

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 541.64:546.65:535.37

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ
КОМПОЗИЦИЙ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТ/(Zn_xCd_{1-x})S

© 2019 г. А. А. Исаева¹, В. П. Смагин¹. *

¹Алтайский государственный университет, пр-т Ленина, 61, Барнаул, 656049 Россия

* E-mail: smaginV@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.02.2019 г.

После доработки 29.03.2019 г.

Принята к публикации 15.04.2019 г.

Квантовые точки (КТ), синтезированные сочетанием полупроводников, характеризуются более стабильными оптическими свойствами. Внедрением их в полимерные матрицы могут быть получены оптические композиции с прогнозируемым комплексом физико-химических свойств. Свойства в значительной мере определяются методом и условиями синтеза композиций. Показано влияние состава реакционных смесей, последовательности их приготовления и нагревания на состав, структуру и фотолюминесцентные свойства КТ (Zn_xCd_{1-x})S в полимерных композициях на основе полиметилметакрилата (ПММА). Синтез КТ проведен *in situ* в среде метилметакрилата (ММА). Образование сульфидов происходит при разрушении тиоацетамидных комплексов металлов. Формирование КТ продолжается при термическом отверждении композиций до стеклообразного состояния. В качестве отклика на изменения условий синтеза рассмотрены изменения в спектрах фотолюминесценции и возбуждения фотолюминесценции композиций ПММА/(Zn_xCd_{1-x})S. Дезактивация возбужденных электронных состояний происходит с участием энергетических уровней дефектов, расположенных на энергетической диаграмме композиций в запрещенной зоне полупроводниковых КТ. Спектр люминесценции преимущественно определяется CdS и дефектами на поверхности его кристаллов. На основании полученных данных предложены формулы, отражающие состав и структуру композиций, формирующихся при различных условиях синтеза.

Ключевые слова: полупроводники A^{II}B^{VI}, сульфид кадмия, сульфид цинка, коллоидный синтез, квантовые точки, полиметилметакрилат, композиты, фотолюминесценция

DOI: 10.1134/S0044457X19100064

ВВЕДЕНИЕ

Чистые и легированные полупроводниковые наноразмерные кристаллы группы A^{II}B^{VI} уже более двух десятилетий привлекают внимание исследователей. Среди них квантовые точки (КТ) сульфидов цинка и кадмия являются одними из наиболее перспективных для применения в оптике и электронике.

Люминесценция CdS связана с дефектами в объеме и на поверхности кристаллов. В спектре наблюдаются полосы люминесценции в интервале 400–500 и >550 нм соответственно. Основными дефектами являются ионы серы в междоузлиях кристаллической решетки и вакансии в подрешетке кадмия. Люминесценция имеет рекомбинационный характер. Наиболее вероятно, что рекомбинация происходит по донорно-акцепторному механизму Вильямса–Пренера [1, 2], т.е. возбуждающее излучение индуцирует переход электрона от удаленного донора к ионизованной дырочной паре.

Спектр люминесценции сульфида цинка более сложный. Область люминесценции при 380–400 нм связывают с межзонным переходом в кристаллах “чистого” ZnS. Соответствующая спектральная полоса зарегистрирована только при температурах <90 К или при высокой плотности энергии возбуждения [3]. В спектральном диапазоне 400–600 нм расположены полосы “самоактивированной” люминесценции ZnS. Ее происхождение связывают с собственными дефектами кристаллической структуры ZnS. По мнению [3, 4], полосу люминесценции в интервале 400–480 нм дают отрицательно заряженные вакансии цинка (V_{Zn}^{\prime}). Выделены четыре компоненты данной полосы [5]. Полосы люминесценции в “зеленой” области спектра связаны с двухзарядными вакансиями ионов цинка ($V_{Zn}^{\prime\prime}$) [3, 4] и вакансиями серы (V_S) [4, 6]. Происхождение полосы с максимумом в области 590 нм объясняется политипностью кристаллической структуры ZnS [5]. По данным [1, 2], люминесценция ZnS происходит по механизмам Шена–

Классенса и Ламбе–Клика. В соответствии с первым механизмом, свечение возникает при рекомбинации свободного электрона с дыркой, локализованной на центре свечения. По второму механизму, кристаллы ZnS люминесцируют в результате излучательной рекомбинации свободных дырок с локализованными электронами. Процесс происходит при освобождении длинноволновым излучением дырок с глубоких центров захвата. В сложных композициях возможна одновременная реализация механизмов. Согласно [7], интенсивность излучения зависит от стехиометрического отношения Zn^{2+}/S^{2-} . Максимум интенсивности люминесценции достигается при двойном избытке серы. Количество ионов S^{2-} влияет также на средний размер частиц сульфида и, соответственно, на положение спектральных полос. Например, для сульфида цинка при дефиците ионов S^{2-} средний диаметр частиц равен 3.1 нм, а при избытке S^{2-} – 4.5 нм.

На спектр люминесценции сульфидов цинка и кадмия оказывают влияние атомы кислорода, замещающие атомы серы в ее подрешетке. Соответствующие спектральные полосы проявляются при $\lambda > 500$ нм [8]. Кроме того, влияют внешние факторы [4], примеси [3], легирование ионами меди, марганца, серебра, хрома [3, 4, 6, 9, 10].

В настоящее время бинарные полупроводниковые наночастицы уступают место тройным и более сложным структурам. Их преимуществом является возможность регулирования оптических свойств путем изменения размера частиц и мольного соотношения компонентов [11]. Среди тройных структур на первый план также выдвигаются соединения кадмия и цинка, в частности КТ состава $Zn_xCd_{1-x}S$. Структурные и оптические свойства данного полупроводника активно изучаются по всему миру [12]. Изменяя соотношение сульфидов кадмия и цинка, можно добиться фотолюминесценции при разных длинах волн в широком спектральном диапазоне. Квантовый выход фотолюминесценции КТ $Zn_xCd_{1-x}S$ достигает 80%. Благодаря своим оптоэлектронным свойствам наночастицы $Zn_xCd_{1-x}S$ применяются в фотокатализе, фотогальванических устройствах, солнечных элементах, химических датчиках, нелинейных оптических устройствах, биосенсорах [7, 11, 13–22].

Среди методов синтеза КТ полупроводников $A^{IV}B^{VI}$ выделим коллоидный синтез. Его достоинства заключаются в простоте и экономичности, в возможности контроля размера частиц и размерной дисперсии [23, 24]. Синтез проводят в водной и органических средах [20]. Размер частиц сульфидов, синтезированных в среде малополярных органических растворителей, рассчитанный из спектроскопических данных, как правило, не превышает 10 нм. Частицы образуют агрегаты. Размер агрегатов достигает десятков нм [25–27]. Спек-

троскопические данные подтверждаются электронной микроскопией (ПЭМ) и РФА. На фотографиях выделенных из растворов продуктов синтеза видны отдельные сферические и гексагональные частицы и их агрегаты, покрытые слоем комплексов, исходных веществ и продуктов [25–27]. На рентгенограммах присутствуют рефлексии обоих структурных форм сульфида кадмия [27].

В качестве дисперсионной среды применяются мономеры [24, 28, 29]. При их полимеризации получают пленки и стекла, содержащие наночастицы полупроводников. При использовании матрицы на основе акриловых полимеров светопропускание композиций полимер/полупроводник при $\lambda > 500$ нм достигает 90–92% при толщине поглощающего слоя до 5 мм [25, 26]. На микрофотографиях полиакрилатных пленок видны частицы полупроводников, размер которых составляет нанометры [25]. Разрушение агрегатов и уменьшение размера частиц подтверждается спектральными данными. При увеличении продолжительности полимеризации и времени отжига образцов полоса в спектре люминесценции CdS смещается в область коротких волн. Смещение максимума составляет десятки нанометров (780 → 600 нм) [25]. Это связано с продолжающимся разрушением тиоацетамидных комплексов на поверхности частиц и образованием сульфидов, а также с формированием более однородной поверхности частиц.

Неоднократными исследованиями подтверждено, что размер и свойства наночастиц зависят от метода получения и условий синтеза [7, 23]. Исходя из этого, цель данной работы состояла в определении влияния состава реакционных смесей, последовательности их приготовления и нагревания на состав, структуру и фотолюминесцентные свойства КТ ($Zn_xCd_{1-x}S$) в полимерных композициях на основе полиметилметакрилата (ПММА).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Квантовые точки ($Zn_xCd_{1-x}S$) получены разложением тиоацетамидных комплексов трифторацетатов цинка и кадмия в среде метилметакрилата (ММА). Концентрации трифторацетатов кадмия и цинка в конечных растворах (с учетом разведения при смешивании исходных растворов, если оно предусмотрено методикой) составляли по 0.010 моль/л. Конечный объем растворов во всех случаях был равен 10.0 мл. При приготовлении растворов изменяли порядок введения реагентов, количество тиоацеамида (ТАА) и условия нагревания.

При приготовлении первого раствора (1) в пробирку помещали навеску трифторацетата цинка и навеску тиоацетамида, эквивалентную количеству трифторацетата цинка. Навески растворя-

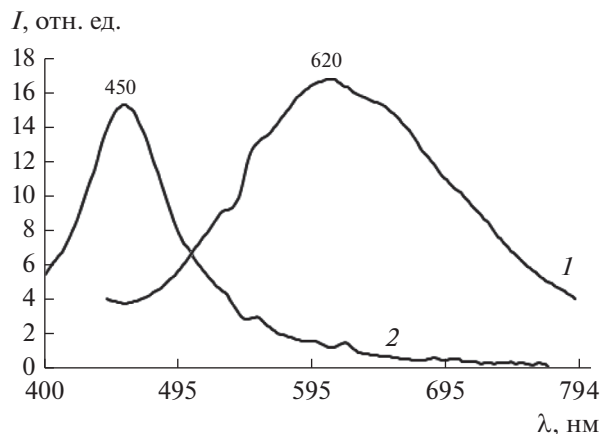


Рис. 1. Спектры люминесценции ($\lambda_{\text{в}} = 370$ нм) композиций ПММА/CdS (1) и ПММА/ZnS (2), $C_{\text{Cd}} = C_{\text{Zn}} = C_{\text{TAA}} = 0.010$ моль/л [25, 30].

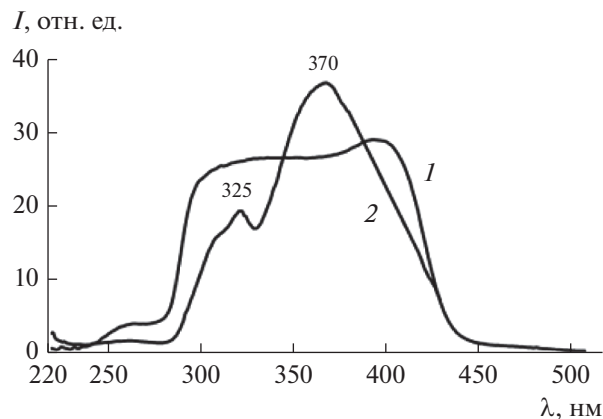


Рис. 2. Спектры возбуждения люминесценции композиций ПММА/CdS (1) и ПММА/ZnS (2) соответственно для люминесценции 620 и 440 нм, $C_{\text{Cd}} = C_{\text{Zn}} = C_{\text{TAA}} = 0.010$ моль/л [25, 26, 30].

ли в метилметакрилате и нагревали на водяной бане при температуре 70–90°C в течение 10 мин. В другую пробирку помещали навеску трифторацетата кадмия и эквивалентное количество тиаоцетамида. Вещества растворяли в ММА. Первый и второй растворы смешивали. Полученную смесь нагревали на водяной бане при 70–90°C в течение 10 мин. Второй раствор (2) получен аналогично первому, но изменен порядок внесения трифторацетатов металлов: первыми были внесены трифторацетат кадмия и тиаоцетамид. После нагревания к полученному раствору прибавляли эквивалентное количество трифторацетата цинка и тиаоцетамида в ММА, затем полученный раствор нагревали. При приготовлении третьего раствора (3) в первую пробирку помещали трифторацетат цинка и тиаоцетамид, а во вторую – трифторацетат кадмия и тиаоцетамид. Навески растворяли в ММА. Обе пробирки одновременно нагревали на водяной бане при температуре 70–90°C в течение 10 мин, затем растворы смешивали и продолжали нагревание при тех же условиях. Для приготовления четвертого (4) и пятого (5) растворов к навескам трифторацетатов металлов (цинка в четвертом случае, кадмия – в пятом) добавляли двойную порцию ТАА. Навески растворяли в ММА, растворы нагревали на водяной бане в течение 10 мин, затем к ним добавляли растворы трифторацетатов металлов (кадмия в четвертом случае, цинка – в пятом) в метилметакрилате. Полученные смеси нагревали, как указано выше. При приготовлении шестого раствора (6) навески трифторацетатов кадмия и цинка, а также двойную порцию ТАА помещали в одну пробирку, растворяли в ММА и нагревали на водяной бане при 70–90°C в течение 10 мин. Об образовании сульфидов металлов судили по изменению окраски растворов. Коллоидная природа подтверждалась их опалесценцией.

Полимеризация коллоидных растворов была проведена аналогично [26] в присутствии перекиси бензоила при температуре 60–70°C в течение 24 ч. В результате синтезированы оптически прозрачные полимерные “стекла” состава ПММА/(Zn_xCd_{1-x})S. Все “стекла” прозрачные. Базовое светопропускание при $\lambda > 500$ нм достигало 92%. Окраска “стекол” светлая, желто-зеленая. Она соответствует окраске CdS. Спектры фотолюминесценции и возбуждения фотолюминесценции ПММА/(Zn_xCd_{1-x})S зарегистрированы по методике [26].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спектр люминесценции композиции ПММА/CdS приведен на рис. 1 (спектр 1). В ПММА коротковолновая полоса люминесценции CdS проявляется с малой интенсивностью или отсутствует. Положение длинноволновой полосы зависит от состояния поверхности частиц, наличия легирующих ионов и комплексов с компонентами матрицы [25, 26]. В интервале длин волн 280–430 нм спектра возбуждения люминесценции зарегистрирована широкая сложная полоса (рис. 2, спектр 1). Значительная полуширина спектральных полос объясняется неоднородностью люминесцирующих центров, формирующихся в процессе синтеза композиций.

Композиция ПММА/ZnS люминесцирует в области длин волн 300–600 нм (рис. 1, спектр 2). При монохроматическом возбуждении люминесценции излучением с $\lambda = 230$ –370 нм выделены отдельные компоненты данной полосы [30]. Их максимумы располагаются при $\lambda = 418, 425, 450$ и 550 нм. Батохромное смещение происходит с увеличением длины волны возбуждающего излучения.

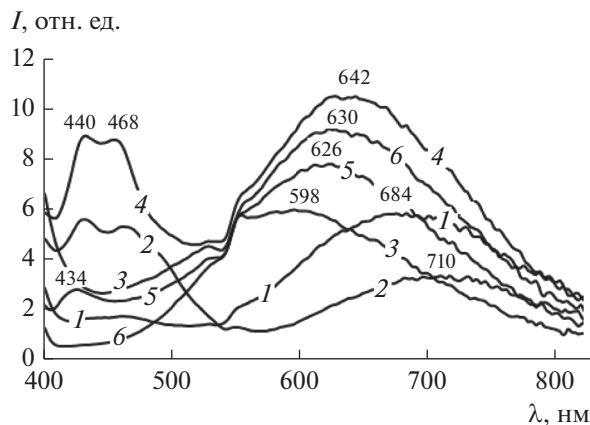


Рис. 3. Спектры люминесценции ($\lambda_B = 370$ нм) композиций 1–6 (1–6 соответственно), концентрации веществ в композициях 1–3: $C_{Zn} = C_{Cd} = C_{TAA} = 0.010$ моль/л, 4–6: $C_{Cd} = C_{Zn} = 0.010$ моль/л, $C_{TAA} = 0.020$ моль/л.

Структуру и неоднородное уширение полос в спектрах люминесценции (рис. 1, спектр 2) и возбуждения люминесценции (рис. 2, спектр 2) композиций ПММА/ZnS связывают с полиморфизмом ZnS, незавершенностью формирования структуры, дисперсностью частиц, влиянием кислорода [5, 8, 31, 32]. Кроме того, сказывается комплексобразование на поверхности частиц, аморфность полимерной матрицы, а также полосы люминесценции матрицы [25, 26, 33].

Спектры фотолюминесценции композиций ПММА/(Zn_xCd_{1-x})S (1–6) представлены на рис. 3. В спектрах всех композиций в интервале длин волн 500–800 нм наблюдается длинноволновая полоса люминесценции сульфида кадмия. При изменении условий синтеза композиций положение максимума изменяется от 598 до 710 нм. В спектрах композиций 2, 4 и 5 наблюдается коротковолновая полоса, которую можно связать с люминесценцией сульфида цинка (рис. 3, спектры 2, 4 и 5). Все полосы сложные, уширенные, их структура и значительная ширина связаны с неоднородностью люминесцирующих центров, обусловленных отмеченными выше причинами.

Изменения в спектрах люминесценции композиций с учетом имеющихся литературных данных о размере частиц и его изменении под влиянием различных факторов, а также данных электронной микроскопии [25–27, 30, 33] позволили высказать ряд предположений относительно структуры КТ. Наличие одного длинноволнового максимума в спектре композиции 1 (рис. 3, спектр 1) может указывать на образование КТ, ядро которых преимущественно состоит из кристаллов Zn(Cd)S, где кадмий выступает в качестве легирующего компонента, покрытых оболочкой Cd(Zn)S с трифторацетатными комплексами металлов на по-

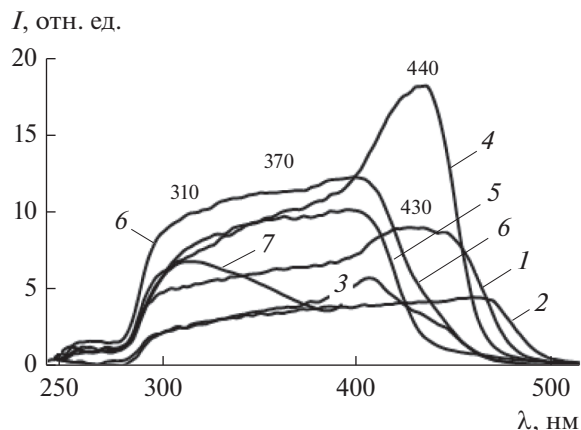


Рис. 4. Спектры возбуждения люминесценции композиций 1–6 (1–6 соответственно), $\lambda_B = 680$ нм; спектр 7 композиции 5, $\lambda_B = 434$ нм; концентрации веществ в композициях 1–3: $C_{Zn} = C_{Cd} = C_{TAA} = 0.010$ моль/л, 4–6: $C_{Cd} = C_{Zn} = 0.010$ моль/л, $C_{TAA} = 0.020$ моль/л.

верхности. Это предположение подтверждается отсутствием полосы люминесценции при $\lambda < 500$ нм, связанной с ZnS, небольшой интенсивностью длинноволновой полосы люминесценции (рис. 3, спектр 1) и возбуждения люминесценции (рис. 4, спектр 1), а также длинноволновым смещением максимума полосы в спектре люминесценции (684 нм). Первое объясняется различием ширины запрещенной зоны CdS и ZnS и, как следствие, затрудненным проникновением возбуждающего излучения к ядру КТ и люминесценции в обратном направлении (2.42 и 3.68 эВ для объемных кристаллов CdS и ZnS при 300 К соответственно). Второе и третье – введением “холодной” смеси трифторацетата кадмия и ТАА в “горячий” раствор смеси трифторацетата цинка и ТАА после начала образования в нем частиц ZnS. Исходя из приведенных соображений, композиция 1 может быть представлена следующей формулой – ПММА/(Zn(Cd)S/Cd(Zn)S):Cd²⁺, Zn²⁺.

В спектре люминесценции композиции 2 (рис. 3, спектр 2) наблюдается сложный дублет в области, связанной с ZnS ($\lambda_{\text{макс}} = 440$ и 468 нм), и полоса в области >550 нм, связанная с CdS ($\lambda_{\text{макс}} = 710$ нм). Вид спектра и условия синтеза позволяют предположить формирование КТ, ядра которых преимущественно состоят из Cd(Zn)S. Они покрыты оболочкой Zn(Cd)S с трифторацетатными комплексами металлов на поверхности. Присутствие в спектре композиции длинноволновой полосы люминесценции, связанной с CdS, соответствует соотношению ширины запрещенной зоны сульфидов кадмия и цинка. Источником “свободно” преодолевает покрывающий слой широкозонного Zn(Cd)S, достигая ядра Cd(Zn)S. Люминесценция Cd(Zn)S связана с уровнями, расположенными в запрещенной зоне

полупроводника, образованными дефектами кристаллической структуры соединений. Еще большее длинноволновое смещение полосы люминесценции (684 → 710 нм) может указывать на поверхностный характер дефектов. Они, вероятно, связаны с образованием в поверхностном слое сульфида кадмия твердых растворов сульфидов. Уменьшение интенсивности люминесценции по сравнению с аналогичной полосой в спектре композиции **1** (рис. 3, спектр 1) соответствует увеличению вероятности безызлучательных процессов при усложнении энергетической диаграммы композиции. Появление в спектре композиции **2** коротковолновой полосы люминесценции соответствует расположению Zn(Cd)S на поверхности КТ. Происхождение коротковолнового дублета связывают с образованием однозарядных вакансий вида V_{Zn}' в подрешетке цинка, им соответствует полоса люминесценция в спектральном интервале 400–480 нм, которая может содержать до четырех компонент [3–6], а также с неоднородностью структуры ZnS в процессе ее формирования [32]. В спектре возбуждения люминесценции (рис. 4, спектр 2) интенсивность длинноволновой части полосы существенно меньше. Это соответствует высказанным предположениям о структуре КТ. Исходя из приведенных соображений, композицию **2** можно представить формулой ПММА/(Cd(Zn)S/Zn(Cd)S):Cd²⁺, Zn²⁺.

В спектре композиции **3** наблюдается полоса с максимумом при 600 нм, связанная с люминесценцией Cd(Zn)S (рис. 3, спектр 3). Положение полосы и ее максимума соответствует данным [25, 26, 33]. Люминесценция связана с дефектами кристаллической структуры на поверхности частиц CdS. Отсутствие коротковолновой полосы люминесценции, связанной с ZnS, можно объяснить незавершенностью процесса образования сульфидов металлов на первом этапе синтеза при раздельном нагревании исходных растворов. При нагревании раствора после смешения и в процессе полимеризации продолжается образование Cd(Zn)S, который образует на частицах Zn(Cd)S защитный слой, препятствующий проникновению излучения. В спектре возбуждения люминесценции композиции **3** наблюдается небольшое увеличение интенсивности полосы в области >400 нм, связанной с поглощением Cd(Zn)S. На основании высказанных предположений композицию **3** можно представить формулой ПММА/(Zn(Cd)S/Cd(Zn)S; Cd(Zn)S).

В спектре композиции **4** наблюдается коротковолновая полоса в виде дублета с максимумами при 440 и 468 нм и длинноволновая полоса с максимумом при 642 нм (рис. 3, спектр 4). Учитывая повторение контура коротковолновой полосы люминесценции и ранее высказанные предположения о ее возникновении, данную полосу можно связать с образованием КТ состава Zn(Cd)S. Длинноволновую полосу люминесценции можно

объяснить образованием частиц Cd(Zn)S:Cd²⁺. Образование комплексов кадмия на поверхности частиц обусловлено дефицитом ТАА, в большей степени израсходованного на образование сульфида цинка при нагревании исходного раствора трифторацетата цинка. В спектре возбуждения наблюдается увеличение относительной интенсивности длинноволновой полосы поглощения, связанной с сульфидом кадмия. Композицию **4** можно представить формулой ПММА/(Zn(Cd)S:Cd²⁺; Cd(Zn)S:Cd²⁺).

В спектре композиции **5** наблюдается две полосы люминесценции (рис. 3, спектр 5). Длинноволновая полоса с максимумом при 626 нм связана с КТ Cd(Zn)S. Коротковолновая полоса с максимумом при 434 нм может быть связана как с ZnS, так и с дефектами кристаллической структуры в объеме кристаллов CdS [26]. Спектр возбуждения люминесценции композиции **5** (рис. 4, спектр 5) по виду и положению полосы наиболее близок к спектру возбуждения композиции ПММА/CdS (рис. 2, спектр 2). Композицию **5** можно представить формулой ПММА/Cd(Zn)S:Zn²⁺.

В спектре композиции **6** (рис. 3, спектр 6) наблюдается одна длинноволновая полоса люминесценции с максимумом при 630 нм, связанная с Cd(Zn)S. Из сравнения спектров композиций **3–6** можно предположить, что в процессе синтеза образуются КТ (Zn(Cd)S/Cd(Zn)S):Cd²⁺, Zn²⁺ и Cd(Zn)S:Cd²⁺, Zn²⁺, а состав композиции можно представить формулой ПММА/((Zn(Cd)S/Cd(Zn)S):Cd²⁺, Zn²⁺; Cd(Zn)S:Cd²⁺, Zn²⁺).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом коллоидного синтеза в среде метилметакрилата синтезированы КТ (Zn_xCd_{1-x})S и их структуры типа “ядро/оболочка”. Полимеризацией MMA коллоидные растворы переведены в стеклообразное состояние. Получены композиции вида ПММА/((Zn_xCd_{1-x})S/(Cd_xZn_{1-x})S) и ПММА/((Cd_xZn_{1-x})S/(Zn_xCd_{1-x})S). Показано, что различное сочетание исходных растворов, содержащих трифторацетаты кадмия, цинка, ТАА, и условия нагревания существенным образом влияют на спектр люминесценции композиций. В спектрах наблюдаются одна или две широкие сложные полосы люминесценции, связанные с дефектами кристаллической структуры полупроводников, преимущественно на поверхности частиц. Возбуждение люминесценции происходит в результате межзонного перехода электронов в полупроводнике. На основании вида спектров и методики синтеза композиций высказаны предположения о структуре КТ, которые приведены в виде формул.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vineeshkumar T.V., Rithesh Raj D., Prasanth S. et al.* // *Opt. Mater.* 2014. № 37. P. 439. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2014.06.037>
2. *Saluja J.K., Parganiha Y., Tiwari N. et al.* // *Optik.* 2016. № 127. P. 7958. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.05.011>
3. *Казанкин О.Н., Марковский Л.Я., Миронов И.А. и др.* Неорганические люминофоры. Л.: Химия, 1975. 192 с.
4. *Kuchakova T.A., Vesna G.V., Makara V.A.* // *Semiconductors.* 2004. V. 38. № 11. P. 1275. [*Кучакова Т.А., Весна Г.В., Макара В.А.* // *ФТП.* 2004. Т. 38. № 11. С. 1316.] <https://doi.org/10.1134/1.1823058>
5. *Denzler D., Olschewski M., Sattler K.* // *J. Appl. Phys.* 1998. V. 84. № 5. P. 2841.
6. *Vacherikov Yu.Yu., Vorona I.P., Optasyuk S.V. et al.* // *Semiconductors.* 2004. V. 38. № 9. P. 987. [*Бачери-ков Ю.Ю., Ворона И.П., Оптасюк С.В. и др.* // *ФТП.* 2004. Т. 38. № 9. С. 1025.]
7. *Корсаков В.Г., Сычев М.М., Бахметьев В.В.* // Конденсированные среды и межфазные границы. 2012. Т. 14. № 1. С. 41.
8. *Морозова Н.К., Каретников И.А., Мидерос Д.А. и др.* // *ФТП.* 2006. Т. 40. № 10. С. 1185. [*Морозова Н.К., Каретников И.А., Мидерос Д.А. et al.* // *Semiconductors.* 2006. V. 40. № 10. P. 1155.]
9. *Буланый М.Ф., Коваленко А.В., Полежаев Б.А., Прокофьев Т.А.* // *ФТП.* 2009. Т. 43. № 6. С. 745. [*Bulanuy M.F., Kovalenko A.V., Polezaev B.A., Prokofyev T.A.* // *Semiconductors.* 2009. V. 43. № 6. P. 16. <https://doi.org/10.1134/S1063782609060050>]
10. *Огурцов К.А., Сычев М.М., Бахметьев В.В. и др.* // Неорган. материалы. 2016. Т. 52. № 11. С. 1188. [*Ogurtsov K.A., Sychov M.M., Vakhmetyev V.V. et al.* // *Inorg. Mater.* 2016. V. 52. № 11. С. 1115. <https://doi.org/10.1134/S0020168516110121>]
11. *Masab M., Haji M., Shah F. et al.* // *Mater. Sci. Semicond. Process.* 2018. № 81. P. 113. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.03.023>
12. *Vineeshkumar T.V., Rithesh Raj D., Prasanth S. et al.* // *Opt. Mater.* 2016. № 58. P. 128. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.05.022>
13. *Osman M.A., Abd-Elrahim A.G., Othman A.A.* // *Mater. Charact.* 2018. № 144. P. 247. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.07.020>
14. *Alehdaghi H., Marandi M., Molaei M. et al.* // *J. Alloys Compd.* 2014. № 586. P. 380. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.09.190>
15. *Abdel Rafea M., Farag A.M., El-Shazly O. et al.* // *Microelectron. Eng.* 2014. № 122. P. 40. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2014.03.004>
16. *Noor N.A., Ikram N., Ali S. et al.* // *J. Alloys Compd.* 2010. № 507. P. 356. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.07.197>
17. *Shi-Zhao Kang, Ladi Jia, Xiangqing Li, Jin Mu* // *Colloids Surf., A.* 2012. № 398. P. 48. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.02.008>
18. *Muhammad Ashraf, Syed Sajjad Hussain, Saira Riaz, Shahzad Naseem* // *Mater. Today: Proceedings 2.* 2015. P. 5695. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.11.112>
19. *Wenjuan Zhu, Chao Wang, Xiaojian Li et al.* // *Biosens. Bioelectron.* 2017. № 97. P. 115. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2017.05.046>
20. *Kumar S.R., Suresh Kumar, Sharma S.K., Roy D.* // *Mater. Today: Proceedings 2.* 2015. P. 4563. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.10.071>
21. *Xin Xu, Ruijuan Lu, Xiaofei Zhao et al.* // *Appl. Catal., B: Environmental.* 2012. № 125. P. 11. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.05.018>
22. *Prem Kumar T., Saravanakumar S., Sankaranarayanan K.* // *Appl. Surf. Sci.* 2010. № 257. P. 1923. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.09.027>
23. *Iranmanesh P., Saeednia S., Khorasanipoor N.* // *Mater. Sci. Semicond. Process.* 2017. № 68. P. 193. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.06.029>
24. *Imam N.G., Mohamed Bakr Mohamed* // *J. Mol. Struct.* 2016. № 1105. P. 80. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2015.10.039>
25. *Смагин В.П., Еремина Н.С., Исаева А.А.* // *Журн. неорган. химии.* 2017. Т. 62. № 1. С. 130. [*Smagin V.P., Eremina N.S., Isaeva A.A.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2017. V. 62. № 1. P. 131. <https://doi.org/10.1134/S0036023617010223>]
26. *Смагин В.П., Исаева А.А., Еремина Н.С., Бирюков А.А.* // *Журн. прикл. химии.* 2015. Т. 88. № 6. С. 924. [*Smagin V.P., Isaeva A.A., Eremina N.S., Biryukov A.A.* // *Russ. J. Appl. Chem.* 2015. V. 88. № 6. P. 1020. <https://doi.org/10.1134/S1070427215060208>]
27. *Смагин В.П., Давыдов Д.А., Унжакова Н.М., Бирюков А.А.* // *Журн. неорган. химии.* 2015. Т. 60. № 12. С. 1734. [*Smagin V.P., Davydov D.A., Unzhakova N.M., Biryukov A.A.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2015. V. 60. № 12. P. 1588. <https://doi.org/10.1134/S0036023615120244>]
28. *Юрков Г.Ю.* Научные основы получения новых композиционных функциональных материалов на основе металлосодержащих наночастиц d-элементов и полимерных матриц (полиэтилена и политетрафторэтилена) и исследование их физических и химических свойств. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Саратов, 2009. 50 с.
29. *Смагин В.П., Мокроусов Г.М.* Физико-химические аспекты формирования и свойства оптически прозрачных металлосодержащих полимерных материалов. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2014. (<http://elibrary.asu.ru/xmlui/bitstream/handle/asu/840/read.7book?sequence=1>)
30. *Смагин В.П., Еремина Н.С., Леонов М.С.* // *ФТП.* 2018. Т. 52. № 8. С. 891. [*Smagin V.P., Eremina N.S., Leonov M.S.* // *Semiconductors.* 2018. V. 52. № 8. P. 1022. <https://doi.org/10.1134/S1063782618080213>]
31. *Романов Э.А.* Нанокристаллические пленки сульфида и селенида цинка для тонкопленочных электролюминесцентных источников. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ижевск, 2011. 151 с.
32. *Ремпель С.В., Разводов А.А., Небогатиков М.С. и др.* // *ФТТ.* 2013. Т. 55. № 3. С. 567. [*Rempel' S.V., Razvodov A.A., Nebogatikov M.S. et al.* // *Physics Solid State.* 2013. V. 55. № 3. P. 624. <https://doi.org/10.1134/S1063783413030244>]
33. *Смагин В.П., Еремина Н.С., Исаева А.А., Ляхова Ю.В.* // Неорган. материалы. 2017. Т. 53. № 3. С. 252. [*Smagin V.P., Eremina N.S., Isaeva A.A., Lyakhova Yu.V.* // *Inorg. Mater.* 2017. V. 53. № 3. P. 263. <https://doi.org/10.1134/S0020168517030086>]