

УДК 539.232:546.221;661.143

## ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК СУЛЬФИДА КАДМИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ МЕТАЛЛАМИ ПЕРВОЙ ГРУППЫ

Т. Л. Майорова, В. Г. Клюев, В. Н. Семенов, Т. Г. Болгова, А. В. Наумов

*Воронежский государственный университет*

Синтезированы пленки, полученные из комплексов  $[\text{Cd}(\text{thio})_2\text{Cl}_2]$  и  $[\text{Cd}(\text{thio})_2\text{Br}_2]$  как не легированные, так и легированные щелочными металлами посредством добавления в распыляемый раствор солей (Li, Na, K)Cl или (Li, Na, K)Br в качестве легирующих добавок. Получены спектры фотолюминесценции и зависимости интенсивности люминесценции от температуры напыления и концентрации легирующей примеси. Установлено, что исследуемые пленки на основе сульфида кадмия, полученные методом распыления растворов тиомочевинных координационных соединений на нагретую подложку, являются кристаллофосфорами с достаточно высоким квантовым выходом люминесценции. Легирование пленок CdS щелочными металлами (Li, Na, K) совместно с Cl или Br приводит к увеличению интенсивности люминесценции в диапазоне 650–850 нм до одного порядка по сравнению с чистыми пленками CdS. Определены оптимальные условия синтеза пиролитических пленок на основе CdS, обладающих максимальной интенсивностью люминесценции.

### ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые соединения на основе сульфидов металлов занимают важное место в разных областях современной техники. Это связано с большим разнообразием электрических, фотоэлектрических и оптических свойств соединений этого класса. Сульфид кадмия обладает фотолюминесценцией в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Являясь фоточувствительным материалом, CdS представляет интерес с точки зрения применения его фотолюминесцентных и фотоэлектрических свойств в оптоэлектронике.

В данной работе представлены результаты исследования фотолюминесценции пленок сульфида кадмия, полученных методом распыления растворов тиомочевинных координационных соединений (ТКС) на нагретую подложку. Перспективность практического применения данного метода заключается в простоте получения пленок сульфидов металлов смешанного состава при атмосферном давлении, в возможности введения в

пленки активных примесей непосредственно в процессе получения и создания сложных гетероструктур.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

Исследовались пленки, полученные из комплексов  $[\text{Cd}(\text{thio})_2\text{Cl}_2]$  — пленки I типа и  $[\text{Cd}(\text{thio})_2\text{Br}_2]$  — II типа как не легированные, так и легированные щелочными металлами посредством добавления в распыляемый раствор солей (Li, Na, K)Cl или (Li, Na, K)Br в качестве легирующих добавок. Температура подложки варьировалась от 350 °C до 500 °C. Концентрация примеси менялась в диапазоне  $10^{-5}$ — $10^{-3}$  ат. %. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) пленок измерялись при температуре жидкого азота ( $T = 77$  К) и при комнатной температуре ( $T \sim 300$  К). Исследования ФЛ проводились на установке, которая позволяет регистрировать спектры люминесценции в диапазоне 400—850 нм. Образцы возбуждали стандартным осветителем ОИ-18 с ртутной лампой ДРК-120 ( $\lambda = 365$  нм). Квантовая интенсивность при этом составляет  $10^{15} \div 10^{16}$  квант/с·см<sup>2</sup>. Исследованы зависимости интенсивности ФЛ от температуры напыления и концентрации легирующего металла.

© Майорова Т. Л., Клюев В. Г., Семенов В. Н., Болгова Т. Г., Наумов А. В., 2005.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спектры ФЛ нелегированных и легированных образцов I и II типа при комнатной температуре представляют собой широкие полосы, расположенные в области спектра от 650 нм и далее в ближнюю ИК область. В области от 650 до 850 нм в этих спектрах выделяются три элементарные составляющие. Оказалось, что положение максимумов элементарных составляющих и их относительные интенсивности меняются в зависимости от условий синтеза пленок.

Спектры ФЛ образцов I типа, как при комнатной температуре, так и при температуре жидкого азота содержат три элементарные полосы ФЛ с максимумами интенсивности при 730 нм, 785 нм и 840 нм, положение которых не зависит от температуры напыления (рис. 1).

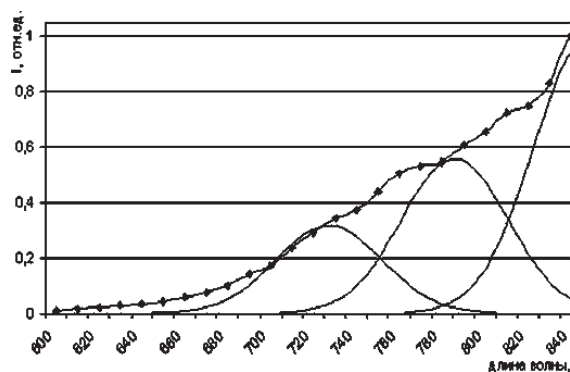


Рис. 1. Спектр фотолюминесценции пленок I типа

Данные полосы ФЛ можно связать с наличием дефектов, по крайней мере, трех типов:  $[V_{Cd}^{2-}V_S^{2+}]^0$ ,  $[V_{Cd}^{2-}Cl_S^+]^-$  и  $[V_{Cd}^{2-}O_S^{2+}]^0$ . Соответственно введем следующие обозначения полос: В — вакансионная, Г — галогенная, К — кислородная.

Для чистых монокристаллов CdS, основываясь на проведенных параллельных исследованиях кинетики люминесценции и фотопроводимости, в работе [1] было установлено, что центр рекомбинации, отвечающий за красную полосу (730 нм), представляет собой комплекс  $[V_{Cd}^{2-}V_S^{2+}]^0$ . В работе [2] на основе данных рентгеноструктурного анализа показано, что в пленках CdS такие дефекты всегда присутствуют, так как в результате синтеза получается поликристаллическая структура.

Согласно Гурвичу [3], красная полоса люминесценции фосфоров CdS—Cl (760—780 нм) обусловлена центрами типа  $[V_{Cd}^{2-}Cl_S^+]^-$ . Пленки I типа были получены из водных растворов  $CdCl_2$  и  $(NH_2)_2CS$  и тем самым в некоторой степени активировались хлором. Поэтому полосу люминесценции с  $\lambda_{max} = 785$  нм можно отождествить с указанным дефектом.

В работе [4] посредством дополнительной очистки от хлор- и кислородсодержащих примесей образцов CdS, а затем введения в исходный CdS хлора в присутствии кислорода было показано, что в первом случае образцы CdS не люминесцируют при комнатной температуре и обладают лишь краевым излучением при 77 К, а во втором случае возникают полосы люминесценции с максимумами при 760 и 850 нм. Как показано выше природа первой полосы (760 нм) установлена достаточно твердо. В качестве одного из вариантов модели центров люминесценции другой полосы (850 нм) авторы работы [4] предложили связать с дефектами типа  $[V_{Cd}^{2-}(Cl_S)_2^{2+}]^0$ . Однако позднее в работе [5] было показано, что центры ответственные за данную полосу фотолюминесценции имеют кислородную природу и эти центры представляют собой комплекс типа  $[V_{Cd}^{2-}O_S^{2+}]^0$  и образуются путем замещения кислородом вакансий серы. В случае пленок полученных из комплексов  $[Cd(thio)_2Cl_2]$  и  $[Cd(thio)_2Br_2]$  замещение галогена происходит при участии кислорода воздуха и сопровождается освобождением галогена в виде продуктов термолитиза, что приводит к появлению полосы люминесценции 830—850 нм. Данная полоса люминесценции является наиболее интенсивной и для пиролитических пленок CdS фиксируется всегда как самая яркая независимо от исходных ТКС и температуры осаждения.

В спектрах ФЛ пленок сульфида кадмия II типа (бром вместо хлора) положение максимумов элементарных составляющих находятся в тех же областях спектра, что и для пленок I типа. Однако положение максимумов интенсивности элементарных составляющих исследуемой полосы зависит от температуры напыления (рис. 2). С увеличением температуры напыления пленок полосы ФЛ смещаются в длинноволновую область. Кроме того, для образцов с разной температу-

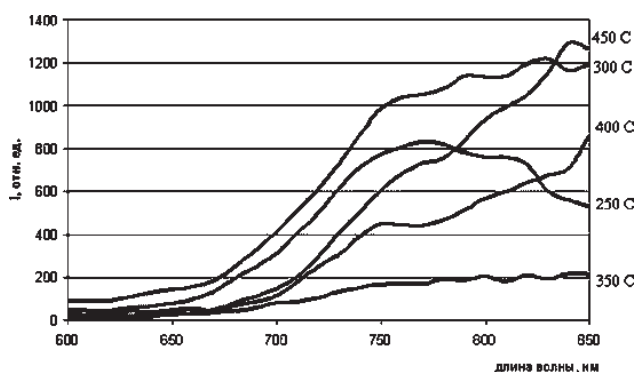


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции пленок II типа с разной температурой напыления

рой напыления распределение полос по интенсивности различно. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики максимумов интенсивности элементарных полос люминесценции пленок сульфида кадмия, полученных из комплекса  $[Cd(N_2H_4CS)_4Br_2]$ , в зависимости от температуры напыления

$t_{\text{нап}}, ^\circ\text{C}$		В	Г	К
250	$\lambda_{\text{max}}, \text{нм}$	712	765	824
	$I_{\text{max}}, \text{отн. ед.}$	0,5	0,92	0,77
300	$\lambda_{\text{max}}, \text{нм}$	719	776	838
	$I_{\text{max}}, \text{отн. ед.}$	0,51	0,83	0,96
350	$\lambda_{\text{max}}, \text{нм}$	723	780	841
	$I_{\text{max}}, \text{отн. ед.}$	0,53	0,82	0,98
400	$\lambda_{\text{max}}, \text{нм}$	741	806	850
	$I_{\text{max}}, \text{отн. ед.}$	0,43	0,6	0,8
450	$\lambda_{\text{max}}, \text{нм}$	741	797	850
	$I_{\text{max}}, \text{отн. ед.}$	0,42	0,64	0,9

$\lambda_{\text{max}}$  — положение максимума элементарной полосы.

$I_{\text{max}}$  — интенсивность элементарной полосы относительно интенсивности максимума интегральной полосы данного спектра,

Полоса В — «вакансионная», вероятно также связана с комплексом  $[V_{\text{cd}}^{2-} V_{\text{S}}^{2+}]^0$ . Дефекты этого типа, по-видимому, всегда присутствуют в сульфидах элементов II (b) подгруппы.

Можно считать, что полоса люминесценции Г — «галогенная» пленок сульфида кадмия, полученных с использованием координационного соединения  $[Cd(N_2H_4CS)_4Br_2]$  (II), по аналогии с полосой при 785 нм пленок I типа

обусловлена дефектами типа  $[V_{\text{Cd}}^{2-} Br_{\text{S}}^{+}]$ . Известно [2], что с увеличением температуры напыления уменьшается содержание галогена в осаждаемых слоях, в данном случае Br, что связано с удалением галогена в виде летучих продуктов термолитиза  $[Cd(N_2H_4CS)_4Hal_2]$ , а это в свою очередь вызывает уменьшение интенсивности люминесценции рассматриваемой полосы.

Полоса К — «кислородная» с максимумом в области 825—845 нм для пиролитических пленок на основе CdS как было показано выше обусловлена наличием комплексов  $[V_{\text{Cd}}^{2-} O_{\text{S}}^{2+}]^0$ . С увеличением температуры осаждения происходит увеличение количества вакансий серы, которые заполняются кислородом с образованием дефектов  $[V_{\text{Cd}}^{2-} O_{\text{S}}^{2+}]^0$ . Это, возможно, объясняет наблюдаемое уменьшение относительной интенсивности ( $I_{\text{max}}$ ) «вакансионной» полосы и увеличение относительной интенсивности ( $I_{\text{max}}$ ) «кислородной» полосы с увеличением температуры напыления (таблица 1).

Таким образом, природу трех элементарных составляющих наблюдаемой широкой полосы люминесценции можно объяснить наличием в пленках на основе CdS дефектов трех типов, указанных выше. Люминесцентные свойства пленок, получаемых пиролитическим методом с использованием тиомочевинных координационных комплексов, определяются условиями синтеза, а также химической природой исходных веществ.

Следует отметить, что полоса люминесценции с  $\lambda_{\text{max}} = 510$  нм, которая обычно наблюдается в моно- и микрокристаллах CdS при 77 К, в спектре ФЛ пленок CdS отсутствует. Данную низкотемпературную, так называемую «краевую», зеленую полосу люминесценции CdS связывают с собственными дефектами, а именно междоузельными атомами серы  $S_i$  [1, 3, 5, 7]. Однако, в дефицитных по анионообразователю n-проводящих кристаллах CdS дефекты  $S_i^{2-}$  вообще не выражены, а преобладающими, по-видимому, являются мелкие доноры  $V_{\text{S}}^{2+}$  [8].

Легирование исследуемых пленок CdS щелочными металлами (Li, Na, K) совместно с Cl приводит к увеличению интенсивности люминесценции в диапазоне 650—850 нм по сравнению с чистыми пленками CdS почти на порядок (рис. 3).

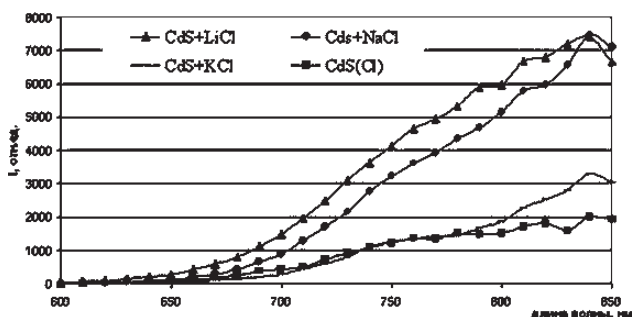


Рис. 3. Спектры ФЛ пленок CdS, легированных щелочными металлами Li, Na, K совместно с хлором ( $c = 10^{-5}$  ат. %,  $t_{\text{нап.}} = 450$  °C), измеренные при 300 К

Такой эффект можно объяснить, с одной стороны, блокировкой каналов конкурирующей рекомбинации, которыми могут быть, например, центры типа  $V_{\text{Cd}}$ , за счет того, что при синтезе пленок ионы металлов могут занимать вакантные места в решетке, в том числе и на поверхности, снижая тем самым количество центров конкурирующей рекомбинации, что и приводит к увеличению интенсивности люминесценции кристаллофосфора CdS.

Сравним свойства пленок CdS легированных щелочными металлами Li, Na, K совместно с хлором.

Для данных образцов спектры ФЛ при  $T = 300$  К содержат три элементарные составляющие с максимумами интенсивности при 730—760 нм, 780—810 нм и 840—850 нм (таблица 2—4). Для всех образцов относительная интенсивность составляющих полосы ФЛ увеличивается с ростом температуры напыления. Наблюдается, что все полосы смещаются в длинноволновую сторону для пленок,

легированных более крупными атомами ( $\lambda_{\text{CdS}} < \lambda_{\text{CdS+LiCl}} < \lambda_{\text{CdS+NaCl}} < \lambda_{\text{CdS+KCl}}$ ). Кроме того, интенсивность ФЛ пленок, легированных щелочными металлами, становится больше в несколько раз по сравнению с интенсивностью нелегированных пленок CdS. При этом, чем легче атом, легирующего щелочного металла, тем больше интенсивность ФЛ исследуемых легированных пленок CdS ( $I_{\text{CdS+LiCl}} > I_{\text{CdS+NaCl}} > I_{\text{CdS+KCl}} > I_{\text{CdS}}$ ). Причем отношение интенсивностей составляющих полосы ФЛ легированных пленок  $I_{\text{CdS+LiCl}} : I_{\text{CdS}}, I_{\text{CdS+NaCl}} : I_{\text{CdS}}, I_{\text{CdS+KCl}} : I_{\text{CdS}}$  меньше для длинноволновых пиков, т.е. влияние примеси на более длинноволновые максимумы меньше, чем на более коротковолновые. Так как три элементарные полосы ФЛ обусловлены наличием дефектов  $[V_{\text{Cd}}^{2-}V_{\text{S}}^{2+}]^0$ ,  $[V_{\text{Cd}}^{2-}Cl_{\text{S}}^+]^-$  и  $[V_{\text{Cd}}^{2-}O_{\text{S}}^{2+}]^0$ , то, по-видимому, влияние легирующих металлов на положение и интенсивность полос косвенное через взаимодействие с центрами безызлучательной рекомбинации.

Таблица 3

Характеристики элементарных составляющих полосы ФЛ пленок CdS, легированных Na совместно с Cl при  $t_{\text{нап.}} = 450$  °C, измеренной при комнатной температуре

Образцы	Положение максимума полосы, нм / интенсивность, отн.ед.		
	C=1·10 <sup>-5</sup> ат. %	737/0,3	790/0,55
C=5·10 <sup>-5</sup> ат. %	733/0,5	786/0,72	839/0,93
C=1·10 <sup>-4</sup> ат. %	745/0,41	797/0,54	850/0,92
C=5·10 <sup>-4</sup> ат. %	749/0,46	804/0,56	850/0,92
C=1·10 <sup>-3</sup> ат. %	745/0,4	801/0,47	850/0,9

Таблица 2

Характеристики элементарных составляющих полосы ФЛ пленок CdS, легированных Li совместно с Cl при  $t_{\text{нап.}} = 450$  °C, измеренной при комнатной температуре

Образцы	Положение максимума полосы, нм / интенсивность, отн.ед.		
	C=1·10 <sup>-5</sup> ат. %	727/0,33	783/0,65
C=5·10 <sup>-5</sup> ат. %	740/0,3	794/0,51	847/0,87
C=1·10 <sup>-4</sup> ат. %	739/0,44	791/0,69	843/0,97
C=5·10 <sup>-4</sup> ат. %	749/0,4	780/0,59	848/0,94
C=1·10 <sup>-3</sup> ат. %	740/0,29	797/0,57	850/0,91

Таблица 4

Характеристики элементарных составляющих полосы ФЛ пленок CdS, легированных K совместно с Cl при  $t_{\text{нап.}} = 450$  °C, измеренной при комнатной температуре

Образцы	Положение максимума полосы, нм / интенсивность, отн.ед.			
	C=1·10 <sup>-5</sup> ат. %	696/0,23	748/0,54	797/0,81
C=5·10 <sup>-5</sup> ат. %	686/0,13	735/0,47	785/0,78	836/0,84
C=1·10 <sup>-4</sup> ат. %	686/0,21	742/0,56	794/0,79	844/0,74
C=5·10 <sup>-4</sup> ат. %	717/0,19	761/0,47	807/0,8	846/0,81
C=1·10 <sup>-3</sup> ат. %	707/0,12	753/0,37	798/0,65	845/0,85

Так же были исследованы зависимости интенсивности люминесценции пленок CdS легированных щелочными металлами Li, Na, K совместно с хлором от концентрации примеси (с, ат. %) и температуры напыления ( $t$ , °C). Кривые зависимостей интенсивности люминесценции  $I$  ( $t$ , °C, с, ат. %) отличаются для образцов, содержащих различные щелочные металлы (рис. 4—6). Однако тенденции поведения этих кривых одинаковые. Интенсивность люминесценции исследуемых пленок увеличивается с ростом температуры напыления в интервале 350—450 °C. Следует отметить, что слои сульфида кадмия, полученные при сравнительно низких температурах, довольно неоднородны. Это связано с включением ряда продуктов разложения комплексов в структуру CdS [6]. Кроме того, с увеличением температуры напыления происходит преобразование дефектов с увеличением количества центров свечения, которое описано выше.

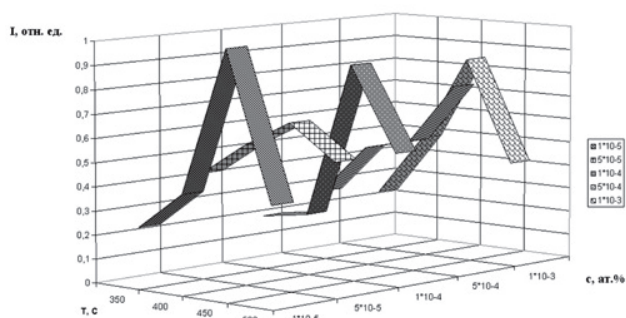


Рис. 4. Зависимость интенсивности люминесценции пленок CdS, легированных Li совместно с Cl, от температуры напыления и концентрации примеси

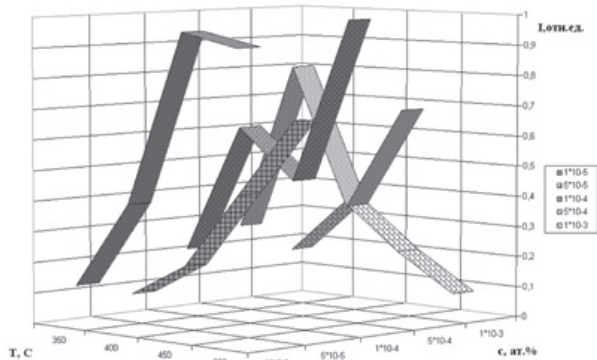


Рис. 5. Зависимость интенсивности люминесценции пленок CdS, легированных Na совместно с Cl, от температуры напыления и концентрации примеси.

Зависимости интенсивности люминесценции от концентрации примеси различаются не только для разных примесей, но и для разных температур напыления пленок легированных одним и тем же щелочным металлом.

Легирование пленок CdS натрием совместно с Br так же приводит к увеличению интенсивности люминесценции в диапазоне 650—850 нм по сравнению с чистыми пленками CdS аналогично хлористым пленкам. Однако при легировании пленок CdS калием совместно с бромом наблюдается уменьшение интенсивности люминесценции в диапазоне 650—850 нм по сравнению с чистыми пленками CdS ( $I_{\text{CdS+NaBr}} > I_{\text{CdS}} > I_{\text{CdS+KBr}}$ ) (рис. 7).

Для образцов II типа спектры ФЛ при комнатной температуре содержат три элементарные составляющие с максимумами интенсивности при 730—755 нм, 785—810 нм и 840—850 нм (таблица 5, 6). Так же как и

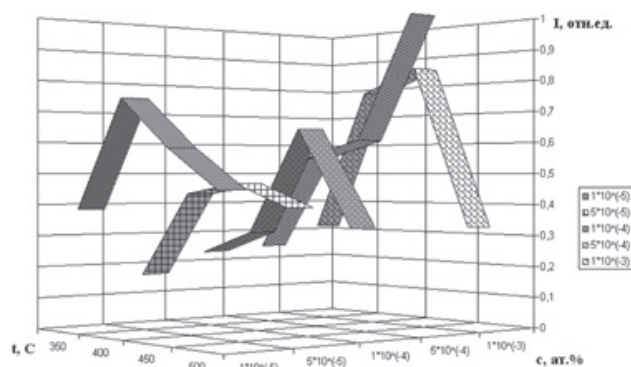


Рис. 6. Зависимость интенсивности люминесценции пленок CdS, легированных K совместно с Cl, от температуры напыления и концентрации примеси.

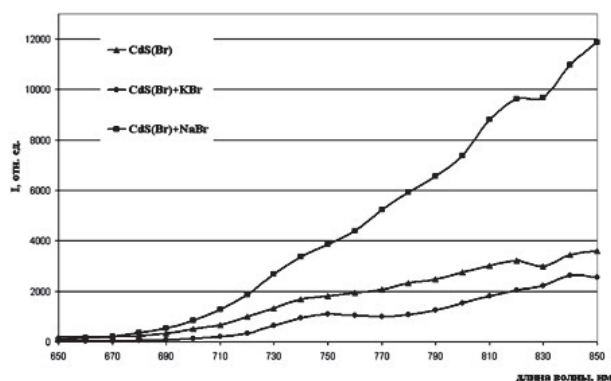


Рис. 7. Спектры ФЛ пленок CdS, легированных щелочными металлами Na, K совместно с бромом ( $c = 10^{-5}$  ат. %,  $t_{\text{нап.}} = 450$  °C), измеренные при 300 К

Таблица 5

Характеристики элементарных составляющих полосы ФЛ пленок CdS, легированных Na совместно с Br при  $t_{\text{нап}}=450$  °С, измеренной при комнатной температуре

Образцы	Положение максимума полосы, нм / интенсивность, отн.ед.		
C=1·10 <sup>-5</sup> ат. %	744/0,26	798/0,51	850/0,91
C=5·10 <sup>-5</sup> ат. %	742/0,29	797/0,55	850/0,95
C=1·10 <sup>-4</sup> ат. %	746/0,35	798/0,64	845/0,95
C=5·10 <sup>-4</sup> ат. %	737/0,38	790/0,73	840/0,96
C=1·10 <sup>-3</sup> ат. %	739/0,4	792/0,71	842/0,92

Таблица 6

Характеристики элементарных составляющих полосы ФЛ пленок CdS, легированных K совместно с Br при  $t_{\text{нап}}=450$  °С, измеренной при комнатной температуре

Образцы	Положение максимума полосы, нм / интенсивность, отн.ед.		
C=1·10 <sup>-5</sup> ат. %	751/0,4	810/0,62	849/0,88
C=5·10 <sup>-5</sup> ат. %	746/0,35	809/0,53	846/0,79
C=1·10 <sup>-4</sup> ат. %	745/0,46	800/0,46	842/0,84
C=5·10 <sup>-4</sup> ат. %	753/0,52	811/0,65	844/0,76
C=1·10 <sup>-3</sup> ат. %	750/0,61	803/0,71	850/0,87

для пленок легированных щелочными металлами совместно с хлором, все три полосы люминесценции пленок CdS легированных щелочными металлами совместно с бромом смещаются в длинноволновую сторону при легировании более крупными атомами ( $\lambda_{\text{CdS}} < \lambda_{\text{CdS+NaBr}} < \lambda_{\text{CdS+KBr}}$ ). Если сравнить зависимости интенсивности люминесценции исследуемых бромных пленок от температуры напыления (рис. 8, 9), можно заметить, что для всех пленок этого типа имеется тенденция увеличения интенсивности люминесценции с ростом температуры, причем, если примесь содержится в малом количестве ( $1 \div 5 \cdot 10^{-5}$  ат. %), зависимости интенсивности люминесценции от температуры мало различаются для пленок содержащих натрий и калий. Однако, с увеличением концентрации примеси поведение кривых  $I(t, ^\circ\text{C})$  становится более различно друг от друга для пленок содержащих натрий и калий, хотя тенденция увеличения интенсив-

ности люминесценции с ростом температуры для данной концентрации сохраняется.

Зависимости интенсивности люминесценции от концентрации примеси для пленок, легированных щелочными металлами совместно с бромом отличаются для разных температур напыления пленок легированных одним и тем же щелочным металлом, что наблюдалось и в случае хлорных пленок. Однако, с уменьшением температуры напыления зависимости  $I(c)$  для пленок легированных натрием и калием при одинаковых температурах напыления начинают вести себя одинаково.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пленки сульфида кадмия, полученные методом распыления растворов тиомочевинных координационных соединений (ТКС) на нагретую подложку являются кристаллофосфорами с достаточно высоким квантовым выходом люминесценции. Легирование пленок CdS щелочными металлами (Li, Na, K)

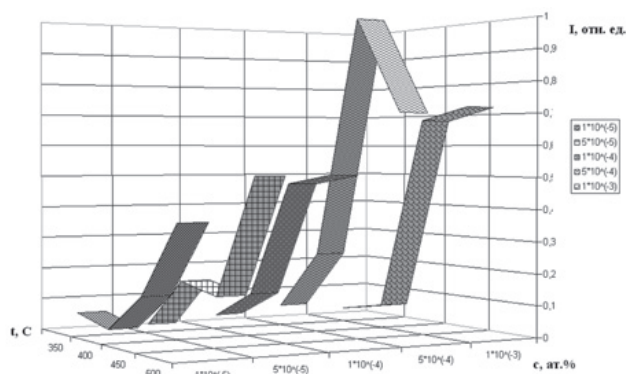


Рис. 8. Зависимость интенсивности люминесценции пленок CdS, легированных Na совместно с Br, от температуры напыления и концентрации примеси

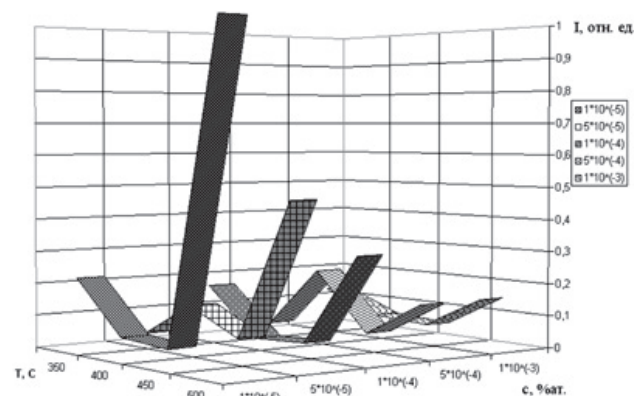


Рис. 9. Зависимость интенсивности люминесценции пленок CdS, легированных K совместно с Br, от температуры напыления и концентрации примеси

совместно с Cl или Br приводит в основном к увеличению интенсивности люминесценции в диапазоне 650—850 нм по сравнению с чистыми пленками CdS. Определены оптимальные условия синтеза пиролитических пленок на основе CdS, легированных щелочными металлами, с наилучшими люминесцентными свойствами, которые могут использоваться в качестве люминофоров, а также в оптоэлектронике.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Механизмы оранжевой, красной и инфракрасной фотолюминесценции в монокристаллах CdS и параметры соответствующих центров свечения / М.К. Шейнкман [и др.] // Физика твердого тела. — 1968. — № 9. — С. 2628—2638.
2. Семенов В.Н. Процессы формирования тонких слоев полупроводниковых сульфидов из титомочевинных координационных соединений: дис. д-ра хим. наук: 45Д/71: защищена 27.06.02 : утверждена 15.11.02 / В. Н. Семенов. — Воронеж, 2002. — 355 с.
3. Гурвич А.М. Введение в физическую химию кристаллофосфоров. — М.: Высшая школа, 1971. — 336 с.
4. Келле Х.И. К вопросу о происхождении оранжевой и красной люминесценции CdS / Х.И. Келле, Я. Я. Кирс, Л. Т. Тулва // Проблемы физики соединений A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup>. — Вильнюс, 1972. — С. 85—89.
5. Спектрально-люминесцентные свойства пленок, полученных распылением растворов титомочевинных комплексов кадмия на нагретую подложку / В. Н. Семенов [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. — 1993. — № 1—2. — С. 114—119.
6. Физико-химические процессы в полупроводниках и на их поверхности: сб. статей / под ред. Я. А. Угай. — Воронеж: ВГУ, 1981. — 200 с.
7. Физика соединений A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> / под ред. А. Н. Георгобидани, М. К. Шейнкман. — М.: Наука, 1986. — 320 с.
8. Зломанов В.П. Р-Т-х-Диаграммы состояния систем металл-халькоген / В. П. Зломанов, А. В. Нововселова А.В. — М.: Наука, 1989. — 320 с.