

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
ТОНКИХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК
СУЛЬФИДА КАДМИЯ ПРИ γ -ОБЛУЧЕНИИ**

В. В. Голованова, В. Е. Буковский, Б. В. Назарчук, В. В. Голованов

Центр Инновационных Технологий,

*Южноукраинский национальный педагогический университет им. К. Д. Ушинского,
Одесса, Украина*

Поступила в редакцию 18.01.2015

Морфология, фазовый состав и структура поверхности пленок сульфида кадмия, полученных электрогидродинамическим (ЭГД) распылением жидкости в атмосфере кислорода, были исследованы методами сканирующей электронной микроскопии (SEM), атомно-силовой микроскопии (AFM), энергодисперсионного анализа (EDS) и рентгеноструктурного анализа (XRD). Исследовано влияние γ -фотонов на кристаллическую структуру пленок CdS. Показано, что радиационно-стимулированная диффузия способствует росту кристаллитов сульфида кадмия со структурой вюрцита. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в случае осаждения пленок CdS методом ЭГД-пульверизации, несложными техническими методами, изменяя время напыления, температуру подложки, а также соотношение ионов серы и кадмия в исходном растворе, можно получать полупроводниковые слои с контролируемой структурой и стехиометрическим составом.

Ключевые слова: сульфид кадмия, гамма-излучение, тонкие поликристаллические плёнки.

**ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ХІМІЧНОГО СКЛАДУ
ТОНКИХ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ ПЛІВОК СУЛЬФІДУ КАДМІЮ
ПРИ γ -ОПРОМІНЕННІ**

В. В. Голованова, В. Е. Буковський, Б. В. Назарчук, В. В. Голованов

Морфологія, фазовий склад і структура поверхні плівок сульфід кадмію, отриманих за допомогою електрогідродинамічного (ЕГД) розпилення рідини в атмосфері кисню, були досліджені методами скануючої електронної мікроскопії (SEM), атомно-силової мікроскопії (AFM), енергодисперсійного аналізу (EDS) та рентгеноструктурного аналізу (XRD). Досліджено вплив γ -фотонів на кристалічну структуру плівок CdS. Показано, що радіаційно-стимульована дифузія сприяє росту кристалітів сульфід кадмію зі структурою вюрцита. Отримані результати свідчать про те, що при осадженні плівок CdS методом ЕГД-пульверизації, нескладними технічними методами, змінюючи час напылення, температуру підкладки, а також співвідношення сірки та кадмію в вихідному розчині, можна отримувати напівпровідникові шари із контрольованими структурою та стехіометричним складом.

Ключові слова: сульфід кадмію, гамма-випромінення, тонкі полікристалічні плівки.

**STRUCTURE AND COMPOSITION OF THIN POLYCRYSTALLINE CADMIUM
SULFIDE FILMS UNDER γ -RADIATION**

V. V. Golovanova, V. Ye. Bukovsky, B. V. Nazarchuk, V. V. Golovanov

The morphology, chemical composition and surface structure of the cadmium sulfide films, deposited in ambient atmosphere by electro-hydrodynamic (EHD) spray pyrolysis have been studied by scanning electron microscopy (SEM), atomic-force microscopy (AFM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD). The changes in the crystalline structure of CdS films induced by γ -irradiation have been determined from these measurements. It is shown that stimulated by γ -irradiation diffusion of intrinsic defects in CdS material facilitates the growth of crystals with wurtzite structure. The obtained results demonstrate that structure and stoichiometric composition of the CdS films synthesized by EHD spray pyrolysis method can be reliably controlled by such technological parameters as deposition time, substrate temperature and ratio of the sulfur and cadmium ions in the initial solution.

Keywords: cadmium sulfide, gamma rays, thin polycrystalline films.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается возрождающийся интерес к исследованиям свойств сульфида кадмия, что связано с успехами в разработке оптоэлектронных устройств [1, 2] и солнечных элементов, созданных на основе фоточувствительных материалов групп II–IV и III–V [3, 4]. Существенным фактором, стимулирующим применение тонкопленочных слоев, является их небольшая стоимость, простая технология синтеза и возможность препарирования пленок с необходимыми параметрами. Однако, высокая чувствительность электрофизических, фотоэлектрических и оптических свойств тонких пленок сульфида кадмия к внешним воздействиям ограничивает их широкое применение в микроэлектронике. Весьма существенные эволюции дефектов в твердых телах происходят при облучении малыми (до 10^6 рад) дозами ядерных излучений [5, 6]. В настоящей работе проведено исследование влияния условий синтеза и γ -облучения поликристаллических пленок сульфида кадмия на их морфологию и стехиометрический состав.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Образцы сульфида кадмия были получены методом электрогидродинамического (ЭГД) распыления растворов CdCl_2 и $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$, описанным ранее в работе [7]. Выращенные таким образом пленки исследовались на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2.0 и электронном микроскопе ЭВМ-100АК. Рентгендифрактограммы снимались по методу Дебая–Шерера, а поверхность пленок исследовалась методом реплик. При расшифровке рентгендифрактограмм вводилась поправка на наличие кристаллической фазы у ситалловой подложки. Относительные атомные концентрации кадмия и серы в объеме пленок были получены методом EDS на JEOL JSM-6400/LINK AN10-85 спектрометре. Относительная атомная концентрация дефектов на поверхности была определена с использованием метода количественного анализа спектров рентгенфотоэлектронной спектроскопии, записанных на спектрометре VG ESCALAB MkII. Поверхность

образцов исследовалась методами SEM/AFM на электронных микроскопах ЭВМ-100АК и NanoScope II Scanning Probe Microscope, соответственно. Толщина синтезированных слоев измерялась интерференционным методом на приборе МИИ-4. Синтезированные образцы облучались гамма фотонами ^{60}Co дозой 10^4 рад.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные образцы сульфида кадмия оптически прозрачны в широком спектральном интервале, механически прочны и имеют хорошие адгезионные свойства. Очевидно, что состав слоя CdS , осаждающегося методом ЭГД-пульверизации существенно определяется соотношением ионов серы и кадмия в исходном растворе. Смешивая спиртовые растворы хлорида кадмия и тиомочевины в определенной пропорции, можно получать слои CdS , обогащенные халькогеном или металлической компонентой. При этом изменение стехиометрического состава образца отражается на особенностях формирования его структуры.

Для изучения влияния структуры поверхности на свойства пленок CdS , анализ осажденных слоев методами EDS и AFM был проведен на образцах имеющих различную элементную композицию. Отношение Cd/S в объеме пленок составляло 0,9 (I тип пленок); 1 (II тип пленок) и 1,96 (III тип пленок). При этом было обнаружено, что поверхность всех типов исследованных пленок была обогащена атомами металлической компоненты, где отношение Cd/S составляло 1.6 (I тип пленок), 2.4 (II тип пленок) и 3.2 (III тип пленок). Следует отметить, что несмотря на существенную разницу в концентрациях ионов Cd и S в исходных растворах (от 10:1 до 1:10), во всех осажденных пленках наблюдалось превалирование атомов кадмия.

Как известно, соединения CdS могут принадлежать к двум основным структурным типам: кубической структуре цинковой обманки (сфалерита) и гексагональной структуре вюрцита [8]. Принадлежность соединения к структурному типу зависит от условий его синтеза, в частности, сильное влияние

на свойства образующегося слоя оказывают условия на подложке. Результаты рентгенографических, спектрографических, и других исследований [9–11] показывают, что для материалов группы II–IV, росту гексагональной модификации способствует избыток металлической компоненты, а кубической — металлоидной. Одной из причин формирования избытка металлической компоненты является различие в критической температуре отражения напыляемых компонент от подложки. В случае конденсации кадмия на подложке из стекла ее величина составляет 420 К, если подложкой служит сульфид кадмия — 570 К [12] или другие подложки — 450 К [13]. Для серы эта температура не превышает 320 К [13].

Результаты электроннографического анализа, представленные на рис. 1, показывают, что при температурах подложки выше 710 К, определяющей в фазовом составе является гексагональная модификация. На это также указывает характерное пространственное расположение (рис. 1а) и форма (рис. 1б) кристаллитов. Полученные результаты находятся в согласии с результатами работы [14], свидетельствующими о том, что в фазовом составе пленок, полученных методом распыления на подложку, нагретую выше 670 К, преобладает гексагональная модификация, в то время как при более низких температурах определяющей является кубическая модификация.

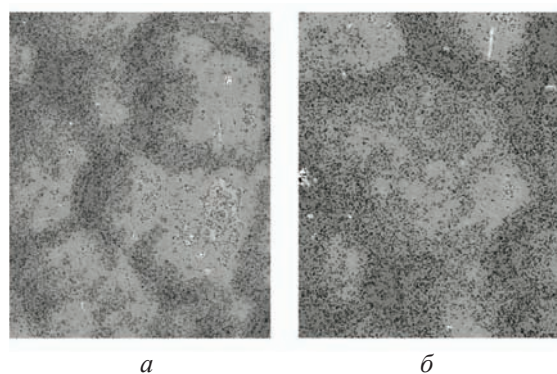


Рис. 1. Электронномикроскопические фотографии поверхности образцов CdS, полученных методом ЭГД пульверизации при временах напыления 30 секунд — а и 4 минуты — б на подложку, нагретую до 700 К. Увеличение — 10000 раз

На рис. 2 представлены микрофотографии пленок CdS I — а, II — б и III — в типов.

Поверхность образцов III типа насыщена островками, локализующимися, как правило, в области микротрещин и имеющими специфическую «рельсовую» форму. Особенности формы и мест преимущественного расположения обнаруженных образований характерны для микровключений металла, которые появляются в виде капель на стоках (микротрещины, разломы, дислокации) [15]. Действительно, результаты структурного анализа показывают, что на электронограммах присутствуют линии, характерные для кадмия (табл. 1). Исследование методом EDS также показало, что наблюдаемые включения представляют собой кластеры кадмия на поверхности CdS.

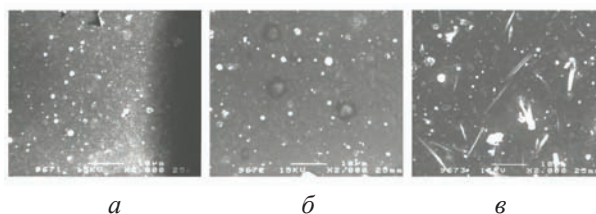


Рис. 2. Микрофотографии поверхности пленок CdS с отношением Cd/S а — 1.6 (I тип сенсоров), б — 2.4 (II тип сенсоров) и в — 3.2 (III тип сенсоров). Время осаждения 4 минуты. Увеличение — 2000 раз

Поскольку введение избыточного кадмия или легирование атомами кадмия стимулирует образование окислов, то предполагается, что междоузельные атомы кадмия (либо их скопления) являются активными центрами зародышеобразования окисных соединений. Обнаруженное с помощью рентгеноэлектронной спектроскопии накопление кадмия у поверхности образцов [16, 17] послужило основой предположения о том, что диффузия кадмия из объема к поверхности является одним из основных факторов в процессах роста CdO [18]. Формирование островков кадмия, окруженных его окислами, обнаружено в пленках селенида кадмия в электронно-микроскопических экспериментах, выполненных совместно с микроанализом состава образца [19].

Микрофотографии поверхности образцов CdS I, II и III типа, осажденных в течение 30 секунд на нагретую до 700 К подложку (рис. 3) свидетельствуют о том, что изменение отношения ионов серы и кадмия в сторону увеличения серы приводит к формированию

Изменение структуры и состава пленок CdS в результате их отжига на воздухе и в вакууме

Условия отжига	Неотожженные	Температура отжига, К						
		450	500	650	670	710	740	770
Структура								
Воздух	куб. + Cd	куб. + Cd	куб.	гекс. + Cd	гекс. + Cd	гекс. + Cd + CdO	CdO	CdO
Вакуум	куб. + Cd	куб. + Cd	куб.	гекс.	гекс.	гекс.	гекс.	гекс.

более совершенной структуры слоя, в то время как при изменении этого соотношения в сторону увеличения ионов металла поверхность пленок покрывается продуктами окисления, которые имеют рыхлую мозаичную форму (рис. 3в).

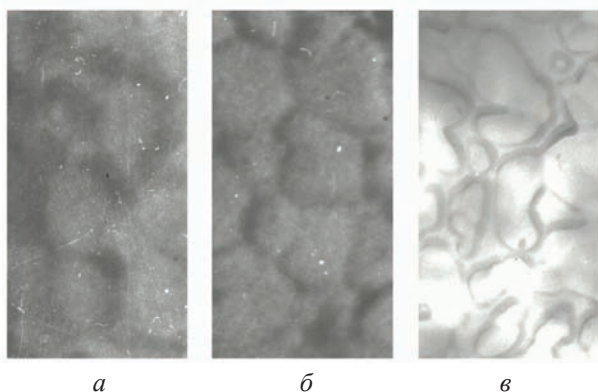


Рис. 3. Микрофотографии поверхности сенсоров I — а, II — б и III — в типов. Время осаждения 30 секунд. Увеличение — 10000 раз

Пленки осаждались в течение 30 секунд в кислородосодержащей атмосфере на нагретую до 700 К подложку. При температурах $T > 700$ К с дальнейшим увеличением времени отжига поверхность пленок покрывается продуктами окисления и формируется пленка с ажурной структурой, которая при $T > 710$ К покрывала большую часть поверхности сульфида кадмия. Данные табл. 1 показывают, что основным продуктом окислительных реакций является окись кадмия, толщина которой при $T > 740$ К становится больше, чем глубина проникновения электронного луча в образец. В этом случае структура сульфида кадмия не обнаруживается. На поверхности сульфида и селенида

кадмия при отжиге на воздухе обнаружен рост двух типов островков CdO, имеющих ориентацию (100) или (111). Во всех случаях островки растут преимущественно в виде четырехугольных пирамид либо тетраэдров.

Метод AFM обеспечивает возможность получать трехмерную картину с атомным разрешением напрямую с поверхностью полупроводника или изолятора без проводящего покрытия. Трехмерная картинка поверхности образцов CdS I, II и III типа представлена на рис. 4.

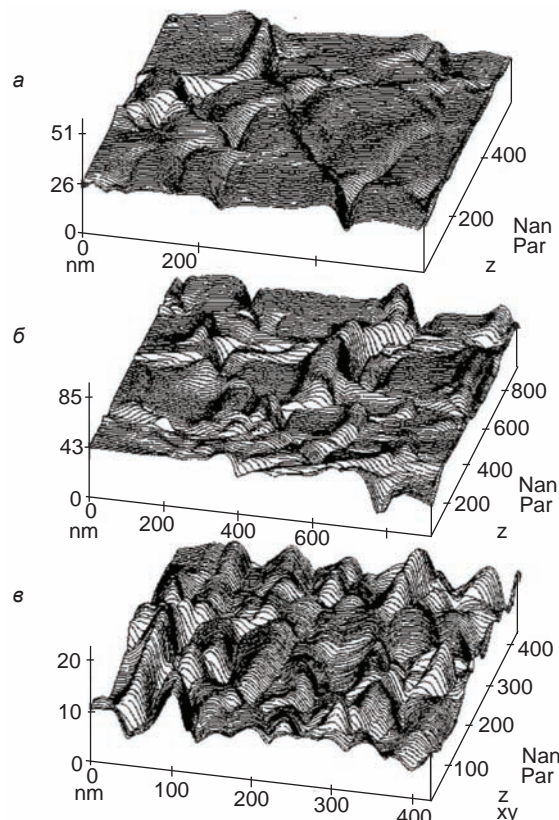


Рис. 4. Трехмерные изображения поверхности образцов CdS I — а, II — б и III — в типов, полученные методом AFM

Как видно, образцы со стехиометрическим составом измененным в сторону преобладания металлической компоненты имеют характерную для наличия окислов пирамидальную поверхность, тогда как образцы I типа отличаются плоской «равнинной» структурой.

Двумерный профиль поверхности образцов трех типов, полученный методом AFM представлен на рис. 5. Как видно, из рис. 5в характерный размер кластера кадмия составляет величину 288 нм. Разница в высоте пиков и перевалов составляет величину около 200 нм.

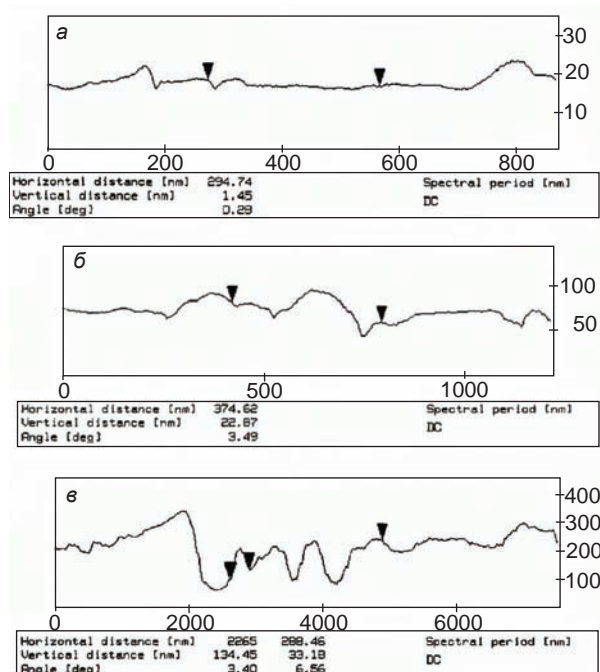


Рис. 5. Двумерный профиль поверхности образцов CdS I — а, II — б и III — в типов, полученный методом AFM

Зависимость толщины пленки d и характерного размера кристаллитов ρ от продолжительности напыления слоя представлены на рис. 6. Практическое совпадение толщины слоя с характерным размером кристаллита позволяет сделать вывод о том, что полученные пленки представляют собой монослой кристаллитов (рис. 7), величина которых линейно возрастает с увеличением времени напыления. Такая структура слоя является характерной для поликристаллических пленок [20].

Увеличение температуры подложки обычно приводит к увеличению размеров

кристаллитов, что наблюдается и в нашем случае (рис. 8). При этом наиболее быстро растут кристаллиты с благоприятной ориентацией плоскостей. Эти кристаллиты, разрастаясь, подавляют развитие соседних кристаллитов (рис. 7), причем, если на начальных стадиях напыления слой состоит из мелких кристаллических образований правильной формы (рис. 2а), то впоследствии лишь некоторые кристаллиты сохраняют правильную форму, характерную для гексагональной модификации (рис. 2б).

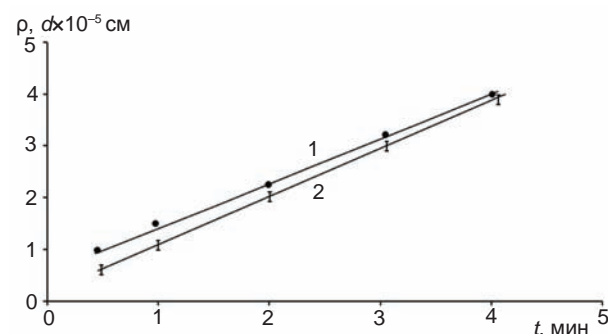


Рис. 6. Зависимость толщины пленки (1) и характерного размера кристаллитов (2) от продолжительности ее напыления

Важным фактором, влияющим на структуру формирующегося слоя, является природа диэлектрической подложки, в частности ее ориентирующее действие, которое проявляется в возникновении определенного пространственного расположения и ориентации зародышей кристаллитов. В случае, если подложка представляет собой монокристаллическую пластинку, это влияние проявляется в образовании монокристаллической пленки. Для аморфной подложки ориентирующее действие отсутствует, однако известно [21], что и в этом случае кристаллизация происходит таким образом, что свободная энергия образующейся структуры стремится к минимальному значению.

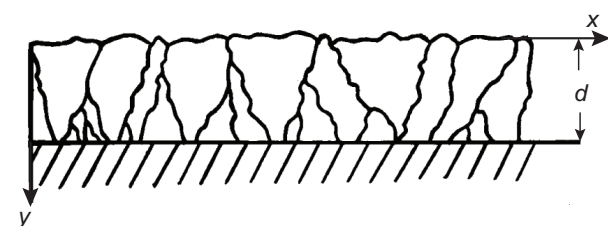


Рис. 7. Схематичный вид поперечного сечения тонкой поликристаллической пленки CdS, полученной методом ЭГД-пудверизации

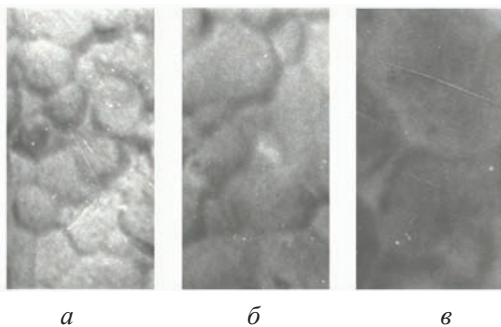


Рис. 8. Фотографии поверхности образцов CdS, осажденных в течение 30 секунд на нагретую до 670 К — а, 700 К — б, 730 К — в. Увеличение — 10000 раз

На рис. 9 приведены рентгенодифрактограммы пленки сульфида кадмия осажденной при температуре подложки 500 К (1), отожженной на воздухе при 673 К в течение 600 секунд (2) и облученной при 300 К (после отжига) гамма фотонами ^{60}Co дозой 10^4 рад (3). Из анализа дифрактограм можно заключить, что доля кубической фазы незначительна. Широкая бесструктурная полоса при углах дифракции от 16° до 36° соответствует аморфной фазе, образовавшейся вследствие напыления пленки на холодную подложку. Доля аморфной фазы в отожженных пленках уменьшается. После гамма облучения размеры кристаллитов возросли в 1,5–2 раза. На рентгенодифрактограммах этому соответствует увеличение числа рефлексов и их интенсивности. Из рисунка видно, что после облучения исчезает преимущественная ориентация кристаллитов. Примечательным является образование после облучения пленок кристаллической серы, а также почти двукратное уменьшение интенсивности бесструктурной полосы, соответствующее уменьшению доли аморфной фазы в пленке. Появление после облучения в пленках кристаллитов серы свидетельствует о том, что аморфная фаза отожженных пленок содержит избыточную серу. При γ -облучении атомы из аморфной фазы приобретают высокую подвижность, вследствие чего происходит рост кристаллитов, как сульфида кадмия, так и серы. Соответственно, на рентгенодифрактограмме облученной пленки увеличивается число рефлексов от гексагональной фазы и растет их интенсивность, а также появляются рефлексы малой интенсивности соответствующие

кубической фазе (рефлекс при угле дифракции = $15,7^\circ$).

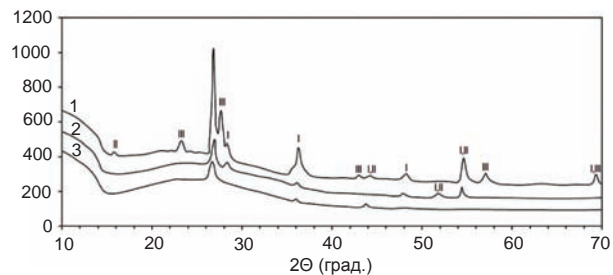


Рис. 9. Рентгенодифрактограммы исходной (1), отожженной (2) и облученной (3) пленок CdS. Римскими цифрами обозначены рефлексы, соответствующие: I — α -CdS, II — β -CdS, III — S

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом поставленные эксперименты свидетельствуют о том, что под действием ионизирующего излучения в поликристаллических пленках CdS при температурах порядка 300 К происходят процессы роста микрокристаллитов сульфида кадмия и серы в результате перекристаллизации аморфной фазы в кристаллическую. Появление кристаллической серы может пролить свет на целый круг явлений, наблюдаемых в подвергнутых гамма облучению пленках сульфида кадмия, например на особенности спектрального распределения фотопроводимости гамма-облученных пленок CdS. Эти явления могут оказывать существенное влияние на надежность изделий пленочной микроэлектроники, используемых в полях ядерных излучений.

В заключение, следует также отметить, что исследования структуры, фазового состава, элементного и химического состава согласуются между собой и показывают, что взаимодействие сульфида кадмия с кислородом при высоких температурах (710–740 К) происходит с образованием окиси кадмия, которая является более низкоомным соединением по сравнению с исходными материалами. В некоторых случаях наблюдается выделение свободного металлического кадмия в виде отдельных включений на поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hasse M. A., J. Qiu, J. M. DePuydt, H. Cheng. Blue-green laser diodes // Appl. Phys. Lett. — 1991. — Vol. 59 — P. 1272.

2. Ganguli N., Acharya S., and I. Dasgupta. First-principles study of the electronic structure of CdS/ZnSe coupled quantum dots // *Phys. Rev. B.* — 2014. — Vol. 89. — P. 245423.
3. Li X., Zhang Ze., Chen L., Liu Z., Cheng J., Ni W., Xie E., Wang B. Cadmium sulfide quantum dots sensitized tin dioxide/titanium dioxide heterojunction for efficient photoelectrochemical hydrogen production // *Journal of Power Sources.* — 2014. — Vol. 269. — P. 866–872.
4. Dibbell R. S. and Watson D. F. Distance-dependent electron transfer in tethered assemblies of CdS quantum dots and TiO₂ nanoparticles // *J. Phys. Chem. C.* — 2009. — Vol. 113. — P. 3139–3149.
5. Болотов В. В., Коротченко В. А., Мамонтов А. П., Ржанов А. В., Смирнов Л. С., Шаймеев С. С. Радиационные эффекты в полупроводниках при малых дозах облучения частицами // *Физика и техника полупроводников.* — 1980. — Т. 14, вып. II. — С. 2257–2260.
6. Борковская О. Ю., Дмитрук Н. Л., Конакова Р. В., Литовченко В. Г. Пространственная локализация эффекта радиационно-стимулированного геттерирования // *Физика и техника полупроводников.* — 1984. — Т. 18, вып. 10. — С. 1885–1887.
7. Golovanov V. V. Characterization of stannic dioxide nanosensors, invited paper in *International Journal of Materials and Product Technology* // Special issue: Nano/Microsystems and Manufacturing. Inderscience Enterprises Limited. — 2003. — Vol. 18, Nos. 4/5/6. — P. 296–312.
8. Горюнова Н. А. Сложные алмазоподобные полупроводники — М.: Сов. радио, 1968. — 267 с.
9. Новик Г. А., Поляков С. М. О механизме формирования преимущественных ориентаций слоев сульфида кадмия, полученных испарением в вакууме // *Кристаллография.* — 1978. — Т. 23, № 4. — С. 886–889.
10. Wilson J. I., Woods J. The electrical properties of evaporated films of cadmium sulphide // *J. Phys. Chem. Solids.* — 1973. — Vol. 26, No. 2. — P. 171–181.
11. Dawertitz L., Dornics M. The influence of stoichiometry on the structure of vacuum deposited CdS films // *Phys. Stat. Sol.(a).* — 1975. — Vol. 20, No. 1. — K37–K39.
12. Шалимова К. В., Травина Т. С., Потапов Ю. В., Старостин В. В. Электрические свойства поликристаллических пленок сульфида кадмия // *Изв. ВУЗов, Физика.* — 1964. — Т. 3. — С. 134–139.
13. King P. J. The optimum conditions for the evaporation of cadmium sulphide films for the generation of microwave ultrasonics // *Brit. J. Appl. Phys.* — 1969. — Vol. 2, No. 9. — P. 1349–1352.
14. Gupta B. K., Agnihorti O. P. Effect of cation-anion ratio on crystallinity and optical properties of cadmium sulphide films prepared by chemical spray deposition process // *Solid State Communication.* — 1977. — Vol. 23, No. 5. — P. 295–300.
15. Палатник Л. С., Сорокин В. К. Основы пленочного материаловедения.— М.: Наука, 1973. — 295 с.
16. Сергеева Л. А., Подлужный В. В., Калинин И. П., Костиков Ю. П., Иванов И. К. Электронная микроскопия поверхности термообработанных пленок селенида кадмия // *Изв. АН СССР, Неорганические Материалы.* — 1980. — Т. 16, № 1. — С. 22–27.
17. Подлужный В. В., Сергеева Л. А., Калинин И. П. О природе межкристаллитных барьеров в термообработанных пленках селенида кадмия // *Изв. ВУЗов, Физика.* — 1981. — Т. 1. — С. 105–108.
18. Кукушкин С. А., Сергеева Л. А., Калинин И. П. Механизм и кинетика начальных стадий окисления пленок селенида кадмия // *Журн. Техн. Физики.* — 1982. — Т. 52, № 2. — С. 388–390.
19. Lopen O. P. Observation of Cd crystal growth in thin CdSe films during an airbake // *Phys. Stat. Sol.(a).* — 1972. — Vol. 9, No. 1. — P. 263–266.
20. Chu T. L., Chu S. S., Van Der Leeden G. A., Lin C. J., Boyd J. R. Polycrystalline silicon *p-n* junctions // *Solid State Electron.* — 1978. — Vol. 21, No. 5. — P. 781–786.
21. Кузнецов В. Д. Кристаллы и кристаллизация. — М.: Гостехиздат, 1963. — 411 с.

LITERATURA

1. Hasse M. A., J. Qiu, J. M. DePuydt, Cheng H. Blue-green laser diodes // *Appl. Phys. Lett.* — 1991. — Vol. 59 — 1272 p.
2. Ganguli N., Acharya S., and Dasgupta I. First-principles study of the electronic structure of CdS/ZnSe coupled quantum dots // *Phys. Rev. B.* — 2014. — Vol. 89. — P. 245423.
3. Li X., Zhang Ze., Chen L., Liu Z., J. Cheng, Ni W., Xie E., Wang B. Cadmium sulfide quantum dots sensitized tin dioxide/titanium

- dioxide heterojunction for efficient photoelectrochemical hydrogen production // *Journal of Power Sources*. — 2014. — Vol. 269. — P. 866–872.
4. Dibbell R. S. and Watson D. F. Distance-dependent electron transfer in tethered assemblies of CdS quantum dots and TiO₂ nanoparticles // *J. Phys. Chem. C*. — 2009. — Vol. 113. — P. 3139–3149.
 5. Bolotov V. V., Korotchenko V. A., Mamontov A. P., Rzhhanov A. V., Smirnov L. S., Shajmееv S. S. Radiacionnye efekty v poluprovodnikah pri malyh dozah oblucheniya chasticami // *Fizika i tehnika poluprovodnikov*. — 1980. — Vol. 14, vyp. II. — P. 2257–2260.
 6. Borkovskaya O. Yu., Dmitruk N. L., Konakova R. V., Litovchenko V. G. Prostranstvennaya lokalizatsiya efekta radiacionno-stimulirovannogo getterirovaniya // *Fizika i tehnika poluprovodnikov*. — 1984. — Vol. 18, vyp. 10. — P. 1885–1887.
 7. Golovanov V. V. Characterization of stannic dioxide nanosensors, invited paper in *International Journal of Materials and Product Technology* // Special issue: Nano/Microsystems and Manufacturing. Inderscience Enterprises Limited. — 2003. — Vol. 18, Nos. 4/5/6. — P. 296–312.
 8. Goryunova N. A. Slozhnyealmazopodobnye poluprovodniki — M.: Sov.radio, 1968. — P. 267.
 9. Novik G. A., Polyakov S. M. O mehanizme formirovaniya preimuschestvennykh orientacij sloev sul'fida kadmiya, poluchennykh ispareniem v vakuume // *Kristallografiya*. — 1978. — Vol. 23, No. 4. — P. 886–889.
 10. Wilson J. I., Woods J. The electrical properties of evaporated films of cadmium sulphide // *J. Phys. Chem. Solids*. — 1973. — Vol. 26, No. 2. — P. 171–181.
 11. Dawertitz L., Dornics M. The influence of stoichiometry on the structure of vacuum deposited CdS films // *Phys. Stat. Sol.(a)*. — 1975. — Vol. 20, No. 1. — K37–K39.
 12. Shalimova K. V., Travina T. S., Potapov Yu. V., Starostin V. V. Elektricheskie svoystva polikristallicheskih plenok sul'fida kadmiya // *Izv. VUZov, Fizika*. — 1964. — Vol. 3. — P. 134–139.
 13. King P. J. The optimum conditions for the evaporation of cadmium sulphide films for the generation of microwave ultrasonics // *Brit. J. Appl. Phys.* — 1969. — Vol. 2, No. 9. — P. 1349–1352.
 14. Gupta B. K., Agnihorti O. P. Effect of cation-anion ratio on crystallinity and optical properties of cadmium sulphide films prepared by chemical spray deposition process // *Solid State Communication*. — 1977. — Vol. 23, No. 5. — P. 295–300.
 15. Palatnik L. S., Sorokin V. K. Osnovy plenoch-nogo materialovedeniyayu. — M.: Nauka, 1973. — 295 p.
 16. Sergeeva L. A., Podluzhnyj V. V., Kalinkin I. P., Kostikov Yu. P., Ivanov I. K. Elektronnaya mikroskopiya poverhnosti termoobrabotannykh plenok selenida kadmiya // *Izv. AN SSSR, Neorganicheskie Materialy*. — 1980. — Vol. 16, No. 1. — P. 22–27.
 17. Podluzhnyj V. V., Sergeeva L. A., Kalinkin I. P. O prirode mezhkristallitnykh bar'erov v termoobrabotannykh plenkah selenida kadmiya // *Izv. VUZov, Fizika*. — 1981. — Vol. 1. — P. 105–108.
 18. Kukushkin S. A., Sergeeva L. A., Kalinkin I. P. Mehanizm i kinetika nachal'nykh stadij oksleniya plenok selenida kadmiya // *Zhurn. Tehn. Fiziki*. — 1982. — Vol. 52, No. 2. — P. 388–390.
 19. Lopen O. P. Observation of Cd crystal growth in thin CdSe films during an airbake // *Phys. Stat. Sol.(a)*. — 1972. — Vol. 9, No. 1. — P. 263–266.
 20. Chu T. L., Chu S. S., Van Der Leeden G. A., Lin C. J., Boyd J. R. Polycrystalline silicon *p-n* junctions // *Solid State Electron*. — 1978. — Vol. 21, No. 5. — P. 781–786.
 21. Kuznecov V. D. Kristally i kristallizatsiya — M.: Gostehizdat, 1963. — 411 p.