастотную

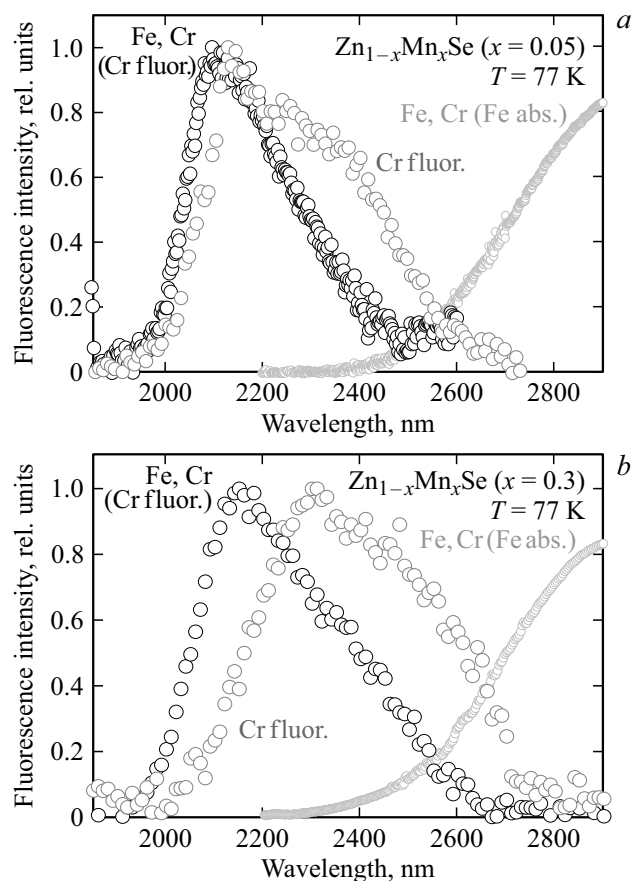


Рис. 3. Низкотемпературные спектры люминесценции ионов хрома в твердых растворах $Zn_{1-x}Mn_xSe$ с различным содержанием марганца $x = 0.05$ (a) и $x = 0.3$ (b), активированных только ионами хрома и соактивированных ионами хрома и железа, а также часть соответствующих спектров поглощения кристаллов $Zn_{1-x}Mn_xSe:Fe^{2+}$

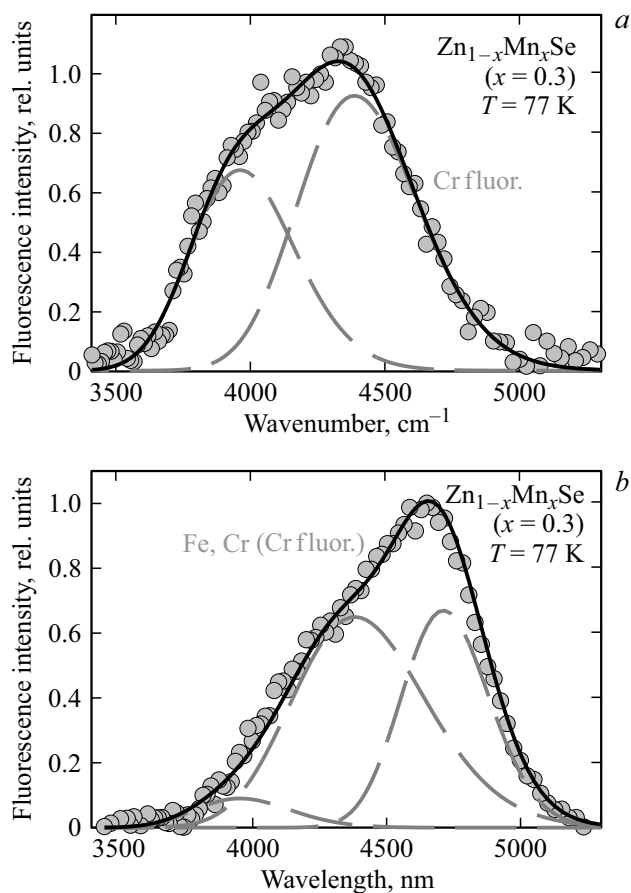


Рис. 4. Разложение на гауссовы контуры низкотемпературных спектров люминесценции ионов хрома в твердом растворе $Zn_{1-x}Mn_xSe$ ($x = 0.3$), активированного только ионами хрома (а) и соактивированного ионами хрома и железа (б).

(рис. 4,б). Как видно из рис. 4,б, амплитуда самой низкочастотной (длинноволновой) компоненты в разложении для соактивированного кристалла существенно меньше по сравнению с не соактивированным. Такое уменьшение амплитуды может быть связано как с лучшим перекрытием спектра люминесценции ионов хрома со спектром поглощения ионов железа на длинноволновом крыле (рис. 3,б), так и меньшей концентрацией ионов хрома в неизменном локальном окружении в случае кристалла $Zn_{1-x}Mn_xSe:Cr^{2+}, Fe^{2+}$ ($x = 0.3$). Поскольку спектр люминесценции ионов хрома как в „стандартном“ (не измененном), так и модифицированном локальном окружении должен содержать две полосы, линия с максимумом на частоте порядка 4380 cm^{-1} (2280 nm) по видимому представляет собой суперпозицию слабо отличающихся по частоте линий люминесценции ионов хрома в различном локальном окружении. Сдвиг между высокочастотными максимумами люминесценции ионов хрома в этом случае можно оценить как $\sim 330\text{ cm}^{-1}$, что близко к величине, полученной выше для спектров поглощения.

Проведенный в [19,20] анализ процесса переноса энергии от ионов хрома к ионам железа в кристаллах $Zn_{1-x}Mn_xSe$ с различным содержанием марганца показал различие в 4 раза в скоростях переноса энергии на начальной упорядоченной и последующей неупорядоченной (фёрстеровской) стадиях, несмотря на значительное различие в расстояниях между донором (ионом хрома) и близлежащими акцепторами (ионами железа) в первом случае и статистически распределенными удаленными акцепторами во втором и зависимость эффективности безызлучательного переноса от расстояния как R^6 . Из приведенных на рис. 4 разложений спектров люминесценции ионов хрома следует, что для соактивированных кристаллов (в случае измененного локального окружения ионов хрома) величина интеграла перекрытия спектров люминесценции ионов хрома (доноров) и поглощения ионов железа (акцепторов) меньше, чем для случая „стандартного“ окружения. Это может приводить к ухудшению условий резонансного безызлучательного переноса энергии от ионов хрома к расположенным в ближайшем окружении ионам железа (такое близкое расположение приводит к изменению локального окружения), и, наоборот, к улучшению условий резонанса в случае, когда ионы хрома находятся в „стандартном“ окружении, а ионы железа достаточно удалены.

Смещение максимума спектра люминесценции ионов железа (как и для ионов хрома) в низкотемпературных (77 K) спектрах в кристалле твердого раствора $Zn_{1-x}Mn_xSe:Fe^{2+}$ при увеличении содержания марганца показано на рис. 5,а и соответствует ранее продемонстрированным результатам [21]. В соактивированном кристалле $Zn_{1-x}Mn_xSe:Cr^{2+}, Fe^{2+}$ ($x = 0.3$) спектр люминесценции ионов железа, полученный при возбуждении в полосу поглощения ионов железа (2940 nm) практически не отличался от спектра в не соактивированном кристалле. Однако при возбуждении в полосу поглощения ионов хрома (1730 nm) люминесценция ионов железа по-прежнему наблюдалась, что свидетельствует о наличии $Cr^{2+} \rightarrow Fe^{2+}$ переноса энергии, но спектр люминесценции был несколько отличным (рис. 5,б). В максимуме спектра люминесценции ионов железа в соактивированном кристалле наблюдался небольшой коротковолновый сдвиг (порядка 100 cm^{-1}) по сравнению с не соактивированным кристаллом. По-видимому, такое коротковолновое смещение, так же как и для ионов хрома, соответствует измененному локальному окружению ионов железа. Поскольку аналогичные изменения спектров наблюдаются как для ионов хрома, так и для ионов железа, то вполне обоснованно можно предположить образование кластерных $Cr^{2+}-Fe^{2+}$ оптических центров в соактивированных кристаллах $Zn_{1-x}Mn_xSe$.

Кинетика затухания люминесценции ионов хрома в не соактивированных кристаллах $Zn_{1-x}Mn_xSe$ с различным содержанием марганца при возбуждении наносекундными импульсами с длиной волны 1730 nm при температуре 77 K имела одноэкспоненциальный вид с временем

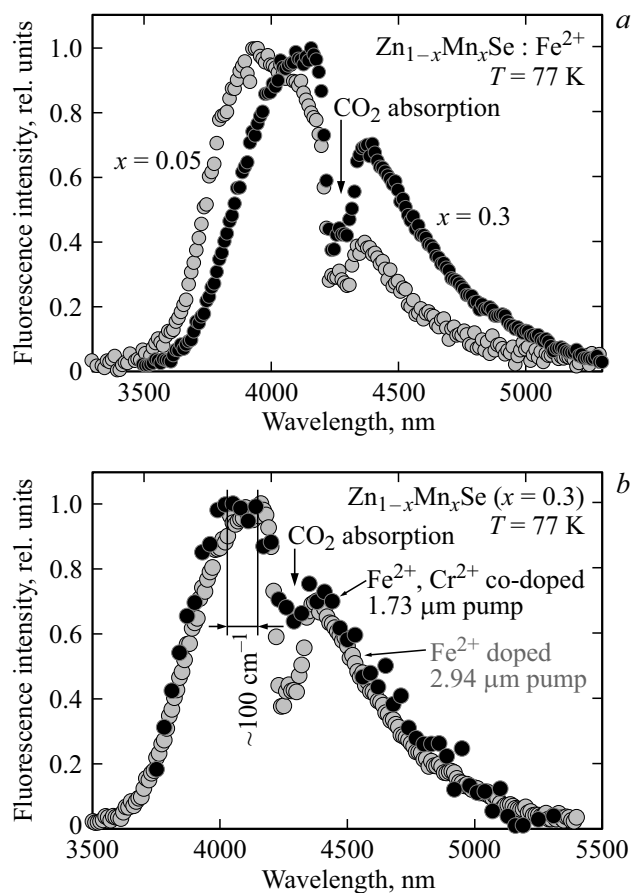


Рис. 5. Низкотемпературные спектры люминесценции ионов железа в твердых растворах $Zn_{1-x}Mn_xSe$ с различным содержанием марганца $x = 0.05$ и $x = 0.3$, активированных только ионами железа (*a*) и спектры люминесценции ионов железа в соактивированном ионами хрома и железа кристалле $Zn_{1-x}Mn_xSe$ ($x = 0.3$) при возбуждении непосредственно ионов железа ($\lambda = 2940$ nm) и возбуждении через ионы хрома ($\lambda = 1730$ nm) (*b*).

жизни $5.3 \mu s$ и $4.2 \mu s$ для $x = 0.05$ и $x = 0.3$ соответственно [20,19]. В соактивированных кристаллах кинетика затухания люминесценции была неэкспоненциальной (рис. 6), что свидетельствует о наличии безызлучательного переноса энергии от ионов хрома к ионам железа. Измеренные кинетики затухания люминесценции в этом случае на дальней стадии затухания имели близкий к экспоненциальному вид с временами $5.3 \mu s$ и $4.2 \mu s$ (рис. 6), что соответствует времени жизни ионов хрома в не соактивированных кристаллах.

Заключение

Таким образом, исследование кристаллов твердого раствора $Zn_{1-x}Mn_xSe$ с различным содержанием марганца ($x = 0.05$ и $x = 0.3$) показало, что при соактивации кристаллов ионами двухвалентного хрома и железа наблюдается изменение в измеренных низкотем-

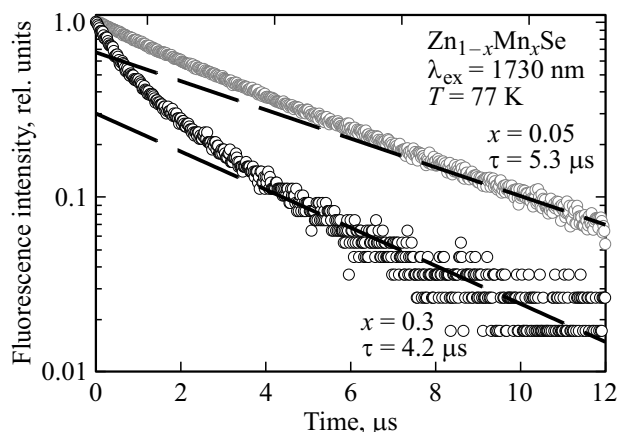


Рис. 6. Низкотемпературная кинетика затухания люминесценции ионов хрома в твердых растворах $Zn_{1-x}Mn_xSe$ с различным содержанием марганца $x = 0.05$ и $x = 0.3$, соактивированных ионами хрома и железа.

пературных (77 K) спектрах поглощения и люминесценции ионов хрома. При этом в отличие от изменений, связанных с содержанием марганца (x) в кристалле, наблюдаются отличия и в коротковолновой части спектров, обусловленные возникновением дополнительных коротковолновых линий в спектрах поглощения и люминесценции. Для кристалла с высоким содержанием марганца ($x = 0.3$) положение самой коротковолновой полосы в обоих спектрах (поглощения и люминесценции) оказывается существенно смещено в синюю область на величину порядка 350 cm^{-1} по сравнению с не соактивированным кристаллом. При возбуждении ионов железа через ионы хрома излучением с длиной волны 1730 nm в таком кристалле низкотемпературный (77 K) спектр люминесценции Fe^{2+} также оказывается смещен в коротковолновую область на величину порядка 100 cm^{-1} по сравнению с прямым возбуждением ионов железа излучением с длиной волны 2940 nm. Такие изменения в спектрах поглощения и люминесценции ионов хрома и железа позволяют предположить формирование кластеризованных оптических центров, содержащих достаточно близко расположенные ионы хрома и железа с измененным локальным окружением. Из-за меньшей величины интеграла перекрытия спектров люминесценции ионов хрома со спектрами поглощения ионов железа в таких кластеризованных центрах ухудшаются условия резонанса при безызлучательном переносе энергии $Cr^{2+} \rightarrow Fe^{2+}$. По всей видимости, это приводит к не столь высокому (в 4 раза) различию в скорости переноса энергии от ионов хрома к ионам железа на первой упорядоченной и последующей неупорядоченной (Фёрстеровской) стадии в обоих кристаллах.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23–22–00236.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S.B. Mirov, I.S. Moskalev, S. Vasilyev, V. Smolski, V.V. Fedorov, D. Martyshkin, J. Peppers, M. Mirov, A. Dergachev, V. Gapontsev, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, **24**(5), 1 (2018). DOI: 10.1109/jstqe.2018.2808284
- [2] K.N. Firsov, M.P. Frolov, E.M. Gavrishchuk, S.Y. Kazantsev, I.G. Kononov, Y.V. Korostelin, A.A. Maneshkin, S.D. Velikanov, I.M. Yutkin, N.A. Zaretsky, E.A. Zotov. Laser Physics Letters, **13**(1), 015002 (2015). DOI: 10.1088/1612-2011/13/1/015002
- [3] P. Fjodorow, M.P. Frolov, Y.V. Korostelin, V.I. Kozlovsky, C. Schulz, S.O. Leonov, Y.K. Skasyrsky. Opt. Express, **29**, 12033 (2021). DOI: 10.1364/OE.422926
- [4] A.V. Pushkin, E.A. Migal, H. Uehara, K. Goya, S. Tokita, M.P. Frolov, Yu.V. Korostelin, V.I. Kozlovsky, Ya.K. Skasyrsky, F.V. Potemkin. Opt. Lett., **43**, 5941 (2018). DOI: 10.1364/OL.43.005941
- [5] V. Fedorov, T. Carlson, S. Mirov. Opt. Mater. Express, **9**, 2340 (2019), DOI: 10.1364/OME.9.002340
- [6] P. Fürtjes, J.W. Tomm, U. Griebner, G. Steinmeyer, S.S. Balabanov, E.M. Gavrishchuk, T. Elsaesser. Opt. Lett., **47**, 2129 (2022). DOI: 10.1364/OL.452638
- [7] X. Wang, Z. Chen, L. Zhang, B. Jiang, M. Xu, J. Hong, Y. Wang, P. Zhang, L. Zhang, Y. Hang. Optical Materials, **54**, 234 (2016). DOI: 10.1016/j.optmat.2016.02.002
- [8] K.N. Firsov, M. Gavrishchuk, V.B. Ikonnikov, S.Yu. Kazantsev, I.G. Kononov, S.V. Kurashkin, S.V. Podlesnykh, S.A. Rodin, D.V. Savin, A.A. Sirotkin. Phys. Wave Phen. **27**, 211 (2019). DOI: 10.3103/S1541308X19030075
- [9] A. Říha, M.E. Doroshenko, H. Jelínková, M. Němec, J. Šulc, D. Vyhřídál, M. Jelínek, A.G. Papashvili, N.O. Kovalenko, A.S. Gerasimenko. Laser Congress 2019 (ASSL, LAC, LS&C), OSA Technical Digest (Optica Publishing Group, 2019), paper JM5A.26. DOI: 10.1364/ASSL.2019.JM5A.26
- [10] M.E. Doroshenko, H. Jelínková, A. Říha, M. Jelínek, M. Němec, N.O. Kovalenko, A.S. Gerasimenko. Opt. Lett., **44**, 2724 (2019). DOI: 10.1364/OL.44.002724
- [11] M. Doroshenko, M. Jelínek, A. Říha, J. Šulc, H. Jelínková, V. Kubeček, N.O. Kovalenko, A.S. Gerasimenko. Opt. Lett., **44**, 5334 (2019). DOI: 10.1364/OL.44.005334
- [12] A. Říha, H. Jelínková, M.E. Doroshenko, M. Jelínek, M. Němec, N.O. Kovalenko, I.S. Terzin. Opt. Mater. Express, **10**, 662 (2020). DOI: 10.1364/OME.384392
- [13] A. Říha, H. Jelínková, M.E. Doroshenko, J. Šulc, M. Jelínek, M. Čech, D. Vyhřídál, N.O. Kovalenko. Proc. SPIE, **11664**, 1166410. DOI: 10.1117/12.2575879
- [14] A. Sennaroglu, U. Demirbas, A. Kurt, M. Somer. Opt. Mater., **29**(6), 703 (2007). DOI: 10.1016/j.optmat.2005.11.019
- [15] N. Myoung, V.V. Fedorov, S.B. Mirov, L.E. Wenger. J. Lumin., **132**(3), 600 (2012). DOI: 10.1016/j.jlumin.2011.10.009
- [16] M.E. Doroshenko, H. Jelínková, M. Jelínek, D. Vyhřídál, J. Šulc, N.O. Kovalenko, I.S. Terzin. Opt. Lett., **44**, 1686 (2019). DOI: 10.1364/OL.44.001686
- [17] A. Říha, M. Němec, H. Jelínková, M. Čech, D. Vyhřídál, M.E. Doroshenko, V.K. Komar, A.S. Gerasimenko, Proc. SPIE, **10603**, 1060312. DOI: 10.1117/12.2292196
- [18] А.Т. Лончаков, С.М. Подгорных, В.И. Соколов, Н.Б. Груздев, Г.С. Шакуров. ФТТ, **48** (9), 1610 (2006).
- [19] M.E. Doroshenko, H. Jelínková, A. Říha, M. Jelínek, M. Němec, N.O. Kovalenko, A.S. Gerasimenko. Opt. Lett., **44**, 2724 (2019), DOI: 10.1364/OL.44.002724
- [20] A. Říha, H. Jelínková, M.E. Doroshenko, M. Jelínek, M. Němec, N.O. Kovalenko, I.S. Terzin. Opt. Mater. Express, **10**, 662 (2020). DOI: 10.1364/OME.384392
- [21] M.E. Doroshenko, H. Jelínková, V.V. Osiko, M. Jelínek, D. Vyhřídál, J. Šulc, M. Němec, N.O. Kovalenko, A.S. Gerasimenko. J. Lumin., **192**, 1300 (2017). DOI: 10.1016/j.jlumin.2017.09.014