

УДК 661.8...5; 538.971

## АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ОКИСЛЕНИЯ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ СУЛЬФИДОВ СВИНЦА И КАДМИЯ

***Е.В. Мараева, А.И. Максимов, Л.Б. Матюшкин,  
В.А. Мошников, А.А. Шупта***

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
РФ 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5  
тел.: +7(812) 346-44-87; e-mail: jenvmar@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.19.018

Заключение совета рецензентов: 01.10.15 Заключение совета экспертов: 15.10.15 Принято к публикации: 23.10.15

Работа посвящена получению и исследованию слоев на основе сульфида свинца и кадмия. Проведен термодинамический анализ системы Pb–S–O, Cd–S–O. Показано, что при окислении сульфида свинца возможно появление нанообразований чистого свинца, а при окислении сульфида кадмия наиболее вероятными оксидными фазами являются CdO и CdSO<sub>4</sub>. Методом рентгеновского фазового анализа установлено, что в процессе термообработки слоев при температуре 200 °С происходит перекристаллизация сульфида кадмия, что согласуется с данными атомно-силовой микроскопии. Результаты исследования могут быть использованы для создания фотоизлучателей и фотоприемников, работающих при комнатной температуре.

Ключевые слова: тонкие пленки, сульфид свинца, сульфид кадмия, окисные пленки, халькогениды.

## THE STUDY OF OXIDIZING FEATURES IN LEAD SULPHIDE – CADMIUM SULPHIDE LAYERS

***E.V. Maraeva, A.I. Maximov, L.B. Matyushkin, V.A. Moshnikov, A.A. Shupta***

Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI” named after V.I. Ulyanov (Lenin)  
5 Prof. Popov st., Saint-Petersburg, 197376 Russian Federation  
ph.: +7(812) 346-44-87, e-mail: jenvmar@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.19.018

Referred 1 October 2015 Received in revised form 15 October 2015 Accepted 23 October 2015

The study is dedicated to obtaining and investigation of lead sulphide – cadmium sulphide based layers. The paper data of thermodynamical analyses of Pb–S–O, Cd–S–O system are reported. It is shown that in case of lead sulphide oxidizing the appearance of Pb nanoparticles is possible; in case of cadmium sulphide oxidizing, the most probable oxygen phases are CdO and CdSO<sub>4</sub>. With the use of X-ray analyses, it is determined that during the annealing of the layers at T = 200° recrystallization of cadmium sulphide takes place that has correlation with atomic force microscopy data. The results can be used for producing photosensitive devices and LEDs operating at room temperature.

Keywords: thin film, lead sulfide, cadmium sulfide, oxide film, chalcogenides.



Мараева Евгения Владимировна  
Evgeniya V. Maraeva

**Сведения об авторе:** канд. физ.-мат. наук, ассистент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

**Образование:** Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

**Область научных интересов:** нанодиагностика, тонкие пленки, халькогениды, металлооксиды, пористые материалы

**Публикации:** 28.

**Information about the author:** PhD (physics and mathematics), teaching assistant, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI".

**Education:** Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI".

**Research area:** nanodiagnostics, thin film technology, chalcogenides, metal oxides, porous materials.

**Publications:** 28.



Максимов Александр Иванович  
Alexander I. Maximov

**Сведения об авторе:** канд. физ.-мат. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

**Образование:** Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

**Область научных интересов:** физическая химия микро- и наносистем.

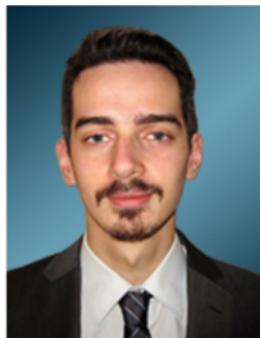
**Публикации:** 39.

**Information about the author:** PhD (physics and mathematics), docent, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI".

**Education:** Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI".

**Research area:** physical chemistry of micro- and nanosystems.

**Publications:** 39.



Матюшкин Лев Борисович  
Lev B. Matyushkin

**Сведения об авторе:** ассистент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

**Образование:** Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

**Область научных интересов:** нанодиагностика, коллоидные квантовые точки.

**Публикации:** 29.

**Information about the author:** teaching assistant, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI".

**Education:** Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI".

**Research area:** nanodiagnostics, colloidal quantum dots.

**Publications:** 29.



Вячеслав Алексеевич Мошников  
Vyacheslav A. Moshnikov

**Сведения об авторе:** д-р физ.-мат. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

**Образование:** Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

**Область научных интересов:** нанодиагностика, нанотехнология, узкозонные полупроводники.

**Публикации:** 319.

**Information about the author:** DSc (physics and mathematics), professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI".

**Education:** Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI".

**Research area:** nanodiagnostics, nanotechnology, narrow-gap semiconductors.

**Publications:** 319.





Шупта Анастасия Александровна  
Anastasiya A. Shupta

**Сведения об авторе:** студент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

**Образование:** Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

**Область научных интересов:** нанодиагностика, халькогениды.

**Публикации:** 2.

**Information about the author:** student, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI".

**Education:** Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI".

**Research area:** nanodiagnostics, chalcogenides.

**Publications:** 2.

## Введение

Слои на основе халькогенидов свинца и кадмия традиционно используются для создания фотоизлучателей и фотоприемников, работающих в неохлаждаемом режиме и обладающих высоким быстродействием, малым энергопотреблением и небольшими габаритно-весовыми параметрами [1]. Сульфид свинца – типичный представитель класса соединений  $A^{IV}B^{VI}$ , являющийся узкозонным материалом с шириной запрещенной зоны 0,41 эВ [2]. Кристаллы PbS обладают кубической гранцентрированной решеткой типа NaCl. Сульфид кадмия – представитель класса соединений  $A^{II}B^{VI}$  – является широкозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 2,42 эВ при 300 К [3]. Это свойство CdS используется в оптоэлектронике: как в фотоприёмниках, так и в солнечных батареях. Сульфид кадмия кристаллизуется как в структуре цинковой обманки (сфалерит), так и в структуре вюрцита.

Известно, что для получения фоточувствительности и фотолюминесценции соединения на основе халькогенидов свинца и кадмия подвергаются термообработке в кислородосодержащей атмосфере [4–7]. В связи с этим задача предварительного термодинамического анализа систем Pb–S–O, Cd–S–O представляется актуальной.

## Теоретическая часть

Для анализа процессов окисления слоев на основе сульфида свинца была составлена и обработана система уравнений химических реакций, которая характеризует все возможные фазовые равновесия для системы Pb–S–O. Большинство исследователей, начиная с В.П. Зломанова [8], склоняются к мнению, что фоточувствительность и фотолюминесценция в структурах на основе селенида свинца проявляются при образовании селенитных фаз. Получение той или иной оксидной фазы зависит от термодинамических и кинетических условий окисления, а также отклонения от стехиометрии исходного материала. Например, в работе [9] показано, что оксидная фаза с составом, близким к PbO, должна получаться для фаз селенида свинца с избытком металла, а PbSeO<sub>3</sub> – для фаз с составом,

близким к стехиометрии по соотношению «металл – неметалл». В случае сульфида свинца наиболее вероятно образующейся фазой является PbSO<sub>4</sub>, в некоторых источниках указывается, что наряду с образованием оксида при отжиге может появляться и чистый свинец [10].

Диаграммы парциальных давлений для системы Pb–S–O были построены в координатах  $\lg(P(SO_2))$  от  $\lg(P(O_2))$  следующим образом. Пространство координат разбивалось равномерной сеткой на N<sub>2</sub> точек. В каждой точке определялась совокупность значений изменения свободной энергии Гиббса как функция от температуры  $\Delta G_i(T)$  для всех возможных химических реакций, и вычислялось минимальное значение, соответствующее одному из заданных химических уравнений, а значит, определенному продукту реакции. Совокупность точек, для которых из всех реакций одна и та же обладает минимальным значением  $\Delta G_i(T)$ , образует область парциальных давлений, для которой при данной температуре продукт этой реакции является наиболее устойчивым. На рис. 1–3 приведены диаграммы парциальных давлений и составы сосуществующих фаз в системе Pb–S–O. Справочные данные для расчёта были взяты из [11, 12].

Расчеты проводились с учетом следующих зависимостей:

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p^0 dT,$$

$$\Delta S_T^0 = \Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T \frac{\Delta C_p^0}{T} dT,$$

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_{298}^0 - T\Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p^0 dT - \int_{298}^T \frac{\Delta C_p^0}{T} dT.$$

На диаграммах (см. рис. 1–3) видны точки невариантного трехфазного равновесия, которые реализуются при определенных давлениях газообразных компонентов. На рисунках видно, что при изменении температуры точки трехфазного равновесия смещаются. При температуре около 200 °С будет наблю-

даться точка, где в равновесии находятся сразу четыре твердые фазы. Можно проследить, что при повышении температуры точка трехфазного равновесия PbS–Pb–PbO превращается в точку трехфазного равновесия PbS–Pb–PbO·PbSO<sub>4</sub>.

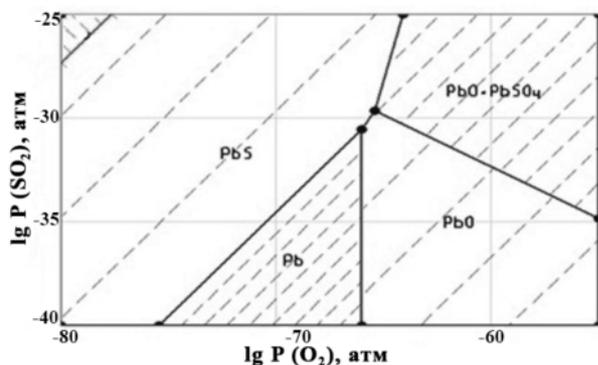


Рис. 1. Диаграмма парциальных давлений и составы сосуществующих фаз в системе Pb–S–O при температуре 25 °С

Fig. 1. The diagram of partial pressures and the composition of coexisting phases in Pb-S-O system at T = 25 °C

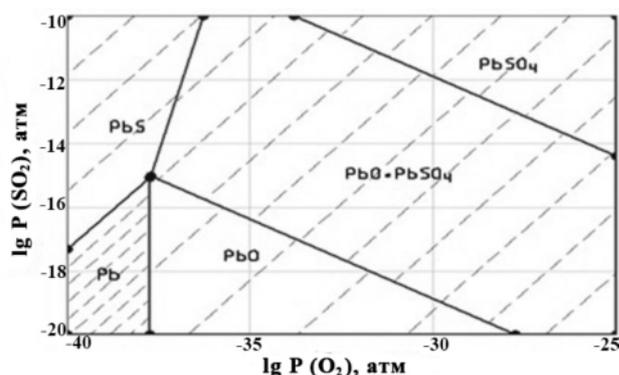


Рис. 2. Диаграмма парциальных давлений и составы сосуществующих фаз в системе Pb–S–O при температуре 200 °С

Fig. 2. The diagram of partial pressures and the composition of coexisting phases in Pb-S-O system at T = 200 °C

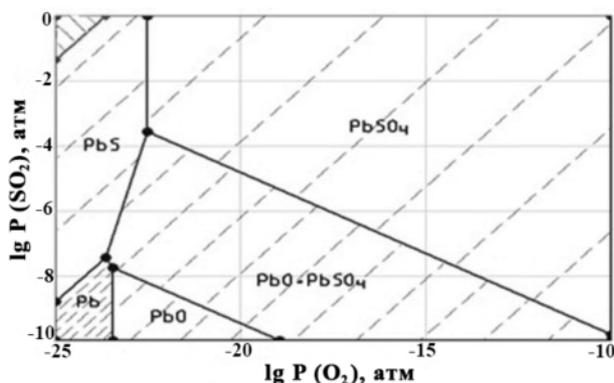


Рис. 3. Диаграмма парциальных давлений и составы сосуществующих фаз в системе Pb–S–O при температуре 400 °С

Fig. 3. The diagram of partial pressures and the composition of coexisting phases in Pb-S-O system at T = 400 °C

Согласно термодинамическим расчетам, при температурах ниже 200 °С термообработка слоев с небольшим отклонением от стехиометрии приводит к образованию сульфата свинца PbO·PbSO<sub>4</sub> и оксида свинца PbO. В случае значительного отклонения от стехиометрии в сторону избытка свинца возможно также выделение отдельной фазы свинца наряду с образованием оксида свинца PbO.

Повышение температуры обработки (выше 200 °С) слоев даже с незначительным отклонением от стехиометрии приведет, наряду с образованием PbO·PbSO<sub>4</sub>, к выделению свободного свинца Pb на интерфейсе оксидной фазы и зерна PbS.

Результаты термодинамического анализа объясняют экспериментальные данные работы [10], в которой авторы методом фотоэлектронной спектроскопии обнаружили небольшое количество свободного свинца при высоких температурах обработки поликристаллических слоев сульфида свинца наряду с другими предсказываемыми фазами.

Как видно на рис. 1, при низких температурах сульфид свинца находится в сильно неравновесных условиях по отношению к парциальному давлению кислорода (0,21 атм.). Состав оксидного слоя на поверхности сульфида свинца существенно зависит от отклонения от стехиометрии. При значительных концентрациях носителей заряда *n*-типа (избыток свинца) оксидный слой соответствует фазе PbO. При уменьшении отклонения от стехиометрии наблюдаются две оксидные фазы: PbO·PbSO<sub>4</sub> и PbSO<sub>4</sub>. Рисунок 2 отвечает температуре четырехфазного равновесия. При дальнейшем повышении температуры (рис. 3) на поверхности PbS *n*-типа формируется оксид PbO·PbSO<sub>4</sub>. При этом, учитывая кинетику образования оксидного слоя при более низких температурах, на границе интерфейса PbS–PbO протекает реакция:  $PbS + 5PbO = 4Pb + PbO \cdot PbSO_4$ .



Изменения, происходящие в системе, можно качественно проиллюстрировать, обратившись к независимому в данном случае методу – методу триангуля-

ции. На рис. 4 представлены диаграммы сосуществования фаз в системе Pb–S–O, построенные для комнатной температуры (а); для температуры 400 °С (б).

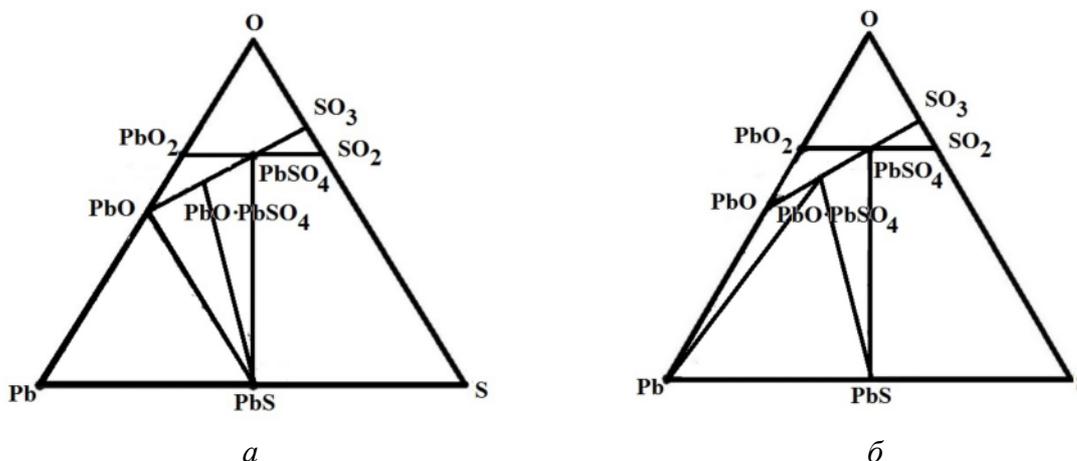


Рис. 4. Диаграмма сосуществоющих фаз в системе Pb-S-O при комнатной температуре (а); при температуре 400 °С (б) (показаны основные квазибинарные разрезы)

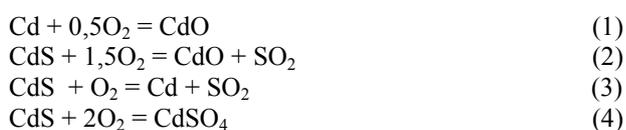
Fig. 4. The diagram of coexisting phases in Pb-S-O system at room temperature (a), at T = 400 °C (b) (the main quasi-binary sections are shown)

Как показал термодинамический расчет, отсутствие термообработки, а также термообработка при температуре ниже 200 °С, в случае слоев с небольшим отклонением от стехиометрии приводит к образованию оксисульфата свинца PbO·PbSO<sub>4</sub> и оксида свинца PbO. В случае значительного отклонения от стехиометрии в сторону избытка свинца вместе с образованием оксида свинца PbO возможно также выделение отдельной фазы свинца Pb.

При температуре выше 200 °С исчезает квазибинарный разрез PbS–PbO и становится возможным разрез Pb–PbO·PbSO<sub>4</sub>, то есть определенное повышение температуры обработки слоев даже с незначительным отклонением от стехиометрии приведет, наряду с образованием PbO·PbSO<sub>4</sub>, к выделению свободного свинца на интерфейсе оксидной фазы и зерна сульфида свинца.

Таким образом, после проведенных расчетов подтверждены наблюдаемые в работе [12] результаты экспериментального обнаружения фазы чистого свинца методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии при окислении сульфида свинца при повышении температуры обработки.

В системе Cd–S–O были рассмотрены и проанализированы следующие реакции:



Термодинамические расчеты показали, что в случае присутствия на пленках выделений металлического кадмия наиболее вероятно протекание процесса образования оксида кадмия по реакции (1). Также вероятно образование сульфата кадмия по реакции (4).

### Эксперимент

В настоящей работе для получения слоев на основе сульфида свинца – сульфида кадмия использовался метод химического осаждения из водных растворов. Были выбраны следующие прекурсоры: ацетат свинца Pb(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>; цитрат натрия Na<sub>3</sub>Cit; хлорид кадмия CdCl<sub>2</sub>; тиомочевина (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CS. Уровень pH регулировали путем добавления водного раствора аммиака NH<sub>4</sub>OH. Осаждение слоев проводилось по технологии, разработанной в Уральском федеральном университете им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина [13].

При исследовании фазового состава нанодисперсных материалов на основе сульфида свинца было установлено, что в случае, когда термообработка не применялась, а также после проведения низкотемпературной обработки, на рентгенограммах присутствуют пики, соответствующие кристаллическому сульфиду свинца PbS и оксисульфату свинца nPbO·PbSO<sub>4</sub>. Проведение обработки при более высоких температурах приводит к выделению кристаллического свинца. Эти данные согласуются с проведенным термодинамическим анализом.

Следует подробнее остановиться на анализе фазового состава слоев, содержащих сульфид кадмия. На рис. 5 и 6 для примера представлены штрих-диаграммы слоя, полученного методом гидрохими-

ческого осаждения из раствора, содержащего соли свинца и кадмия, до и после проведения термообработки в кислородосодержащей среде при  $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 60 минут.

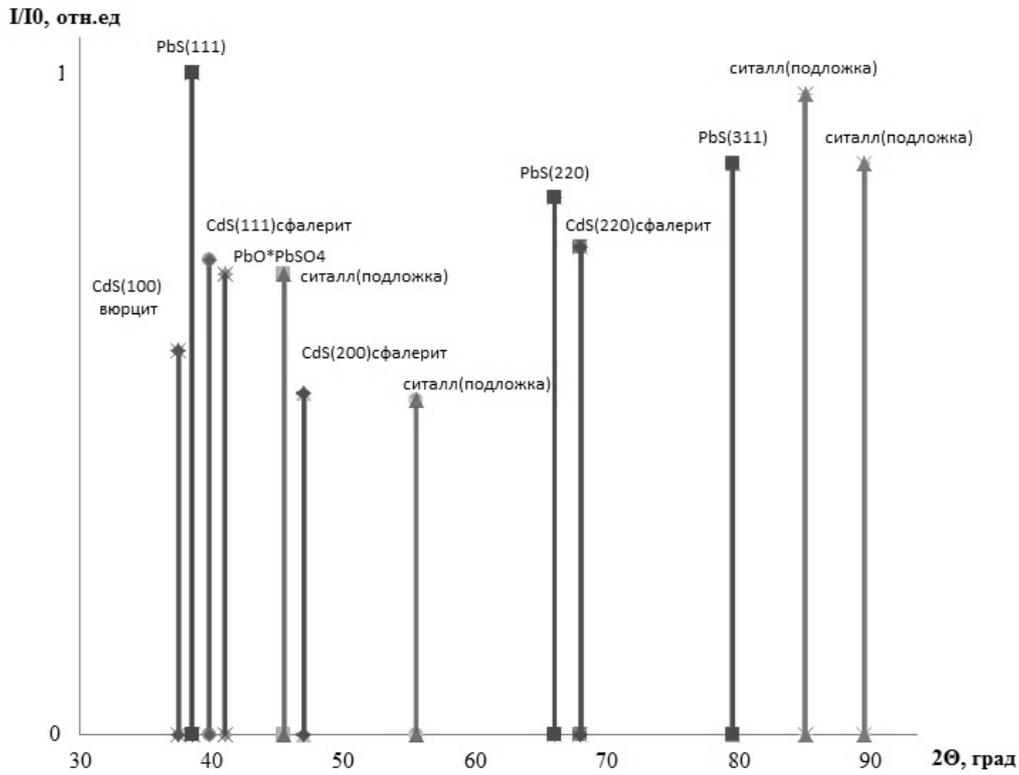


Рис. 5. Штрих-диаграмма слоя PbS–CdS, не прошедшего термообработку  
Fig. 5. The bar chart of PbS–CdS layer which has not been heat treated

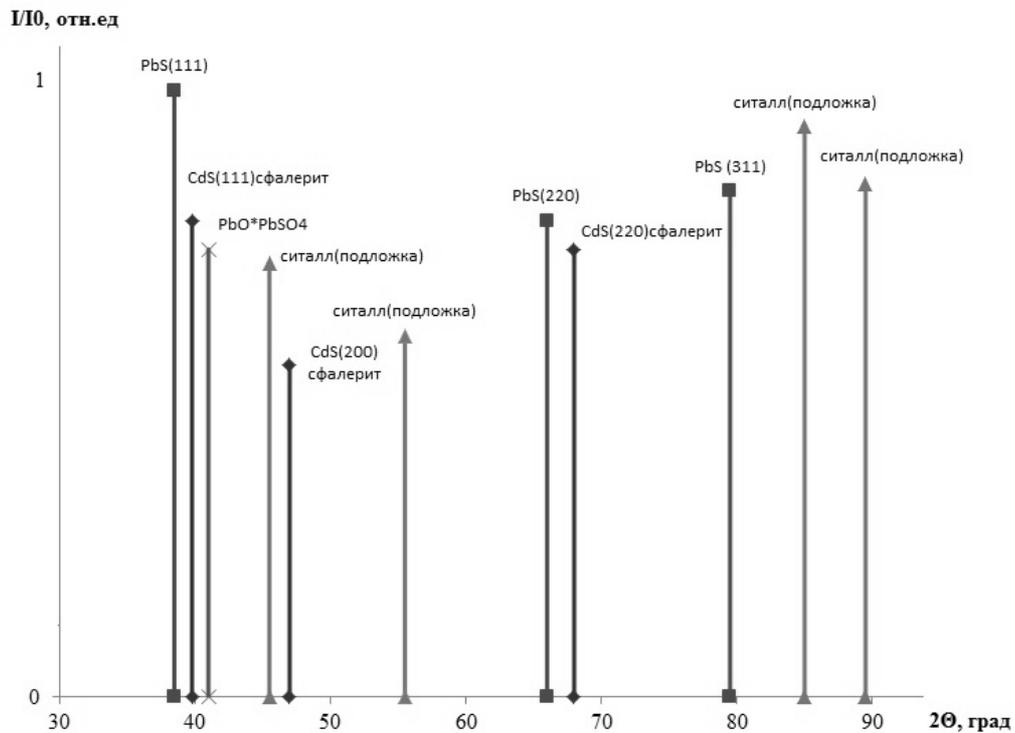


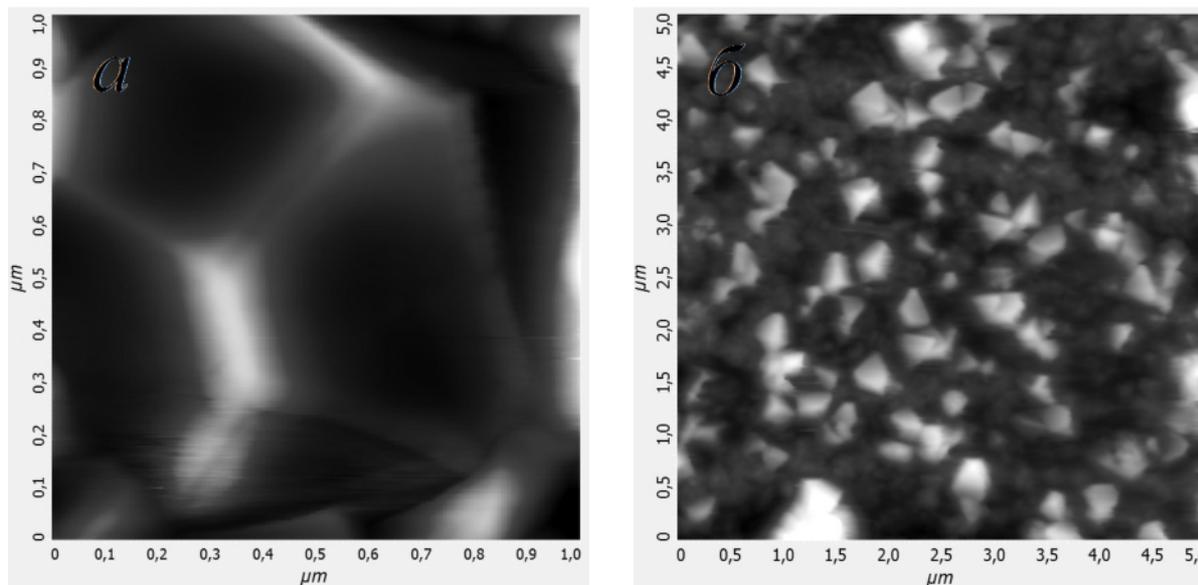
Рис. 6. Штрих-диаграмма слоя PbS–CdS после термообработки при  $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 60$  мин  
Fig. 6. The bar chart of PbS–CdS layer after heat treatment at  $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 60$  minutes



Наличие линий, соответствующих фазам PbS и CdS, говорит о том, что методом гидрохимического осаждения были получены слои PbS и CdS, обладающие кристаллической структурой. Кроме того, зафиксировано наличие сложной оксидной фазы PbO·PbSO<sub>4</sub>. После проведения отжига при  $T = 200$  °C на рентгенограммах исчезают линии, соответствующие кристаллической фазе CdS-вюрцит, что говорит о частичной перекристаллизации сульфида кадмия в

процессе отжига. При этом относительная интенсивность линий, соответствующих фазе CdS-сфалерит, увеличивается. Вместе с тем, в процессе отжига возрастает интенсивность линий, соответствующих окисульфату свинца PbO·PbSO<sub>4</sub>. Оксидные фазы кадмия при данной температуре отжига не наблюдаются.

Результаты, полученные методом рентгеновского фазового анализа, хорошо согласуются с данными атомно-силовой микроскопии (рис. 7).



**Рис. 7.** Атомно-силовая микроскопия поверхности слоёв, полученных в присутствии источника кадмия в исходном водном растворе до (а) и после проведения термообработки (б)  
**Fig. 7.** Atomic force microscopy of the surface layer obtained in the presence of a source of cadmium in the original aqueous solution before (a) and after heat treatment (b)

АСМ-исследование поверхности слоя, полученного из раствора, содержащего источник кадмия, в отдельных случаях показало присутствие кристаллитов гексагональной структуры. После проведения термообработки на поверхности наблюдались отдельно отстоящие кристаллиты пирамидальной формы.

### Заключение

Модельные представления, изложенные в настоящей работе, описывают закономерности образования оксидных фаз на основе халькогенидов свинца и кадмия и могут быть использованы для разработки эффективной технологии получения фоточувствительных слоёв.

Несмотря на равновесный характер термодинамических расчетов, с их помощью была обоснована методика двухстадийной температурной обработки. При этом в случае халькогенидов свинца при низкой температуре создается оксидная прослойка (толщину оксида можно регулировать путем изменения времени отжига). При высокотемпературной обработке на границе между оксидом и халькогенидом свинца происходит образование новых фаз, в этом случае важнейшей чертой является наличие металлических нановыделений,

обеспечивающих эффективную рекомбинацию, во время как сформированный оксидный слой затрудняет диффузию кислорода из внешней среды.

Более того, полученные авторами этой статьи данные были использованы для улучшения быстродействия фотоструктур. Поскольку инерционность фотоприемников зависит от наличия или отсутствия «быстрых состояний» на границе зерна узкозонного полупроводника в виде нанобразований металла [14], для повышения быстродействия технологически важным является создание таких состояний вблизи границы раздела. Термодинамический анализ показал, что на гетерогранице соседствующих фаз возможно формирование металлических нанобразований, которые будут повышать быстродействие.

Из полученных результатов следует целесообразность проведения окислительной термообработки в два этапа: низкотемпературная термообработка, когда на зерне растёт оболочка оксида, и высокотемпературная, когда на интерфейсе между оксидной фазой и зерном халькогенида свинца формируются металлические наночастицы. Эти модельные представления также качественно описывают и закономерности образования оксидных фаз в наночастицах PbS в пористых слоях.



Работа выполнена в рамках проекта «Получение и исследование пористых систем, функционализированных наноматериалами, для применений в фотонике, сенсорике и медицине» (в рамках госзадания Минобрнауки РФ № 16.2112.2014/К (проектная часть), а также при поддержке РФФИ в рамках проекта № 14-02-31680, мол-а.

### Список литературы

1. Буткевич В.Г., Бочков В.Д., Глобус Е.Р. Фотоприемники и фотоприемные устройства на основе поликристаллических и эпитаксиальных халькогенидов слоев свинца // Прикладная физика. 2001. № 6. С. 66–112.
2. Зимин С.П., Горлачев Е.С. Наноструктурированные халькогениды свинца. Ярославль: ЯрГУ, 2011.
3. Авен М., Пренер Д.С. Физика и химия соединений  $A^{II}B^{VI}$ . М: Иностранная литература, 1970.
4. Александрова О.А., Максимов А.И., Мошников В.А., Чеснокова Д.Б. Халькогениды и оксиды элементов IV группы. Получение, исследование, применение. СПб: ООО «Технолит» / Изд-во «Технолит», 2008.
5. Голубченко Н.В., Мошников В.А., Чеснокова Д.Б. Влияние примесей на кинетику и механизм термического окисления поликристаллических слоев PbSe // Неорг. материалы. 2006. Т. 42, № 9. С. 1040–1049.
6. Dobrovolsky A.A. et al. Photoconductivity of oxidized nanostructured PbTe (In) films // Semiconductor Science and Technology. 2009. Vol. 24, No 7, p. 075010.
7. Kasiyan V. et al. Infrared detectors based on semiconductor pn junction of PbSe // Journal of Applied Physics. 2012. Т. 112, № 8. P. 086101.
8. Зломанов, В.П., Тананаева О.И., Новоселова А.В. Изучение взаимодействия селенида свинца с кислородом // Журн. неорганической химии. 1961. Т. 6, Вып. 12. С. 2753–2757.
9. Мараева Е.В., Мошников В.А., Таиров Ю.М. Модели формирования оксидных слоев в наноструктурированных материалах на основе халькогенидов свинца при обработке в парах кислорода и иода // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 47, Вып. 10. С. 1431–1434.
10. Андреев С.И., Камчатка М.И., Чащинов Ю.М. Анализ процесса окисления сульфида свинца // Известия СПбГЭТУ (ЛЭТИ). 1996. Вып. 495. С. 89–93.
11. Гурвич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А. и др. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. М.: Наука, 1978.
12. Равдель А.А., Пономарева А.М. Краткий справочник физико-химических величин. СПб: Специальная литература, 1998.
13. Марков В.Ф., Маскаева Л.Н., Иванов П.Н. Гидрохимическое осаждение пленок сульфидов металлов: моделирование и эксперимент. Екатеринбург: УрО РАН, 2006.
14. Дедегкаев Т.Т., Мошников В.А., Чеснокова Д.Б., Яськов Д.А. Исследование включений металлического характера в твердых растворах теллурида

свинца-теллурида олова, выращенных из расплава // Письма в Журнал технической физики. 1980. Т. 6, № 17. С. 1030–1033.

### References

1. Butkevich V.G., Bochkov V.D., Globus E.R. Fotopriemniki i fotopriemnye ustrojstva na osnove polikristallicheskikh i epitaksial'nyh hal'kogenidov sloev svinca. *Prikladnaâ fizika*, 2001, no. 6, pp. 66–112 (in Russ.).
2. Zimin S.P., Gorlachev E.S. Nanostrukturirovannye hal'kogenidy svinca. Yaroslavl: YarGU Publ., 2011 (in Russ.).
3. Aven M., Prener D.S. Physics and chemistry of II-VI compounds, 1967 (in Eng.).
4. Aleksandrova O.A., Maksimov A.I., Moshnikov V.A., Chesnokova D.B. Hal'kogenidy i oksidy èlementov IV gruppy. *Poluçenie, issledovanie, primenenie*. St. Petersburg: Ltd "Tehnolit" Publ., 2008 (in Russ.).
5. Golubchenko N.V., Moshnikov V.A., Chesnokova D.B. Doping effect on the kinetics and mechanism of thermal oxidation of polycrystalline PbSe layers. *Inorg. materials*, 2006, vol. 42, no. 9, pp. 942–950 (in Eng.).
6. Dobrovolsky A.A. et al. Photoconductivity of oxidized nanostructured PbTe (In) films. *Semiconductor Science and Technology*, 2009, vol. 24, no. 7, p. 075010 (in Eng.).
7. Kasiyan V. et al. Infrared detectors based on semiconductor pn junction of PbSe. *Journal of Applied Physics*, 2012, vol. 112, no. 8, pp. 086101 (in Eng.).
8. Zlomanov, V.P., Tananaeva O.I., Novoselova A.V. Izuçenie vzaimodejstviâ selenida svinca s kislorodom. *Žurn. Neorgan. himii*, 1961, vol. 6, issue 12, pp. 2753–2757 (in Russ.).
9. Maraeva E. V., Moshnikov V. A., Tairov Y. M. Models of the formation of oxide phases in nanostructured materials based on lead chalcogenides subjected to treatment in oxygen and iodine vapors. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, issue. 10, pp. 1422–1425 (in Eng.).
10. Andreev S.I., Kamchatka M.I., Chashchinov Yu.M. Analiz processa okisleniâ sul'fida svinca. *Izvestiâ SPbGËTU (LËTI)*, 1996, issue 495, pp. 89–93 (in Russ.).
11. Gurvich L.V., Vejç I.V., Medvedev V.A. et al. *Termodinamiçeskie svojstva individual'nyh vešestv*. Moscow: Nauka Publ., 1978 (in Russ.).
12. Ravdel' A.A., Ponomareva A.L. *Kratkij spravocnik fiziko-himiçeskikh veliçin*. St. Petersburg: Special'naâ literatura Publ., 1998 (in Russ.).
13. Markov V.F., Maskaeva L.N., Ivanov P.N. *Gidrohimiçeskoe osaždenie plenok sul'fidov metallov: modelirovanie i èksperiment*. Ekaterinburg: UrO RAN, 2006 (in Russ.).
14. Dedegkaev T.T., Moshnikov V.A., Chesnokova D.B., Yas'kov D.A. Issledovanie vkljuçenij metalliçeskogo haraktera... *Pis'ma v Žurnal tehniçeskoj fiziki*, 1980, vol. 6, no. 17, pp. 1030–1033 (in Russ.).

Транслитерация по ISO 9:1995

