

Фотоэлектрические и люминесцентные свойства хлорида серебра, легированного диспрозием

© Г.Ф. Новиков^{+,*}†, Е.В. Рабенко⁺, К.В. Бочаров^{+,*}, Н.В. Личкова[‡],
О.В. Овчинников^{*}, А.Н. Латышев^{*}

⁺ Институт проблем химической физики Российской академии наук,
142432 Черноголовка, Россия

^{*} Воронежский государственный университет,
394006 Воронеж, Россия

[‡] Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук,
142432 Черноголовка, Россия

(Получена 14 июля 2010 г. Принята к печати 26 июля 2010 г.)

Методами СВЧ фотопроводимости и фотолюминесценции исследовано влияние легирования диспрозием на фотоэлектрические и люминесцентные свойства кристаллов AgCl. Легирование изменяло как кинетику гибели фотогенерированных электронов, так и спектры люминесценции и параметры фотостимулированной вспышки люминесценции. Показано, что за новую полосу люминесценции с максимумом при 470 нм, проявляющуюся при массовых концентрациях легирующей добавки $> 10^{-6}\%$, ответственны заряженные, $[\text{Dy}_{\text{Ag}}^{\bullet\bullet} \cdot V'_{\text{Ag}}]^{\bullet}$, или нейтральные, $[\text{Dy}_{\text{Ag}}^{\bullet\bullet} \cdot 2V'_{\text{Ag}}]^x$, ассоциаты. Длинноволновое плечо при 570 нм в спектрах люминесценции отнесено к внутрицентровым переходам в ионах Dy^{3+} . Оценена константа скорости реакции захвата электрона в ловушки, образующиеся при введении легирующей добавки, $k_t = (3-5) \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$. Предполагается, что ловушками являются ионы диспрозия Dy^{3+} .

1. Введение

Ионно-ковалентные кристаллы галогенидов серебра в силу своих уникальных свойств заняли особое место в разработках широкого спектра элементов оптических систем — для создания на их основе ячеек памяти с оптическим способом считывания информации [1], в качестве элементов пассивных лазерных сред [2], легированные ионами редкоземельных элементов галогениды серебра оказались перспективными для создания нового поколения также активных лазерных сред [3,4]. Например, перспективным для создания активных лазерных сред оказался AgCl, легированный DyCl_3 . Трехзарядный ион диспрозия имеет поглощение в области 0.9–1 мкм [5] и свечение в средней инфракрасной (ИК) области [6,7].

Для эффективной работы большинства устройств важным оказывается энергетическое распределение электронных и дырочных ловушек, природа дефектов структуры, положение уровней, создаваемых легированием в запрещенной зоне полупроводника. Эти данные не только характеризуют свойства полупроводника, но и важны для понимания механизма деградации свойств материала в процессе эксплуатации и при хранении [8]. Подходом для получения таких данных может быть изучение кинетики и механизма процессов гибели фотогенерированных носителей тока в данных материалах. При этом могут быть использованы бесконтактные методы СВЧ фотопроводимости и фотолюминесценции, обладающие высокой чувствительностью к донорно-акцепторным примесям. В данной работе проведено

исследование влияния легирования диспрозием в диапазоне массовых концентраций $5 \cdot 10^{-7} - 10^{-1}\%$ на оптические и фотоэлектрические свойства кристаллов AgCl.

2. Экспериментальная часть

Высокоочищенный исходный хлорид серебра получали комплексным методом [9], включающим:

- очистку исходного азотнокислого серебра на неорганических сорбентах,
- зонную плавку азотнокислого серебра,
- получение галогенидов серебра осаждением из раствора AgNO_3 соответствующим галоидводородом,
- термообработку галогенидов серебра в атмосфере галоидагентов,
- зонную плавку галогенидов серебра.

Хлорид диспрозия получали из оксидов. Оксид растворяли в хлористоводородной кислоте, добавляли хлорид аммония и вводили в осажденный хлорид серебра. Полученную смесь высушивали под ИК лампой и затем в вакууме, постепенно повышая температуру для удаления хлорида аммония из смеси. Так готовили исходные смеси для разбавления. Уровень массовой концентрации примеси хлорида диспрозия в таких образцах был 1%. Исходную смесь разбавляли высокоочищенным хлоридом серебра до соответствующей концентрации. Для получения разбавленной смеси гомогенного состава на каждом этапе разбавления через расплав барботировали инертный газ в течение 2–4 ч и закачивали до комнатной температуры в атмосфере инертного газа. Однородность состава полученных кристаллов по длине слитка определяли по данным дифференциально-термического анализа с помощью дериватографа Q-1500 D.

† E-mail: ngf@icp.ac.ru

Времена полуспада и экспоненциальные времена спада в плавленных образцах AgCl, чистом и легированном DyCl₃

№ образца	Состав	Время полуспада $\tau_{1/2}$	Экспоненциальное время спада τ
1	AgCl	1.85 мкс	1 мкс/5 мкс
2	AgCl–5 · 10 ⁻⁷ % DyCl ₃	250 нс	200 нс/550 нс
3	AgCl–10 ⁻⁶ % DyCl ₃	250 нс	150 нс
4	AgCl–10 ⁻⁵ % DyCl ₃	400 нс	800 нс
5	AgCl–10 ⁻⁴ % DyCl ₃	300 нс	450 нс
6	AgCl–10 ⁻³ % DyCl ₃	200 нс	300 нс
7	AgCl–10 ⁻² % DyCl ₃	450 нс	600 нс
8	AgCl–10 ⁻¹ % DyCl ₃	300 нс	400 нс

Примечание. Для образцов 2–8 указаны массовые концентрации DyCl₃. Для образцов AgCl и AgCl–5 · 10⁻⁷% DyCl₃ приведены времена спадов „быстрой“ и „медленной“ компонент.

Методика СВЧ фотопроводимости (диапазон частот 9 ГГц, временное разрешение 50–100 нс) основана на регистрации изменений коэффициента отражения электромагнитных волн от резонатора TE₁₀₁-типа с образцом малого объема, помещенным в пучность электрического поля в центре резонатора, вызываемых воздействием на образец короткого импульса света, и детально описана в [10,11]. Для возбуждения фотопроводимости использовали азотный лазер ЛГИ-505 (длина волны $\lambda = 337$ нм, длительность импульса $\tau_p = 8$ нс). Интенсивность света изменяли в экспериментах светофильтрами. Измерения проводили при комнатной температуре.

Спектры стационарной фотолюминесценции измеряли на автоматической спектральной установке [12] в спектральном диапазоне 400–850 нм при температуре 77 К. Для возбуждения фотолюминесценции использовали лампу ДРК-120 с выделенной длиной волны 365 нм и интенсивностью $\sim 10^{15}$ квант/(см² · с).

Первичное возбуждение фотостимулированной вспышки люминесценции (ФСВЛ) проводили светом той же длины волны, что и для возбуждения фотолюминесценции. Для измерений спектров ФСВЛ использовали воздействие излучением в диапазоне энергий фотонов от 0.6 до 2.0 эВ. ФСВЛ регистрировали либо в сине-зеленой полосе ($\lambda = 490$ нм), либо в диапазоне 450–560 нм при температуре 77 К.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. СВЧ фотопроводимость

3.1.1. Измерения на резонансной частоте. При включении света фотоотклик ΔP сначала резко нарастал, затем после окончания импульса света спадал до нуля. В чистом плавленном хлориде серебра спад фотоотклика с временем t состоял из двух достаточно различных экспоненциальных компонент: „быстрой“ и „медленной“, с временами полуспада $\tau_{1/2} \approx 1$ и 3.5 мкс соответственно (рис. 1, кривая 1).

Легирование хлорида серебра хлоридом диспрозия существенно изменяло форму, амплитуду и время спада

фотоотклика. Для примера на рис. 1 представлен спад фотоотклика для AgCl, легированного диспрозием в массовой концентрации 5 · 10⁻⁷% (кривая 2). Кривые спада фотоотклика в легированных образцах состояли из одной экспоненциальной компоненты. В таблице приведены значения времен $\tau_{1/2}$. Зависимость амплитуды фотоотклика от интенсивности падающего света для всех исследуемых образцов была линейной. При этом характеристическое время не зависело от интенсивности падающего света. Эти данные свидетельствуют о том, что за спад ответственны процессы 1-го порядка кинетики (характеристические времена экспоненциальных спадов также приведены в таблице). В принципе такими процессами могут быть как первичный захват свободного электрона, так и реакция локализованного электрона, испытавшего повторный перезахват и термическое освобождение из ловушки.

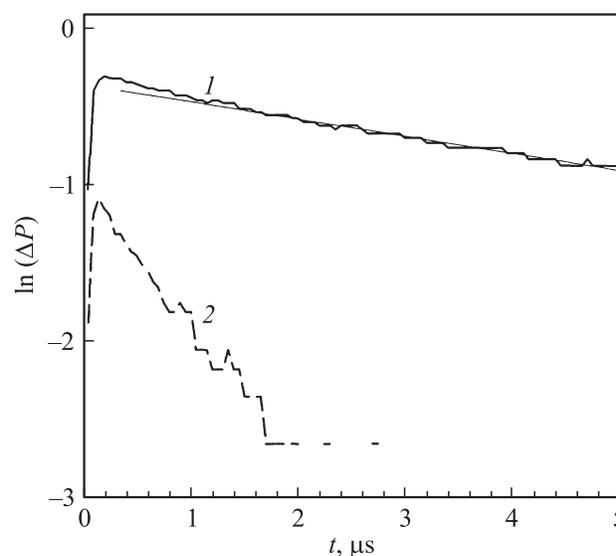


Рис. 1. Спад СВЧ фотопроводимости для плавленных образцов AgCl — чистого (1) и легированного DyCl₃ в массовой концентрации 5 · 10⁻⁷% (2). Доза квантов за импульс $\sim 10^{14}$ квант/см².

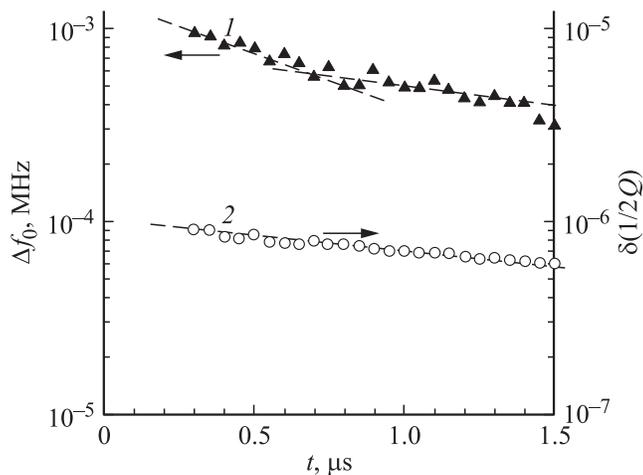


Рис. 2. Спады сдвига резонансной частоты δf_0 (1) и изменения обратной добротности $\delta(1/2Q)$ (2) для поликристаллического AgCl.

3.1.2. Частотная зависимость фотоотклика.

Для того чтобы выяснить, какой электрон вносит вклад в СВЧ фотоотклик — свободный электрон, ни разу не захваченный в ловушку, или повторно вышедший из ловушки — анализировали зависимость фотоотклика от частоты СВЧ излучения f в разные моменты времени t [11,13]. Форма зависимостей $\Delta P(f, t)$ менялась при изменении концентрации DyCl_3 . Форма частотных зависимостей несимметрична, что свидетельствует о вкладе в фотоотклик не только изменения добротности нагруженного резонатора Q (ΔP_Q), но и сдвига резонансной частоты δf_0 (ΔP_{f_0}): $\Delta P = \Delta P_Q + \Delta P_{f_0}$.

Проведен численный расчет с аппроксимацией экспериментальных зависимостей разностью двух функций Лоренца, соответствующих случаю хорошего согласования резонатора с волноводом. Такие расчеты, будучи проведенными для разных моментов времени, позволяют сравнить скорости спадов изменения добротности и сдвига резонансной частоты f_0 . Для примера на рис. 2 показан результат такого расчета для чистого AgCl. Чтобы избежать ошибок, вызванных влиянием сдвига резонансной частоты на величину отраженной мощности на резонансной частоте [14], в качестве характеристики концентрации электронов вместо ΔP_Q показана величина $\delta(1/2Q)$.

Можно видеть из рис. 2, что скорости спадов δf_0 и $\delta(1/2Q)$ до момента времени $\Delta t \approx 750$ нс различаются приблизительно в 2 раза, а на больших временах практически совпадают. Можно предположить две причины такого различия. Первая — это дополнительный вклад в фотоотклик носителей тока другого знака. Такая ситуация обсуждалась в [15] для СВЧ фотопроводимости бромида серебра, но не нашла убедительной поддержки. Вторая, более вероятная версия — отсутствие равновесия по электронам между ловушками и зоной

проводимости до момента времени Δt и установление равновесия при больших временах. Такой вывод следует из соотношения [14]

$$-\frac{\delta f_0}{f_0} \propto \delta \varepsilon' + \frac{(\delta \varepsilon'')^2}{\varepsilon' + 2}, \quad (1)$$

если принять, что при несильном возмущении резонатора внешним воздействием мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости, ε'' , пропорциональна $\delta(1/2Q)$. Так как в области > 750 нс δf_0 и $\delta(1/2Q)$ спадают с одинаковой скоростью (см. рис. 2), то, согласно (1), за δf_0 ответственно изменение действительной части диэлектрической проницаемости $\delta \varepsilon'$. Симбатность изменений сдвига частоты и добротности в этом случае, вероятно, свидетельствует об установившемся равновесии по электронам между зоной проводимости и ловушками ко времени 750 нс [15].

Аналогичный анализ для легированных образцов показал, что первичный захват свободных электронов наблюдается только при малых концентрациях примеси. При массовых концентрациях $> 10^{-5}\%$ DyCl_3 наблюдаются лишь „вторичные“ процессы. Таким образом, быструю компоненту спада следует считать отражением процесса гибели свободного электрона по реакции



Здесь e^- — свободный электрон, tr — электронная ловушка, e_{tr}^- — захваченный электрон.

3.2. Люминесценция

Для получения сведений о природе образующихся при легировании дефектов в работе были проведены исследования фотолюминесценции и фотостимулированной вспышки люминесценции образцов AgCl-DyCl_3 .

3.2.1. Зависимость формы спектров фотолюминесценции кристаллов AgCl от концентрации DyCl_3 .

Легирование хлорида серебра уже начиная с минимальных концентраций хлорида диспрозия изменяло спектр фотолюминесценции. Однако значительные изменения происходили при массовых концентрациях DyCl_3 $10^{-4}\%$ и выше. На рис. 3, *a-c* показаны спектры люминесценции образцов при разных уровнях легирования. В спектре чистого хлорида серебра наблюдалась несимметричная полоса люминесценции с максимумом на длине волны $\lambda_{\text{max}} = 505$ нм (рис. 3, *a*) и коротковолновая полоса с максимумом на длине волны менее 425 нм. На рис. 3, *b, c* приведены спектры люминесценции образцов, легированных диспрозием. Форма спектров зависела от уровня легирования, и это позволило выделить в спектрах повторяющиеся полосы с максимумами при длинах волн $\lambda_{\text{max}} = 571, 530, 496, 470$ нм. На рис. 3, *a-c* показаны разложения спектров на полосы гауссовой формы [16]. Согласно литературным данным, полосе с

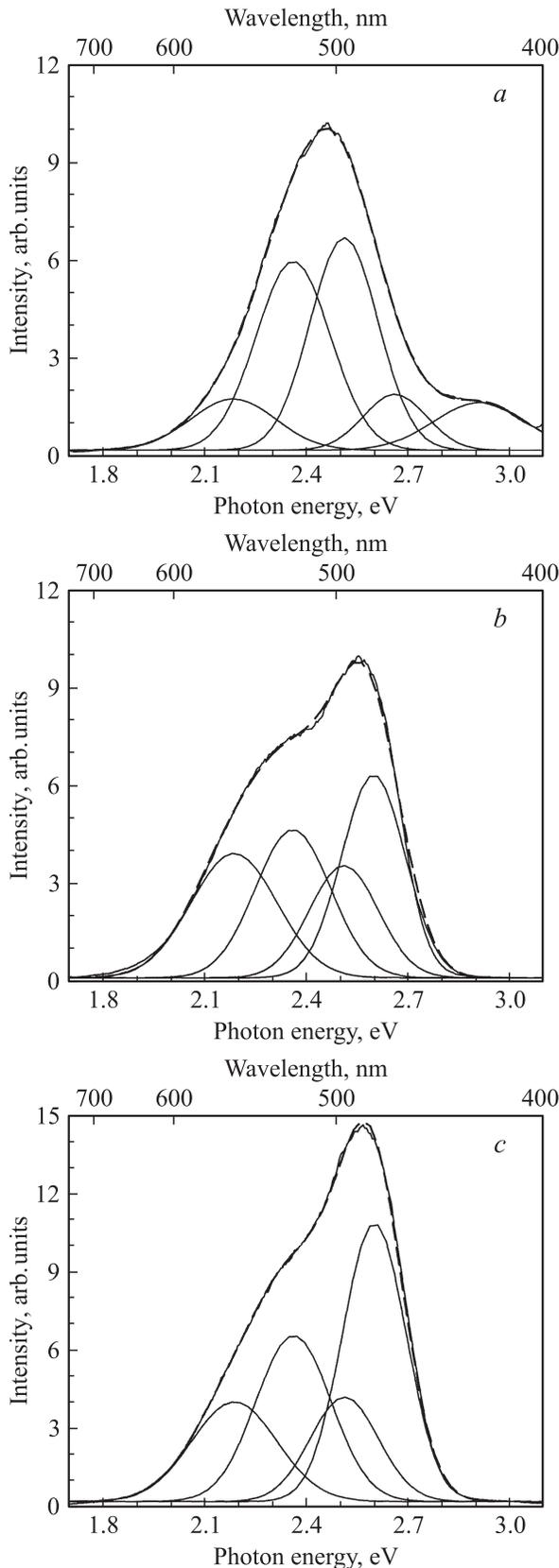


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции и разложение спектров на полосы гауссовой формы чистого AgCl (a) и легированного DyCl₃ в массовых концентрациях 10⁻⁴% (b), 10⁻²% (c). Длина волны возбуждения фотолюминесценции 365 нм, интенсивность ~ 10¹⁵ квант/см² · с.

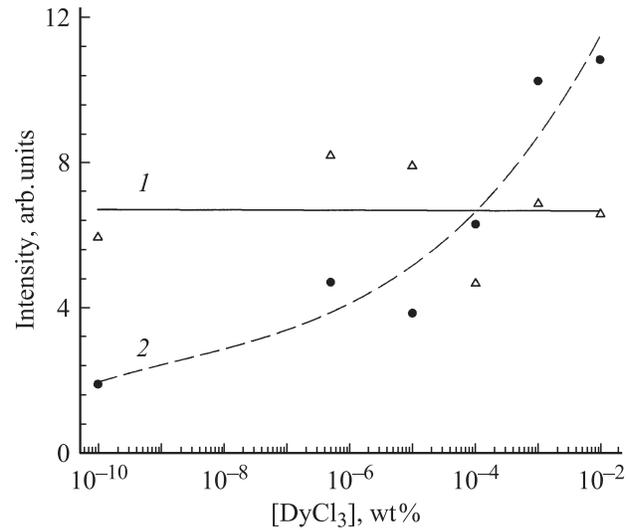


Рис. 4. Зависимость амплитуды пиков люминесценции с $\lambda_{\max} = 530$ (1) и 470 нм (2) от концентрации легирующей добавки.

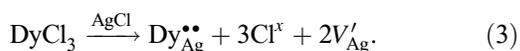
$\lambda_{\max} = 496$ нм можно связать с вакансиями серебра [17], а полосу с $\lambda_{\max} = 530$ нм — с йодными центрами [18,19].

Сразу заметим, что интенсивности полос слабо зависели ($\lambda_{\max} = 470$ нм — см. рис. 4, $\lambda_{\max} = 496$ и 571 нм) или вообще не зависели ($\lambda_{\max} = 530$ нм — см. рис. 4) от концентрации вводимого DyCl₃. Независимость интенсивности „йодной“ полосы от уровня легирования вполне соответствует методу приготовления образцов путем разбавления. Коротковолновую полосу в чистом хлориде серебра, с $\lambda_{\max} < 425$ нм, вероятно, следует отнести к собственной люминесценции. В спектрах легированных образцов эта полоса не проявляется.

Полосу с $\lambda_{\max} = 571$ нм, по-видимому, можно интерпретировать как проявление излучательного внутрицентрового перехода в ионе диспрозия. Для иона Dy³⁺ наблюдали свечение с максимумами в областях 490–502, 550 нм в различных кристаллических матрицах (что соответствует переходам между термами ⁴F_{9/2} и ⁶H_{15/2}) [7,20]. Известно, что влияние кристаллического поля матрицы на переходы 5d–4f оказывается достаточно сильным [7], величина энергетического зазора между уровнями 5d и 4f может изменяться в зависимости от матрицы. Кроме того, может изменяться вероятность излучательного перехода под влиянием поля кристаллической решетки: могут возникать или сниматься запреты на тот или иной переход. Можно предположить, что полоса с $\lambda_{\max} = 571$ нм обусловлена излучательными переходами между уровнями 5d и 4f иона диспрозия, возможно, близкими к ⁴F_{9/2} и ⁶H_{15/2} (являющимися верхним и нижним энергетическими уровнями соответственно), для которых в матрице хлорида серебра имеется сравнительно высокая вероятность излучательной релаксации возбуждения. Сравнительно большая (0.25 эВ) энергетическая ширина на половине интенсивности полосы с $\lambda_{\max} = 571$ нм может быть связана с неодинако-

вым окружением ионов диспрозия, распределенных по объему исследуемого образца. Причиной этого мог послужить тот факт, что использованные образцы являлись плавленными, и кристаллиты, составляющие образец, в таком случае ориентированы друг относительно друга произвольным образом. При таких условиях следует ожидать, что влияние окружения на ионы Dy^{3+} в разных областях матрицы будет различным, т.е. происходит усиление квазистатического уширения спектральных линий по сравнению со случаем строго упорядоченной кристаллической решетки. Предположению о природе свечения с $\lambda_{max} = 571$ нм вполне соответствует наблюдаемое небольшое увеличение интенсивности полосы с ростом уровня легирования.

Полоса с $\lambda_{max} = 470$ нм, по-видимому, связана с образующимися ассоциатами вакансий серебра и ионов диспрозия. Предположительный механизм образования ассоциатов следующий. Замещение иона Ag^+ ионом Dy^{3+} в решетке AgCl приводит к образованию дефекта $Dy_{Ag}^{\bullet\bullet}$. Поскольку кристалл должен быть электронейтральным, для компенсации положительного заряда данного дефекта образуются две вакансии серебра, имеющие отрицательный заряд (V'_{Ag}):



Чем выше концентрация легирующей добавки, тем больше вероятность, что дефекты $Dy_{Ag}^{\bullet\bullet}$ и V'_{Ag} окажутся близко расположенными, благодаря чему образуются их ассоциаты — либо заряженные вида $[Dy_{Ag}^{\bullet\bullet} \cdot V'_{Ag}]^{\bullet}$, либо нейтральные вида $[Dy_{Ag}^{\bullet\bullet} \cdot V'_{Ag}]^x$. В литературе имеются данные экспериментов, подтверждающие образование подобных ассоциатов в хлориде серебра при введении в его объем ионов Cd^{2+} [21]. Сделанному предположению соответствует рост интенсивности полосы с $\lambda_{max} = 470$ нм при увеличении уровня легирования (рис. 4).

3.2.2. Зависимость ФСВЛ от концентрации видимой примеси $DyCl_3$. Спектры стимуляции фото-стимулированной вспышки люминесценции имели максимум при 1.8–1.9 эВ как для амплитуды светосуммы ФСВЛ, так и для полной светосуммы. На вставке к рис. 5 для примера приведены спектры стимуляции ФСВЛ исходного AgCl (кривая 1) и легированного Dy^{3+} в массовых концентрациях 10⁻⁵% (кривая 2) и 10⁻⁴% (кривая 3) для полной высвеченной светосуммы. На основном рис. 5 приведено отношение полной светосуммы при энергии стимуляции 1.8 эВ, $S(1.8)$, к светосумме при 1.3 эВ, $S(1.3)$, в зависимости от концентрации добавки (такой же вид имели зависимости отношения полной светосуммы при энергии стимуляции 1.8 эВ к светосумме при 1.4–1.7 эВ). Видно, что при увеличении концентрации диспрозия происходит постепенное уменьшение количества электронных ловушек с энергией возбуждения 1.3 эВ (то же относится к ловушкам с энергиями 1.4–1.7 эВ).

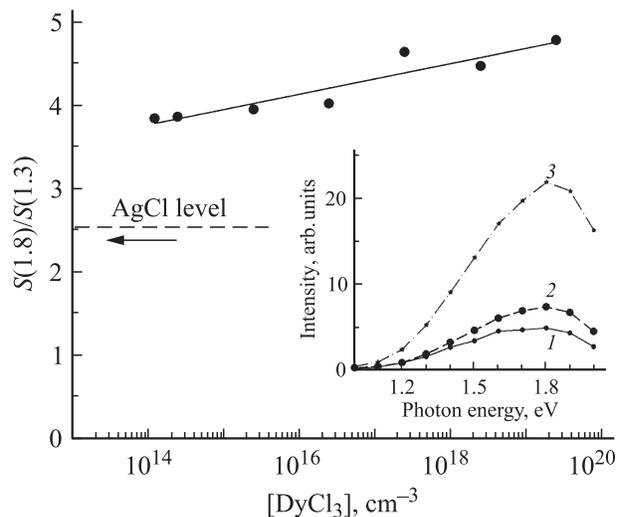


Рис. 5. Зависимость отношения светосумм ФСВЛ $S(1.8)/S(1.3)$ от концентрации легирующей добавки. На вставке — спектры полной светосуммы ФСВЛ для чистого AgCl (1) и легированного $DyCl_3$ в массовых концентрациях 10⁻⁵% (2) и 10⁻⁴% (3).

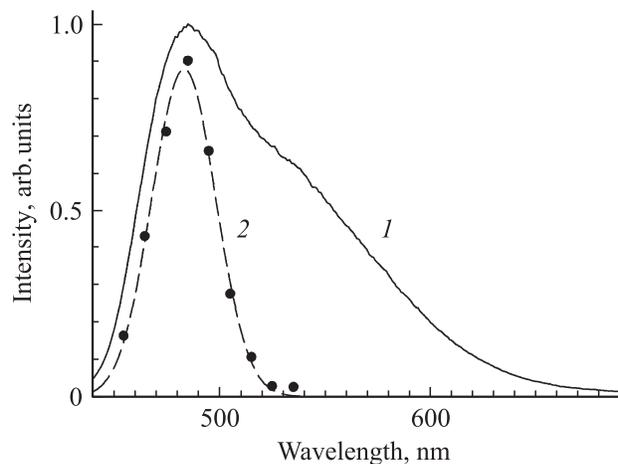


Рис. 6. Нормированные спектр фотолуминесценции (1) и спектр ФСВЛ, снятый на фиксированных длинах волн в диапазоне от 450 до 560 нм при энергии возбуждения 1.8 эВ, для образца AgCl — 10⁻²% $DyCl_3$.

Выдерживание образцов в темноте уменьшало светосумму ФСВЛ S . Скорость спада S в темноте в легированных образцах была более чем в 10 раз меньше, чем в нелегированном. Учитывая, что спектр синезеленой полосы люминесценции считается обусловленным механизмом Шёна–Класенса, можно предположить, что вид этих зависимостей свидетельствует либо об уменьшении количества мелких дырочных ловушек, либо об изменении их глубины при легировании AgCl хлоридом диспрозия. За темновые изменения ФСВЛ, по-видимому, ответственны дырки, локализованные в ловушках с глубиной < 0.15 эВ. В работе [22] показано, что процесс темновой убыли светосумм ФСВЛ на глубоких ловуш-

как обусловлен безызлучательной рекомбинацией локализованных электронов с дырками, освобождаемыми с уровней глубиной $\sim kT$ в время темновой паузы.

На рис. 6 приведен спектр ФСВЛ образца $\text{AgCl}-10^{-2}\% \text{DyCl}_3$ в диапазоне от 450 до 560 нм при энергии возбуждения в максимуме (1.8 эВ) (кривая 2). В отличие от спектра ФСВЛ, спектр люминесценции данного образца (рис. 6, кривая 1) имеет как пик при $\lambda_{\text{max}} = 485-490$ нм, так и плечо в области $\lambda = 520-530$ нм. Таким образом, в полосе с максимумом при 485 нм (неразложенный спектр) наблюдается вспышка люминесценции, т.е. свечение в этой области носит рекомбинационный характер. В области же, где кривая 1 имеет плечо, вспышка отсутствует. Этот факт указывает на то, что здесь люминесценция является внутрицентровой.

3.2.3. Преобразование дефектов при легировании. Таким образом, результаты исследования люминесценции и ФСВЛ указывают на имеющий место процесс преобразования дефектов в хлориде серебра при легировании диспрозием. Естественно ожидать, что преобразование дефектов должно приводить к изменению распределения электронных и дырочных ловушек по энергиям и сечениям захвата. В то же время проявление отдельных компонент в спадах СВЧ фотопроводимости явно свидетельствует о том, что распределение дефектов имеет дискретный характер. Для одного из типов дефектов преобразование „старых“ электронных ловушек, содержащихся в исходном хлориде серебра, в „новые“ можно записать как



(здесь tr_1 — новая ловушка). Уменьшение времени жизни свободного электрона (рис. 1 и 2) при легировании свидетельствует об увеличении скорости захвата электрона в результате преобразования ловушек. По влиянию легирования на время жизни свободного электрона можно определить константу скорости захвата электрона на центры, образующиеся при легировании в хлориде серебра:

$$k_t = \frac{\Delta(1/\tau)}{\Delta(A)} \approx (3-5) \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1} \quad (5)$$

(использованы данные для чистого AgCl и AgCl , легированного DyCl_3 в массовой концентрации $5 \cdot 10^{-7}\%$).

Для того чтобы выяснить природу центров захвата электронов, образующихся при легировании, заметим следующее. Трудно себе представить высокую вероятность формирования ассоциатов при низких уровнях легирования. В то же время уже при концентрациях $< 10^{-6}\%$ наблюдается влияние легирования на время жизни свободного электрона. Поэтому естественно предположить, что при низких уровнях легирования захват осуществляется на ионы диспрозия в узлах решетки,

не связанные в ассоциаты. Этому предположению соответствует величина полученной константы скорости, которая оказалась близкой к константе скорости реакции захвата электрона на трехзарядном ионе Ir^{3+} в монокристаллическом AgBr , оцененной в [23].

Авторы выражают благодарность М.В. Гапановичу за помощь в обсуждении результатов.

Список литературы

- [1] Ю.В. Вострикова, В.Г. Клюев. ФТП, **42** (3), 277 (2008).
- [2] Н.В. Личкова, В.Н. Загороднев, Л.Н. Бутвина, О.В. Серeda, А.Л. Бутвина, Е.М. Дианов. Квант. электрон., **39** (3), 283 (2009).
- [3] L. Nagli, O. Gayer, A. Katzir. Opt. Lett., **30**, 1831 (2005).
- [4] I. Shafir, L. Nagli, A. Katzir. Appl. Phys. Lett., **94** (23), 1907 (2009).
- [5] Y. Seki, Y. Furukawa. Jpn. J. Appl. Phys., **10**, 529 (1971).
- [6] А.А. Каминский, К. Курбанов, Т.В. Уварова. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **23**, 1049 (1987).
- [7] А.А. Каминский, Л.К. Аминов, В.Л. Ермолаев и др. *Физика и спектроскопия лазерных кристаллов* (М., Наука, 1986).
- [8] В.П. Грибковский. *Полупроводниковые лазеры* Учеб. пособие по спец. „Радиофизика и электроника“ (Минск, Университетское, 1988).
- [9] Н.В. Личкова, В.Н. Загороднев. Высокочистые вещества, № 3, 19 (1991).
- [10] Ю.В. Метелева, Г.Ф. Новиков. ФТП, **40** (10), 1167 (2006).
- [11] Г.Ф. Новиков, А.А. Маринин, Е.В. Рабенюк. ПТЭ, № 2, 83 (2010).
- [12] А.Н. Латышев, О.В. Овчинников, М.С. Смирнов. ЖНиПФ, **48** (5), 47 (2003).
- [13] Е.В. Рабенюк, М.В. Гапанович, Г.Ф. Новиков, И.Н. Один. ФТП, **43** (7), 878 (2009).
- [14] R.J. Deri, J.P. Spoonhower. Phys. Rev. B, **25** (4), 2821 (1982).
- [15] С.Ю. Грабчак, Г.Ф. Новиков, Л.С. Моисеева, М.Р. Любювский, М.В. Алфимов. ЖНиПФик, **35** (2), 134 (1990).
- [16] А.Н. Матвеев. *Оптика* (М., Высш. шк., 1985).
- [17] П.В. Мейкляр. *Физические процессы при образовании скрытого изображения* (М., Наука, 1972).
- [18] К.В. Чибисов. *Природа фотографической чувствительности* (М., Наука, 1980).
- [19] В.М. Белоус, К.В. Чибисов. ДАН СССР, **187** (3), 593 (1969).
- [20] П.П. Феофилов. Изв. АН СССР. Сер. физ., **26**, 435 (1962).
- [21] Б.И. Шапиро. *Теоретические начала фотографического процесса* (М., Эдиториал УРСС, 2000).
- [22] А.Н. Латышев, О.В. Овчинников, М.С. Смирнов. ЖПС, **71** (2), 223 (2004).
- [23] R.J. Deri, J.P. Spoonhower. Appl. Phys. Lett., **43** (1), 65 (1983).

Редактор Л.В. Шаронова

Photoelectric and luminescent properties of silver chloride doped with dysprosium

G.F. Novikov^{+*}, E.V. Rabenok⁺, K.V. Bocharov^{+*},
N.V. Lichkova[≠], O.V. Ovchinnikov^{*}, A.N. Latyshev^{*}

⁺ Institute of Problems of Chemical Physics,
Russian Academy of Sciences,
142432 Chernogolovka, Russia

^{*} Voronezh State University,
394006 Voronezh, Russia

⁺ Institute of Microelectronics Technology
and High Purity Materials,
Russian Academy of Sciences,
142432 Chernogolovka, Russia

Abstract Influence of doping with dysprosium on the photoelectric and luminescence properties of AgCl crystals has been investigated by microwave photoconductivity and photoluminescence methods. Doping changed both the loss kinetics of photogenerated electrons and the luminescence spectrum and the parameters of photostimulated burst of luminescence. It has been shown that charged $[\text{Dy}_{\text{Ag}}^{\bullet\bullet} \cdot \text{V}'_{\text{Ag}}]^{\bullet}$ or neutral $[\text{Dy}_{\text{Ag}}^{\bullet\bullet} \cdot \text{V}'_{\text{Ag}}]^x$ associates are responsible for a new luminescence band with maximum at 470 nm, which becomes observed when doping concentration is $> 10^{-6}$ wt%. The longwave shoulder at 570 nm in the luminescence spectrum has been attributed to intracenter transitions in Dy^{3+} ions. The rate constant of electron capture on the traps, which are produced when the impurities are injected, has been estimated: $k_t = (3-5) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. It has been suggested that the traps are the dysprosium ions Dy^{3+} .