



УДК 535.343, 539.213.27

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КЛАСТЕРОВ СЕРЕБРА, ВВЕДЕННЫХ МЕТОДОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИОННОГО ОБМЕНА, С НАНОЧАСТИЦАМИ CdS ВО ФТОРФОСФАТНЫХ СТЕКЛАХ

Н.Д. Гражданов<sup>а</sup>, Е.В. Колобкова<sup>а</sup>, Ж.О. Липатова<sup>а</sup><sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: nikolai-grazhdanov@yandex.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 19.05.15, принята к печати 27.07.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-5-856-862

**Ссылка для цитирования:** Гражданов Н.Д., Колобкова Е.В., Липатова Ж.О. Взаимодействие молекулярных кластеров серебра, введенных методом низкотемпературного ионного обмена, с наночастицами CdS во фторфосфатных стеклах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 5. С. 856–862.

### Аннотация

Стекла с металлическими и полупроводниковыми наночастицами являются перспективными нелинейными и люминесцентными материалами фотоники. Теоретически было показано, что для усиления нелинейного эффекта Керра оптимальны композитные оптические материалы, содержащие полупроводниковое CdS-ядро с металлической Ag-оболочкой, или наоборот. Взаимодействие такого ансамбля наночастиц приводит к появлению островковой структуры из серебра на частице CdS, причем образование соединения акантита Ag<sub>2</sub>S на границе двух фаз (CdS-Ag) минимально. В стеклах синтез квантовых точек CdS происходит в результате термообработки вблизи температуры стеклования, а введение серебра осуществляется методом низкотемпературного ионного обмена. Целью работы было исследование влияния серебряного ионного обмена на рост наночастиц CdS. В данной работе были исследованы два стекла – без CdS (стекло 1) и с CdS (стекло 2), которые были подвергнуты ионному обмену при  $T=320$  °C в течение 10, 20 и 30 минут и последующей термообработке при температурах 410 и 420 °C. Для стекла 1 после проведения ионного обмена возникает интенсивная люминесценция в области 400–500 нм, а после термообработки наблюдается поверхностный плазмонный резонанс на  $\lambda=410$  нм. Для стекла 2 после проведения ионного обмена наблюдаются изменение спектров поглощения, характерное для формирования акантита, и слабая люминесценция, сдвигающаяся в длинноволновую область (от 550 до 700 нм) при проведении ионного обмена и термообработки, что свидетельствует о росте квантовых точек CdS. Экспериментально показано, что для стекла 2 без ионного обмена, содержащего квантовые точки CdS, кватовый выход увеличивается до 70%, в то время как стекло с серебром имеет резкое уменьшение квантового выхода до 0%. Это уменьшение обусловлено формированием на поверхности квантовой точки CdS акантита Ag<sub>2</sub>S.

### Ключевые слова

молекулярные кластеры серебра, наночастицы CdS, ионный обмен, фторфосфатные стекла.

### Благодарности

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке Российского научного фонда (Соглашение № 14-23-00136).

## INTERACTION OF SILVER MOLECULAR CLUSTERS, INTRODUCED BY LOW-TEMPERATURE ION EXCHANGE METHOD, WITH NANOPARTICLES OF CdS IN FLUORINE PHOSPHATE GLASSES

N.D. Grazhdanov<sup>а</sup>, E.V. Kolobkova<sup>а</sup>, Zh.O. Lipatova<sup>а</sup><sup>а</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: nikolai-grazhdanov@yandex.ru

### Article info

Received 19.05.15, accepted 27.07.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-5-856-862

Article in Russian

**For citation:** Grazhdanov N.D., Kolobkova E.V., Lipatova Zh.O. Interaction of silver molecular clusters, introduced by low-temperature ion exchange method, with nanoparticles of CdS in fluorine phosphate glasses. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 5, pp. 856–862.

### Abstract

Glasses with metallic and semi-conductive nano-particles appear to be perspective non-linear and luminescent materials of photonics. It was shown in theory that composite optical materials containing semi-conductive CdS-core with Ag shell (or vice versa) are optimal for enhancement of non-linear Kerr effect. Interaction of such an ensemble of particles leads to the

forming of Ag island structures on the CdS particle, and formation of acanthite  $\text{Ag}_2\text{S}$  on the two phases border (CdS-Ag) is minimal. In glasses synthesis of CdS quantum dots occurred due to thermal treatment close to glass transition temperature; introduction of silver was realized by low-temperature ion exchange (LIE). The main object of this work is investigation of  $\text{Ag}^+$ -LIE effect on the growth of CdS nano-particles. Two glasses were explored in this work: without CdS (glass 1) and with CdS (glass 2), processed by LIE at the temperature of 320°C for 10, 20 and 30 minutes and subsequent heat treatment at temperatures of 410°C and 420°C. In case of glass 1, intensive luminescence appears as a result of LIE, and subsequent heat treatment results in surface resonance at  $\lambda=410$  nm. In case of glass 2, absorbance spectra change appears that is specific for formation of acanthite and weak luminescence shifting to long-wavelength region (from 550 to 700 nm) as a result of applying LIE and heat treatment. It indicates the growth of CdS quantum dots. Experiment has shown that quantum efficiency increases to 70% for glass 2 containing CdS quantum dots without LIE, while glass that contains silver shows steep decrease of quantum efficiency to 0%. That decrease is caused by formation of acanthite  $\text{Ag}_2\text{S}$  on the surface of CdS quantum dot.

#### Keywords

silver molecular clusters, CdS nanoparticles, ion exchange, fluorine phosphate glasses.

#### Acknowledgements

This work was financially supported by the Russian Scientific Foundation (Agreement No. 14-23-00136).

### Введение

В связи с развитием мощных лазерных технологий металлические и полупроводниковые наночастицы привлекают значительное внимание исследователей. Полупроводниковые наночастицы в стеклах рассматриваются как перспективный нелинейный оптический материал, так как они обладают высокой оптической восприимчивостью третьего порядка. Однако для практического применения их нелинейно-оптический отклик слишком мал. В работах [1, 2] показано, что нелинейно-оптический отклик ( $\chi^3$  и добротность) можно значительно на несколько порядков усилить за счет поверхностного плазмонного резонанса (ППР), возникающего при одновременном создании металлических и полупроводниковых наночастиц в стеклах. Предполагается, что феномен оптического усиления возникает при создании сферического композитного материала, состоящего из полупроводникового ядра с металлической оболочкой, и наоборот.

Особый интерес представляет композит CdS-Ag. Квантовые точки (КТ) сульфида кадмия (CdS) имеют значительный нелинейный отклик благодаря экситонному резонансу, в то время как серебро среди всех металлов имеет наиболее выраженный резонанс Ми. В литературе предложены различные методы получения покрытия наночастиц CdS серебряной оболочкой: метод расплава/закалки [3] и техника осаждения. Показано, что нанокompозиты, содержащие металлическую оболочку, имеют высокую внутреннюю нелинейно-оптическую бистабильность [4]. Также молекулярные кластеры (МК) и КТ на основе широкозонных полупроводников, таких как CdS, обладают люминесцентными свойствами в видимой и ближней инфракрасной областях спектра.

В [5] были обсуждены особенности синтеза в жидкой среде и оптические параметры наночастицы CdS с серебряной оболочкой. Было показано, что на поверхности CdS формируется островковая структура из серебра, но не исключается возможность появления промежуточной фазы – акантита  $\text{Ag}_2\text{S}$ .

Для ответа на вопрос, как взаимодействуют два ансамбля полупроводниковых и металлических наночастиц, были синтезированы два стекла: стекло 1 – исходное, не содержащее CdS, и стекло 2, содержащее CdS. На стеклах 1 и 2 был проведен ионный обмен. Для анализа оптических свойств стекол были измерены спектры поглощения, люминесценции и квантового выхода. Целью настоящей работы являлось исследование взаимодействия серебра, введенного методом низкотемпературного ионного обмена, и полупроводниковых наночастиц CdS во фторфосфатном стекле системы  $0,5\text{P}_2\text{O}_5-0,25\text{Na}_2\text{O}-0,1\text{Ga}_2\text{O}_3-0,05\text{AlF}_3-0,04\text{ZnF}_2-0,05\text{NaF}$ , активированном  $0,01\text{CdS}$ .

### Метод и эксперимент

В качестве основы для создания стекла была выбрана фторфосфатная система  $0,5\text{P}_2\text{O}_5-0,25\text{Na}_2\text{O}-0,1\text{Ga}_2\text{O}_3-0,05\text{AlF}_3-0,04\text{ZnF}_2-0,05\text{NaF}$ , активированная  $0,01\text{CdS}$ . В исследуемой системе получают однородные стекла, обладающие высокой прозрачностью в ближней ультрафиолетовой (УФ) и видимой областях спектра. Выбор фторфосфатной матрицы обусловлен ее высокой химической и термической стабильностью, а также возможностью введения высоких концентраций различных активаторов в сравнении с силикатными матрицами [6].

Для синтеза стекол применялись материалы марки х.ч. и ос.ч., выпускаемые отечественной химической промышленностью<sup>1</sup>.

Взвешивание компонентов шихты проводилось на технических весах ВКЛТ-500 (точность  $\pm 0,01$  г). Варка стекол проводилась в электрической лабораторной печи с силитовыми нагревателями,

<sup>1</sup> ГОСТ 13867-68. Продукты химические. Обозначение чистоты. Введ. 01.01.1969. М.: Изд-во стандартов, 1989. 7 с.

обеспечивающими нагрев рабочей зоны до 1450 °С. Варка стекол осуществлялась в воздушной атмосфере при температуре 950 °С в стеклоглеродном варочном комплекте по схеме «тигель в тигель». После выработки расплава стекломассы между двумя стеклоглеродными пластинами и получения плоского образца с толщиной 1–2 мм образцы отжигались в муфельной печи для снятия термических напряжений при температуре 320 °С.

Серебро вводилось в стекла методом низкотемпературного ионного обмена (НИО) в течение 10, 20 и 30 мин при температуре 320 °С из расплава  $0,95\text{NaNO}_3+0,05\text{AgNO}_3$ .

Характеристические температуры для вторичной термообработки (ТО) стеклокерамики были определены при анализе кривой дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Измерения и математическая обработка данных проводились на дифференциальном сканирующем калориметре STA 449F1 Jupiter фирмы Netzsche.

Формирование наночастиц  $\text{CdS}_n$  и серебра достигалось с помощью вторичной ТО стекла в течение 20 мин при температуре 410 и 420 °С (вблизи температуры стеклования  $T_g$ ). Такая обработка позволяет создать относительно большую объемную долю наноразмерных кристаллов и кластеров. Для вторичной ТО образцов использовалась программируемая муфельная печь Nabertherm N11/2. Исходные и подвергнутые вторичной ТО стекла были отшлифованы и отполированы.

Измерение спектров поглощения осуществлялось на спектрофотометре Lambda 650 марки Perkin Elmer Precisely в диапазоне 250–800 нм с шагом 0,5 нм и временем интегрирования 0,2 с. Спектральные измерения люминесценции (300–900 нм) проводились на спектрофлуориметре MPF-44A (Perkin Elmer) с шагом 0,5 нм. Кинетика затухания люминесценции измерялась с помощью лазера Solar Laser Systems LQ 529 В на длине волны возбуждения 410 нм, монохроматора (длина волны 620 нм), фотоэлектронного умножителя и подключенного на выходе осциллографа.

Квантовый выход был измерен с помощью установки Absolute PL Quantum Yield Measurement System на длинах волн возбуждения 250, 360 и 405 нм. Все измерения проводились при комнатной температуре.

### Результаты и обсуждение

Характеристические температуры для обоснования температурно-временного режима получения стеклокерамики были определены на основании данных, полученных при анализе кривой ДСК. Термограммы исследуемых образцов представлены на рис. 1. Температуры стеклования для обоих стекол совпали и равны 400 °С. Температура ТО стекла для формирования серебряных и полупроводниковых наночастиц была выбрана вблизи  $T_g$  и составила 410 °С.

Проведение НИО и ТО стекла 1 приводит к заметным изменениям в его оптических характеристиках (рис. 2). После проведения НИО в течение 10 мин в спектре стекла наблюдается заметное увеличение поглощения в области длин волн ниже 300 нм, что можно связать с вхождением в сетку стекла ионов и нейтральных атомов серебра [7], а также, учитывая сильные восстановленные условия синтеза, МК серебра. Проведение ТО в течение 20 мин приводит к возникновению полосы ППП с  $\lambda_{\text{макс}}=410$  нм. Согласно модифицированной формуле Друде–Ми [8], размер наночастиц серебра равен 4 нм.

Для анализа влияния серебра на рост наночастиц CdS стекло 2 было подвергнуто тем же процедурам, что и исходное. Введение в состав стекла 1 полупроводниковой компоненты CdS приводит к сдвигу УФ границы пропускания в сторону больших длин волн (250 нм → 300 нм), что связано с формированием МК CdS [9]. В результате НИО происходит значительный рост поглощения, и появляется полоса поглощения с  $\lambda_{\text{макс}}=320$  нм, обусловленная формированием МК серебра [10]. Проведение ТО приводит к резкому сдвигу границы пропускания в длинноволновую область, однако структурированный спектр, характерный для КТ, не возникает.

Для более ясного понимания процессов, происходящих под действием ТО, стекло 2 без НИО было подвергнуто ТО при температуре 420 °С в течение 20 мин (рис. 2, б), что привело к возникновению дискретного спектра с разрешенными переходами, связанными с формированием КТ. На основании анализа положения первого возбужденного уровня (соответствующая длина волны возбужденного уровня  $\lambda_{\text{exc}}=415$  нм или 3,0 эВ) и работы [11] был рассчитан размер КТ, равный 2,5 нм. Сравнение спектров стекла 2, подвергнутого одинаковой ТО до и после НИО, показывает значительные различия, что свидетельствует об изменениях в структуре сформированных наночастиц. Эти отличия могут быть связаны со стимуляцией формирования МК и КТ серебряными наночастицами, а отсутствие дискретной составляющей в спектре после ионного обмена может быть обусловлено большим разбросом КТ по размерам в области НИО. Другим объяснением трансформации спектра поглощения является возможность формирования новой фазы на границе полупроводник-металл – акантита  $\text{Ag}_2\text{S}$ . Согласно [12], частицы  $\text{Ag}_2\text{S}$ , показывают длинный хвост поглощения, покрывающий весь видимый диапазон спектра. Для уточнения версий, объясняющих наблюдаемые изменения, были измерены спектры люминесценции.

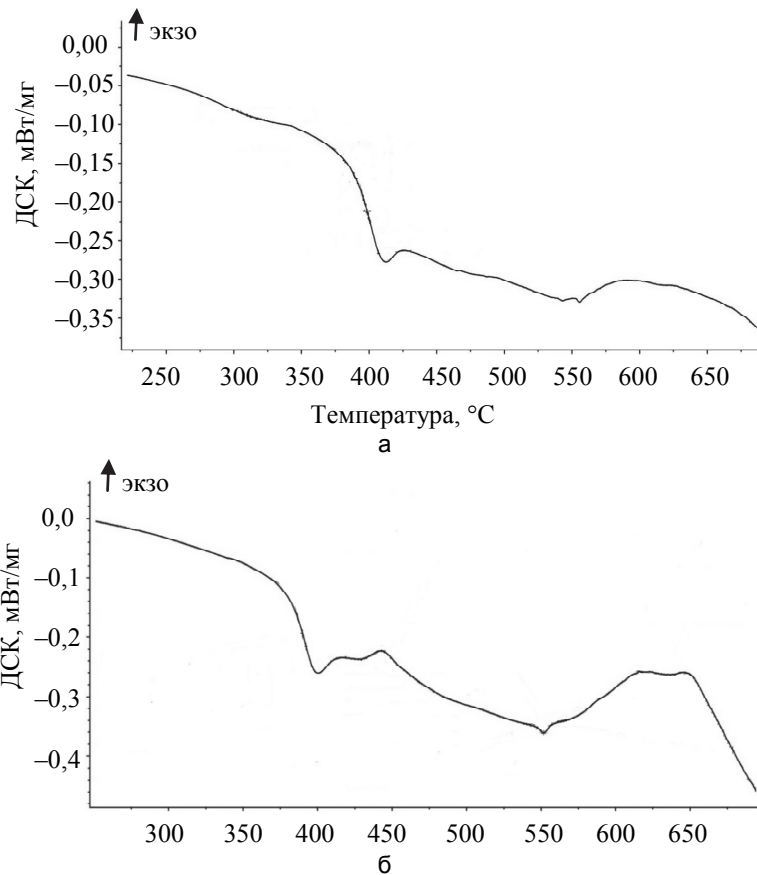


Рис. 1. Дифференциальная сканирующая калориметрия стекла 1 (а) и стекла 2 (б), «экзо» указывает направление экзотермической реакции

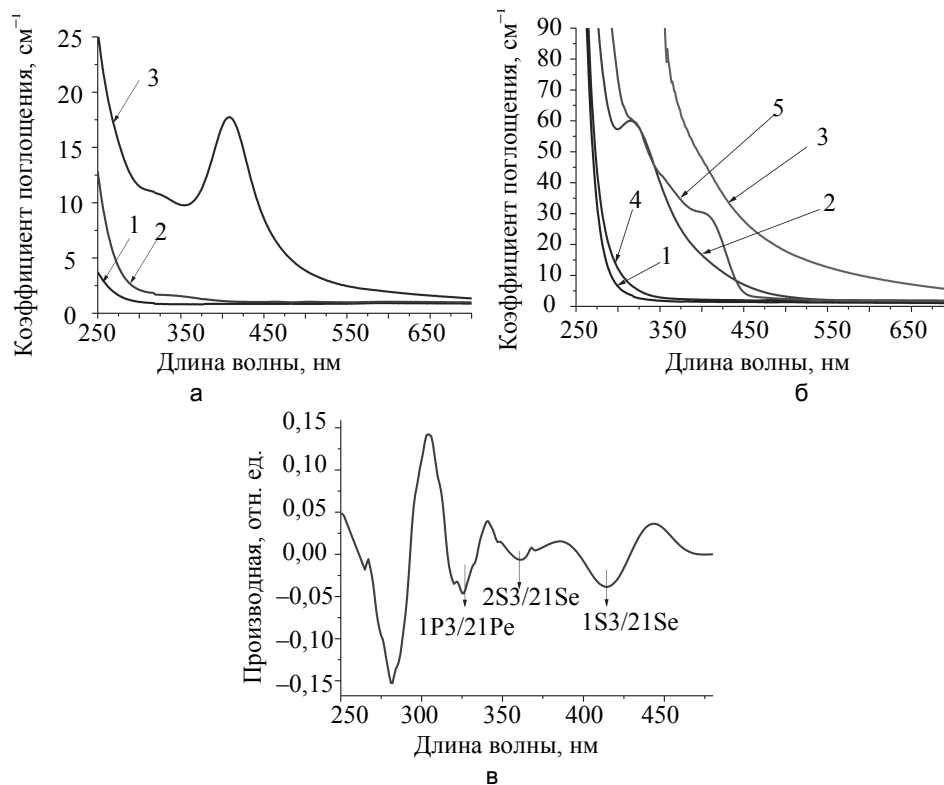


Рис. 2. Спектры поглощения стекла 1 (а): исходное (1), после ионного обмена (2) и после ионного обмена и термообработки (3); стекла 2 (б): исходное (1), после ионного обмена (2), после ионного обмена и термообработки (3), после термообработки без ионного обмена (4) и после термообработки при  $T=420\text{ }^{\circ}\text{C}$  (5). Вторая производная кривой (в) (обозначения указывают вид перехода  $1S3/21Se$ ,  $2S3/21Se$  и  $1P3/21Pe$  [13])

Рассмотрим спектры люминесценции для стекла 1 и 2, представленные на рис. 3. Исходное стекло 1 не обладало собственной люминесценцией. В результате проведения НИО возникает сильная люминесценция, обусловленная люминесценцией МК  $Ag_{1-4}$  [14], которая характеризуется полосой с  $\lambda_{\text{макс}}=450$  нм. В результате ТО в течение 20 мин появляется полоса с  $\lambda_{\text{макс}}=475$  нм, свидетельствующая о росте более крупных кластеров ( $n=5-7$ ).

Стекло 2 характеризуется полосой люминесценции  $\lambda_{\text{макс}}=500$  нм, которая в результате проведения НИО сдвигается до  $\lambda_{\text{макс}}=580$  нм. Следует отметить, что наблюдаемая люминесценция в диапазоне 500–600 нм соответствует полупроводниковым МК CdS [15].

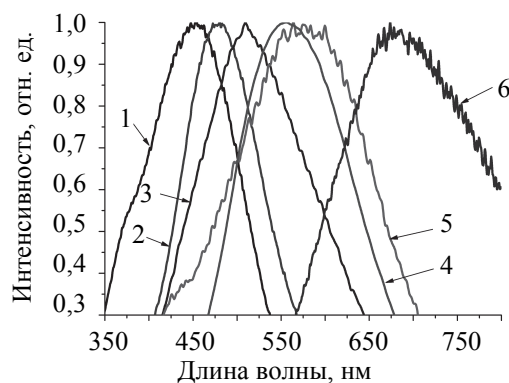


Рис. 3. Спектры люминесценции стекла 1: после ионного обмена (1), после ионного обмена и термообработки (2); стекла 2: исходного (3), после ионного обмена и термообработки (4), после ионного обмена (5), после термообработки при  $T=420$  °С (6)

ТО стекла 2 при 420 °С в течение 20 мин (без НИО) приводит к появлению полосы люминесценции с максимумом интенсивности на 675 нм, равной 1,84 эВ, что соответствует люминесценции КТ CdS. Стоксов сдвиг люминесценции составил 1,15 эВ, что позволяет предположить преимущественно ловушечный характер люминесценции, связанный с поверхностными дефектами КТ. Время жизни люминесценции для КТ CdS составило 160 мкс, что подтверждает переход люминесценции с ловушечных состояний.

Для стекол 1, 2 после НИО и ТО был оценен квантовый выход (рис. 5). Для стекла, которое содержит КТ CdS, характерно увеличение квантового выхода с 40% до 70% при увеличении длины волны возбуждения с 250 нм до 405 нм, что позволяет его использовать в качестве люминофоров. Уменьшение квантового выхода до 0% при возбуждении 405 нм для стекол после проведения НИО обусловлено взаимодействием наночастиц серебра с МК CdS. Резкое уменьшение квантового выхода склоняет к версии, что на поверхности наночастиц серебра образуется акантит, что приводит к процессу химического тушения (chemical damping) ППР [16]. Различия в значениях квантового выхода на порядок для стекол с КТ и МК характерны для этих нанобразований.

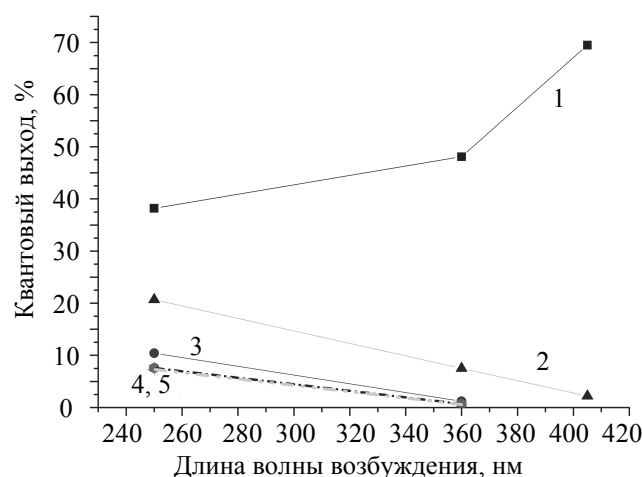


Рис. 5. Зависимость квантового выхода от длины волны возбуждения. Стекло 2 после термообработки при  $T=410$  °С (1); стекло 1 после ионного обмена в течение 10 мин и термообработки – 20 мин (2); стекло 2 после ионного обмена в течение 10 мин (3); стекло 2 после ионного обмена в течение 20 и 30 мин (4) и (5) соответственно

Таким образом, спектры люминесценции показывают, что при температуре  $T = 410^\circ\text{C}$  при выбранных временах КТ не формируются. Происходит рост МК CdS. Это происходит, потому что формируется наноккомпозит CdS-Ag<sub>2</sub>S, который имеет соответствующий профиль поглощения, близкий к наблюдаемому на рис. 2, б, кривая 3.

### Заключение

Были исследованы фторфосфатные стекла с наночастицами CdS и с молекулярными кластерами Ag, введенными в результате проведения низкотемпературного ионного обмена.

В результате ионного обмена в стекле 1 формируются молекулярные кластеры Ag<sub>1-4</sub>, а после термообработки – металлические Ag-наночастицы. Проведение ионного обмена и термообработки в стекле 2 приводит к формированию кластеров CdS, связанных с кластерами и наночастицами серебра через промежуточное соединение Ag<sub>2</sub>S. Данное взаимодействие приводит к формированию акантита, который способствует резкому уменьшению квантового выхода при увеличении длины волны возбуждения.

### References

1. Fisher G.L., Boyd R.W., Gehr R.J., Jenekhe S.A., Osaheni J.A., Sipe J.E., Weller-Brophy L.A. Enhanced nonlinear optical response from composite materials. *Physical Review Letters*, 1995, vol. 74, no. 10, pp. 1871–1874. doi: 10.1103/PhysRevLett.74.1871
2. Kalyaniwalla N., Haus J.W., Inguva R., Birnboim M.H. Intrinsic optical bistability for coated spheroidal particles. *Physical Review A*, 1990, vol. 42, no. 9, pp. 5613–5621. doi: 10.1103/PhysRevA.42.5613
3. Ko M.-J., Plawsky J., Birnboim M. Fabrication of CdS/Ag hybrid quantum dot composites using a melt/quench method. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1996, vol. 203, pp. 211–216. doi: 10.1016/0022-3093(96)00484-X
4. Neuendorf R., Quinten M., Kreibig U. Optical bistability of small heterogeneous clusters. *Journal of Chemical Physics*, 1996, vol. 104, no. 16, pp. 6348–6354.
5. Rocco F., Jain A.K., Treguer M., Cardinal T., Yotte S., Le Coustumer P., Lee C.Y., Park S.H., Choi J.G. Optical response of silver coating on CdS colloids. *Chemical Physics Letters*, 2004, vol. 394, no. 4–6, pp. 324–328. doi: 10.1016/j.cplett.2004.07.022
6. Kolobkova E.V., Nikonorov N.V., Aseev V.A. Optical technologies silver nanoclusters influence on formation of quantum dots in fluorine phosphate glasses. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 5 (81), pp. 1–5. (In Russian)
7. Wang P.W. Formation of silver colloids in silver ion-exchanged soda-lime glasses during annealing. *Applied Surface Science*, 1997, vol. 120, no. 3–4, pp. 291–298.
8. Hovel H., Fritz S., Hilger A., Kreibig U., Vollmer M. Width of cluster plasmon resonances: bulk dielectric functions and chemical interface damping. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 1993, vol. 48, no. 24, pp. 18178–1818. doi: 10.1103/PhysRevB.48.18178
9. Kolobkova E.V., Kukushkin D.S., Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Shakhverdov T.A. Luminescent properties of fluorophosphate glasses with molecular cadmium selenide clusters. *Optics and Spectroscopy (English translation of Optika i Spektroskopiya)*, 2015, vol. 118, no. 2, pp. 224–228. doi: 10.1134/S0030400X15020101
10. Zheng W., Kurobori T., Miyamoto Y., Nanto H., Yamamoto T. Formation and assignment of silver defect centers in phosphate glass induced by femtosecond laser pulses. *Radiation Measurements*, 2011, vol. 46, no. 12, pp. 1402–1405. doi: 10.1016/j.radmeas.2011.01.004
11. Martin J.L., Riera R., Cruz S.A. Confinement of excitons in spherical quantum dots. *Journal of Physics Condensed Matter*, 1998, vol. 10, no. 6, pp. 1349–1361. doi: 10.1088/0953-8984/10/6/017
12. Hota G., Jain S., Khilar K.C. Synthesis of CdS-Ag<sub>2</sub>S core-shell/composite nanoparticles using AOT/n-heptane/water microemulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2004, vol. 232, no. 2–3, pp. 119–127. doi: 10.1016/j.colsurfa.2003.10.021
13. Norris D.J., Bawendi M.G. Measurement and assignment of the size-dependent optical spectrum in CdSe quantum dots. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 1996, vol. 53, no. 24, pp. 16338–16346.
14. Loginov E., Gomez L.F., Chiang N., Halder A., Guggemos N., Kresin V.V., Vilesov A.F. Photoabsorption of AgN (N~6-6000) nanoclusters formed in helium droplets: transition from compact to multicenter aggregation. *Physical Review Letters*, 2011, vol. 106, no. 23, art. 233401. doi: 10.1103/PhysRevLett.106.233401
15. Kolobkova E.V., Kukushkin D.S., Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Shakhverdov T.A. Luminescent properties of molecular clusters (CdS)<sub>n</sub> in fluorophosphate glass. *Glass Physics and Chemistry*, 2015, vol. 41, no. 1, pp. 104–107. doi: 10.1134/S1087659615010149
16. Persson B.N.J. Polarizability of small spherical metal particles: influence of the matrix environment. *Surface Science*, 1993, vol. 281, no. 1–2, pp. 153–162. doi: 10.1016/0039-6028(93)90865-H

- Гражданов Николай Дмитриевич* – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, nikolai-grazhdanov@yandex.ru
- Колобкова Елена Вячеславовна* – доктор химических наук, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Kolobok106@rambler.ru
- Липатова Жанна Олеговна* – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, zluka\_yo@mail.ru
- Nikolai D. Grazhdanov* – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, nikolai-grazhdanov@yandex.ru
- Elena V. Kolobkova* – D.Sc., Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Kolobok106@rambler.ru
- Zhanna O. Lipatova* – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, zluka\_yo@mail.ru