

УДК 541.13+621.383

М.Б. Дергачева*, Н.Н. Гуделева, К.А. Леонтьева, К.А. Уразов, Г.М. Хусурова

Институт органического катализа и электрохимии им. Д.В.Сокольского, Казахстан, г. Алматы

*E-mail: m_dergacheva@mail.ru

Нуклеация и рост наночастиц сульфида и теллурида кадмия при электроосаждении

Методом хроноамперометрии изучена кинетика процесса нуклеации и роста электроосажденных нанокристаллов CdS и CdTe для тонкопленочных солнечных элементов. Проведено сопоставление экспериментальных данных с теоретическими моделями. Установлено, что в зависимости от условий электроосаждения, нуклеация и рост CdTe и CdS описываются закономерностями двумерного 2D или трехмерного 3D роста с мгновенной нуклеацией, осложненной последующей диффузией. В процессе электроосаждения сульфида кадмия на стеклоуглеродном электроде имеет место механизм 2D мгновенной нуклеации. Сульфид кадмия на электроде SnO₂/стекло осаждается по механизму мгновенной нуклеации 3D типа. Нуклеация и рост CdTe на поверхности CdS является двумерным 2D ростом с мгновенной нуклеацией. Поверхность слоя CdS, нанесенного методом электроосаждения на подложку SnO₂/стекло, представляет собой плотный слой ориентированных частиц с размером ~20 нм. Обнаружено наличие частиц с меньшими размерами ~8-20 нм.

Ключевые слова: нуклеация, кинетика кристаллизации, электрокристаллизация, теллурид кадмия, сульфид кадмия.

M.B. Dergacheva, N.N. Gudeleva, K.A. Leontyeva, K.A. Urazov, G.M. Khussurova

Nucleation and growth of cadmium sulfide and telluride nanoparticles

The kinetics of nucleation process and growth of the electrodeposited CdS and CdTe nanocrystals for thin-film solar cells has been studied using chronoamperometry method. Comparison of experimental data to theoretical models is carried out. It is established that the nucleation and growth of CdTe and CdS, depending on electrodeposition conditions, is described by regularities of two-dimensional 2D or three-dimensional 3D growth with the instant nucleation complicated by the subsequent diffusion. In the electrodeposition of CdS on glassy-carbone electrode occurs two-dimensional 2D instant nucleation mechanism. Cadmium sulfide deposited on SnO₂/glass electrode by three-dimensional 3D growth with the instant nucleation. Nucleation and growth of CdTe on the surface of CdS goes by two-dimensional 2D instant nucleation mechanism. The surface of CdS layer, deposited by electrodeposition method onto SnO₂/glass substrate, represent a dense layer of oriented particles with size ~20 nm. Found out presence of particles with smaller sizes ~8-20 nm.

Key words: nucleation, crystallization kinetics, electro crystallization, cadmium telluride, cadmium sulfide.

М.Б. Дергачева, Н.Н. Гуделева, К.А. Леонтьева, К.А. Уразов, Г.М. Хусурова

Электротұндыру кезінде кадмий сульфиді мен теллурид нанобөлшектерінің нуклеациясы мен өсуі

Жұқа қабықты күн элементтері үшін электротұндырылған CdS және CdTe нанокристалдарының нуклеация мен өсу үрдісінің кинетикасы хроноамперометрия әдісімен зерттелді. Эксперименттік мағлұматтарды теориялық модельдермен салыстыру жүргізілді. Электротұндыру шарттарына байланысты CdS және CdTe нуклеациясы мен өсуі кезекті диффузиямен қиындатылған шапшаң нуклеациямен екіөлшемді 2D немесе үшөлшемді 3D өсу заңдылықтарымен өрнектелгені көрсетілген. Кадмий сульфидін шыныкөміртегі электродында электротұндыру үрдісі кезінде 2D шапшаң нуклеация механизмі орын алады. SnO₂/шыны электродында кадмий сульфиді 3D шапшаң нуклеация механизмі бойынша тұнады. CdS бетінде CdTe нуклеациясы мен өсуі 2D шапшаң нуклеация болып табылады. SnO₂/шыны подложкаларына электротұндыру әдісімен қапталған CdS қабатының беті тығыз орнатылған өлшемі ~20 нм болатын бөлшектерден тұрады. Өлшемі кіші ~8-20 нм болатын бөлшектер анықталды.

Түйін сөздер: нуклеация, кристаллизация кинетикасы, электрокристаллизация, кадмий теллурид, кадмий сульфиді.

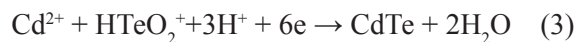
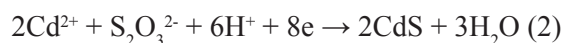
Введение

Использование электрохимических процессов в ходе приготовления тонких пленок полупроводников солнечного качества позволяет получать соединения строго заданного состава, контролировать состояние поверхности изготавливаемых пленок, получать наноразмерные частицы, устранять поверхностные дефекты, вводить необходимые добавки, получать пленки заданной толщины, большой площади и сложной геометрической конфигурации, существенно удешевить процесс производства, сделать его более технологичным и экологически чистым [1-14].

Одним из приоритетных направлений развития нанотехнологий [1] является модифицирование поверхности электродов наноразмерными объектами (монослои, островковые пленки, квантовые точки, ямы и проводники, нанопроволоки, нанопалочки, наноструктуры типа ядро-оболочка), обладающими многими специфическими свойствами, не присущими объемным кристаллическим системам. Это обусловило повышенное внимание к изучению процессов электрокристаллизации и электрохимической нуклеации наноразмерных полупроводниковых соединений на инородных подложках.

Сульфиды и теллуриды кадмия - полупроводники, обладающие высокой фоточувствительностью и имеющие подходящую ширину запрещенной зоны, наиболее часто применяются в процессе изготовления высокоэффективных тонкопленочных солнечных элементов на основе CdTe, CdSe, CuInSe₂ и Cu(InGa)Se₂. Электрохимическое осаждение позволяет создавать прочно связанные с поверхностью инородной подложки пленки CdS и CdTe заданной толщины, с частицами заданного размера и стехиометрического состава [2].

При создании гетероструктурного фотоэлемента p-CdTe/n-CdS для преобразования солнечного излучения в электрическую энергию широко используются гетеропереходы металл/полупроводник/металл, включающие CdS и CdTe, тонкие наноразмерные слои которых можно получить с помощью катодных реакций (1-3):



Одним из параметров, позволяющих существенно изменять электрофизические и оптические свойства электроосаждаемых CdS и CdTe, является потенциал катодного осаждения. На механизм нуклеации и роста CdS и CdTe при электроосаждении оказывают влияние природа подложки, величина потенциала электрода в процессе электрокристаллизации, время проведения процесса.

В данной работе исследован механизм электрокристаллизации и роста наноразмерных тонких пленок теллурида и сульфида кадмия.

Эксперимент

Исследования кинетики процесса нуклеации и роста электроосажденных нанокристаллов CdS и CdTe для тонкопленочных солнечных элементов выполнены с помощью универсального потенциостата-гальваностата IPC-PRO фирмы Volta с компьютерной обработкой данных и при использовании потенциостата-гальваностата GillAC с программным обеспечением ACMInstruments Version 5.

Вольтамперометрические измерения проводили в стандартной термостатированной трехэлектродной ячейке с разделенными катодным и анодным пространствами. В качестве вспомогательного электрода использовалась платиновая спираль с площадью поверхности 1,5 см². Электродом сравнения служил хлорсеребряный электрод (х.с.э.), относительно которого приведены все потенциалы.

Рабочими электродами для получения пленок CdS служила стеклоуглеродная пластина прямоугольной формы с видимой поверхностью 2,1 см² и электрод SnO₂/стекло с площадью рабочей поверхности 2,9 см². Перед проведением эксперимента поверхность рабочего стеклоуглеродного электрода подвергалась механической обработке с помощью абразивной бумаги или порошка Al₂O₃, затем промывалась дистиллированной водой. Электрод SnO₂/стекло обезжиривали этанолом, промывали дистиллированной водой. Выбраны температура (60°C), потенциалы электроосаждения (-0,6 В для стеклоуглеродного электрода и -1,3 В для электрода SnO₂/стекло). Использовали электролиты следующего состава: 0,3М CdSO₄ + 0,03М Na₂S₂O₃ с величи-

ной pH 2,00 в случае использования стеклоуглеродного электрода и 0,3M CdSO₄ + 0,3M Na₂S₂O₃ с величиной pH 5,15 при применении электрода SnO₂/стекло.

Пленки CdTe формировали в широком интервале потенциалов от -0,5 ÷ -0,8В на CdS-электроде, нанесенном на подложки SnO₂/стекло, имеющие два размера, с площадью видимой поверхности 2,5см² и 33,5 см². В этом случае подложку стекло/SnO₂/CdS-электрод готовили методом химического осаждения на стеклянные пластинки, покрытые прозрачным проводящим слоем SnO₂ при 90°C из водного раствора состава: 0,14M CdSO₄, 1,43M NH₄OH и 0,14M NH₂CSNH₂ [13]. Полученные тонкие пленки CdS имели проводимость n-типа. Электроосаждение CdTe проводили из серноокислых водных растворов, содержащих значительный избыток (в 1000 раз) катионных форм Cd(II), по отношению к соединениям Te(IV), величина pH = 1,6. Электролит содержал 0,5M CdSO₄, 5·10⁻⁴M K₂TeO₃ и 0,06M H₂SO₄. Методика электроосаждения CdTe аналогична используемой в работе [14].

Для исследования начальной стадии электрокристаллизации полупроводниковых соединений CdS и CdTe использован хроноамперометрический метод.

Результаты и обсуждение

Регистрация транзитных кривых в процессе получения сульфида кадмия в потенциостатическом режиме дает возможность определения механизма нуклеации и роста полупроводникового соединения. Известно [1, 15-19], что число активных центров в значительной мере определяет форму начального участка транзитной кривой (увеличение тока во времени в результате роста зародышей и их активной поверхности при кинетическом контроле) и области максимума (момент перекрывания полусферических диффузионных зон или зон омического падения напряжения, образующихся вокруг растущих поверхностей).

Увеличение тока во времени свидетельствует о зарождении и росте некоторого числа кристаллов. Последующее медленное уменьшение катод-

ного тока во времени до стационарного значения, при заданном потенциале, связано с процессами диффузии ионов к электроду. Форма транзитных кривых зависит от соотношения скоростей разряда ионов и их массопереноса. Эта зависимость соответствует уравнению [1, 17]:

$$I = \text{const} \cdot t^n \quad (4)$$

Константа в этом уравнении имеет некоторое различие для разных моделей нуклеации. Величина n позволяет определять тип нуклеации. Согласно [1, 17], для модели 2D-роста с мгновенной нуклеацией величина n равна единице, const представляет собой выражение:

$$K_1 = 2nF\pi(M/\rho)hN_0k^2 \quad n=1 \quad (5)$$

В случае модели 2D роста с прогрессивной нуклеацией величина n равна двум,

$$K_2 = nF\pi(M/\rho)hAN_0k^2 \quad n=2 \quad (6)$$

где N₀ – число начально растущих ядер на поверхности подложки, k – константа скорости для процесса роста (моль.см⁻².сек⁻¹), h – высота центра роста, M – молярная масса, ρ – плотность, A – константа скорости нуклеации

Если же механизм электрокристаллизации подчиняется 3D – модели, то величина n равна двум для мгновенной нуклеации и трем для прогрессивной нуклеации, const соответствует:

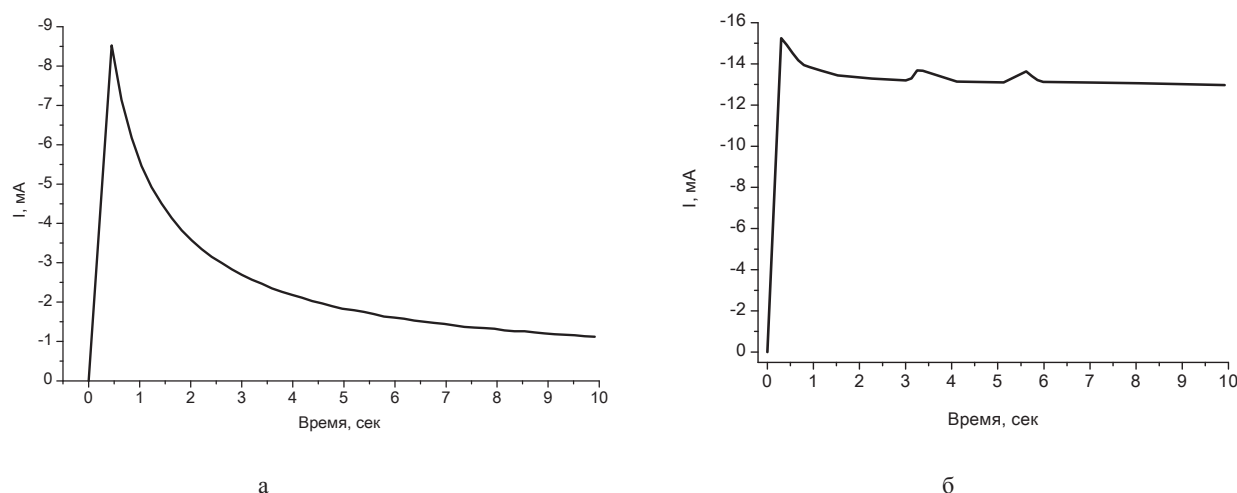
$$K_3 = 2nF\pi(M/\rho)^2N_0k^3 \quad n=2 \quad (7)$$

$$K_4 = nF\pi(M/\rho)^2AN_0k^3 \quad n=3 \quad (8)$$

Эти модели определяют тип нуклеации в первые секунды электроосаждения.

Электроосаждение CdS на стеклоуглеродные и SnO₂/стекло электроды

На рисунке 1 представлены кривые ток-время электроосаждения CdS на стеклоуглеродном электроде (а) и на электроде SnO₂/стекло (б). Изображенные на рисунке 1 хроноамперограммы имеют форму, характерную для процессов формирования и роста зародышей новой фазы.



а – стеклоуглеродный электрод, площадь видимой поверхности $2,1 \text{ см}^2$, потенциал электрода $-0,6 \text{ В (х.с.э.)}$, электролит содержит $0,3 \text{ М CdSO}_4$ и $0,03 \text{ М Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, $\text{pH } 2,00$
 б – электрод $\text{SnO}_2/\text{стекло}$, площадь видимой поверхности $2,9 \text{ см}^2$, потенциал электрода $-1,3 \text{ В (х.с.э.)}$, электролит содержит $0,3 \text{ М CdSO}_4$ и $0,3 \text{ М Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, $\text{pH } 5,15$

Рисунок 1 – Потенциостатические транзистенты тока стеклоуглеродного электрода (а) и электрода $\text{SnO}_2/\text{стекло}$ (б) при температуре 60°C

Для выяснения механизма нуклеации (мгновенной или прогрессивной) проведена начальная диагностика, включающая сопоставление экспериментальных и теоретических транзистентов в безразмерных координатах. С этой целью экспериментальные и теоретические транзистенты были стандартизированы по соответствующим максимальным величинам тока (I_{max}) и времени (t_{max}) с использованием уравнения Коттрела:

$$t_m = \frac{1,2564}{N_0 \pi K D} \quad (9)$$

Величина теоретического максимума для случая мгновенной нуклеации равна:

$$I_{\text{max}} = 0,6382 z F D c (K N_0)^{1/2} \quad (10)$$

Величина теоретического максимума для случая прогрессивной нуклеации:

$$t_{\text{max}} = (4,6733 / A N_0 \pi K D)^{1/2} \quad (11)$$

и

$$I_{\text{max}} = 0,4615 z F D^{3/4} c (K A N_0)^{1/4} \quad (12)$$

где D – коэффициент диффузии

На рисунке 2,а сопоставлены стандартизированные экспериментальные данные электро-

осаждения сульфида кадмия на стеклоуглеродную подложку и результаты теоретических расчетов с использованием уравнений (9-12) для мгновенной и прогрессивной нуклеации.

Анализ рисунка 2,а показывает, что в процессе электроосаждения сульфида кадмия на стеклоуглеродном электроде экспериментальные данные совпадают с рассчитанными по модели механизма 2D мгновенной нуклеации.

Анализ экспериментальных хроноамперограмм при электроосаждении CdS на электроде $\text{SnO}_2/\text{стекло}$ (рисунок 1,б) свидетельствует о том, что осаждение сульфида кадмия соответствует трехмерному росту по механизму мгновенной нуклеации по 3D типу. Это связано с тем, что на таком электроде уже присутствуют центры нуклеации, и толщина пленки SnO_2 составляет $0,2 \text{ мкм}$.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о влиянии природы подложки, потенциала электрода и состава электролита на механизм нуклеации и роста сульфида кадмия.

Анализ поверхностных свойств пленок SnO_2 (рисунок 3,а), и пленок CdS , осажденных на подложку $\text{SnO}_2/\text{стекло}$ (рисунок 3,б), выполнили с помощью атомного силового микроскопа JSPM-5200.

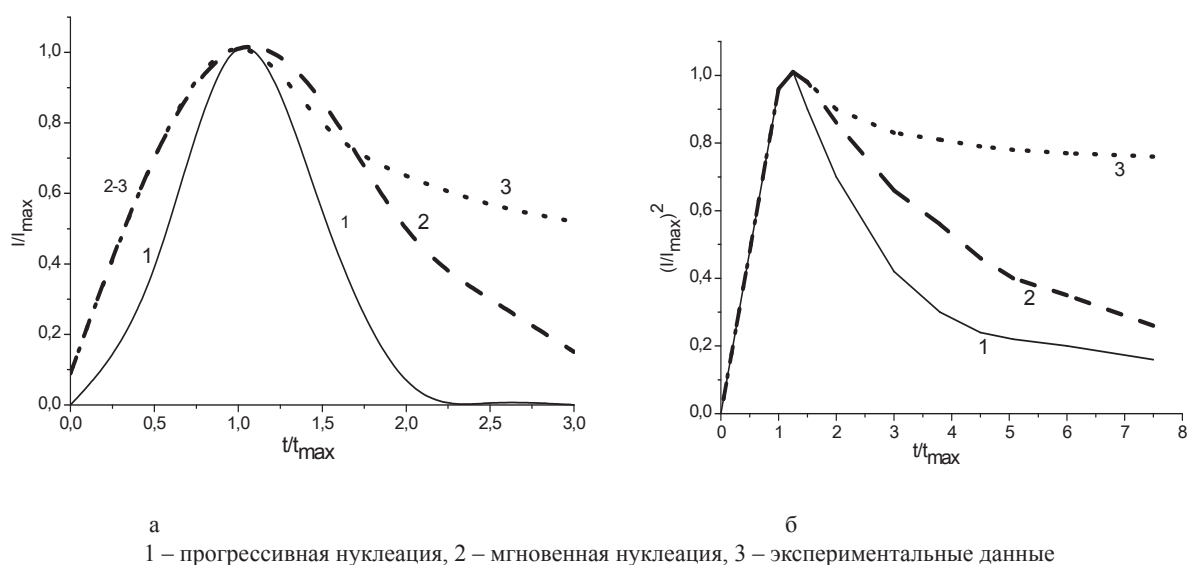


Рисунок 2 – Сопоставление теоретических безразмерных величин (I/I_{\max}) для осаждения CdS на стеклоуглеродную подложку (а) и $(I/I_{\max})^2$ для осаждения CdS на $\text{SnO}_2/\text{стекло}$ (б) относительно (t/t_{\max}) для уравнений мгновенной и прогрессивной нуклеации CdS с экспериментальными данными из рисунка 1,а,б

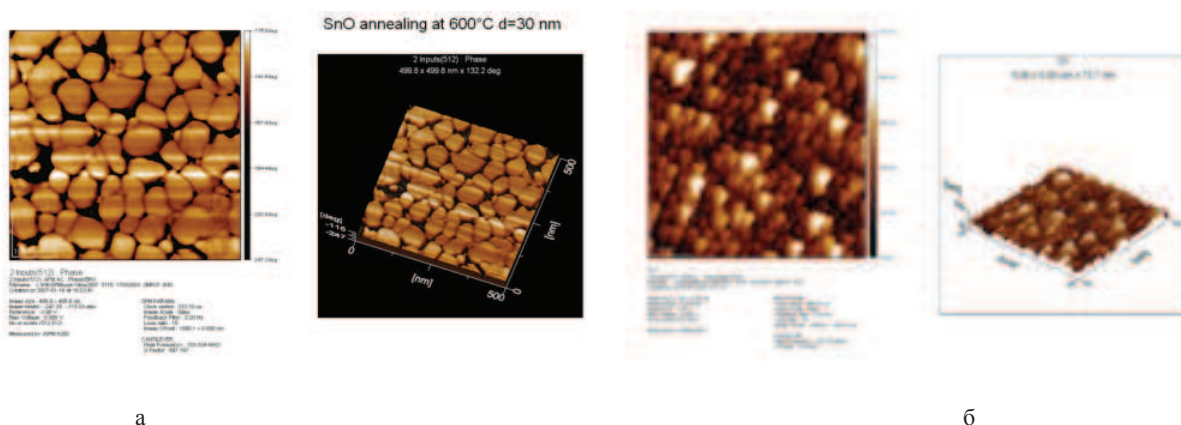


Рисунок 3 – Микрофотографии пленки SnO_2 , полученной ионно-лучевым осаждением на стекло (а), микрофотографии осадка CdS на $\text{SnO}_2/\text{стекло}$ (б)

Поверхность стекла (рисунок 3, а) равномерно покрыта мелкими частицами SnO_2 . Самая мелкая частица SnO_2 имеет диаметр 40,6 нм, ее высота равна 13,5 нм. Крупные частицы SnO_2 , составленные из более мелких, встречаются редко, их максимальный диаметр не превышает 115 нм. Поверхность неоднородная. Минимальная величина шероховатости поверхности равна 6,6 нм. Средняя шероховатость составляет 41,4 нм. Коэффициент, характеризующий отношение площади поверхности исследуемого образца к площади идеальной поверхности, составляет 1,19. Поверхность слоя CdS, нанесенного методом электроосаждения (рисунок

3,б) на слой оксида олова, представляет плотный слой ориентированных частиц с размером ~ 20 нм. Важным оказался факт наличия частиц с меньшими размерами $\sim 8-20$ нм, равномерно распределенных по поверхности. Анализ поверхности подтверждает выводы об образовании 3D структуры осадков сульфида кадмия на $\text{SnO}_2/\text{стекло}$.

Электроосаждение CdTe на $\text{CdS}/\text{SnO}_2/\text{стекло}$ электроды

Использование для преобразования солнечного излучения в электрическую энергию гетероструктурного фотоэлемента p-CdTe/n-CdS/

SnO₂/стекло обусловило необходимость подробного изучения механизма нуклеации и роста CdTe на поверхности CdS-электрода.

Электроосаждение выполняли по методике [14] при постоянном потенциале электрода. Кинетику нуклеации и роста осадков теллурида кадмия, изучали хроноамперометрическим методом путем построения кривых зависимости тока от времени.

Ранее было показано, что в процессе электроосаждения Cd²⁺ восстанавливается на поверхности, предварительно покрытой теллуrom, при потенциалах на 300 мВ более положительных, чем его стандартный потенциал по реакции (13). При этом образование монослоя Te на поверхности подложки не является необходимым, нуклеации Te достаточно для начала процесса образования CdTe [14,16]:



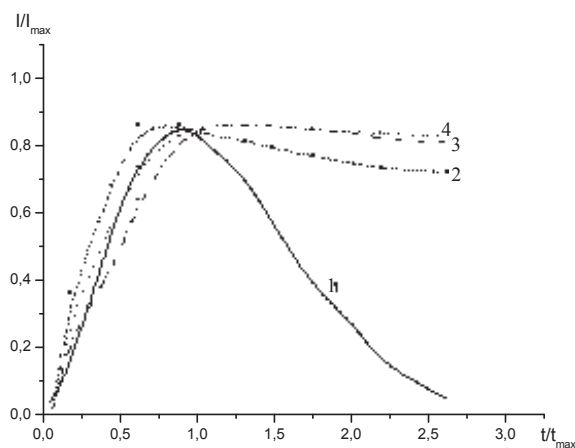
В первые секунды электроосаждения CdTe происходит мгновенный рост тока, который достигает максимальной величины, а затем пада-

ет. Минимальный ток, включающий зарядку двойного слоя, отсутствует.

Выявление возможности электрокристаллизации теллурида кадмия на сульфидкадмиевом электроде согласно механизмам 2D или 3D было осуществлено путем использования соответствующих моделей и построением зависимости $I/I_{\max} - t/t_{\max}$ и $(I/I_{\max})^2 - (t/t_{\max})$ для подложек различной площади.

Из экспериментальных данных и теоретических расчетов следует, что нуклеация и рост CdTe на поверхности CdS является двумерным 2D ростом с мгновенной нуклеацией. Восходящий участок I-t кривой может быть отнесен к модели мгновенной 2-D нуклеации/роста с $t/t_{\max} = 0,5$. В этой модели можно представить, что кадмий осаждается на периферии расширенных ядер теллура. При длительном времени электролиза ядра перекрываются, и появляющийся диффузионный контроль приводит к падению тока в зависимости от $t^{1/2}$.

На рисунке 4,а представлены зависимости, полученные для образцов с поверхностью электрода 2,5 см².

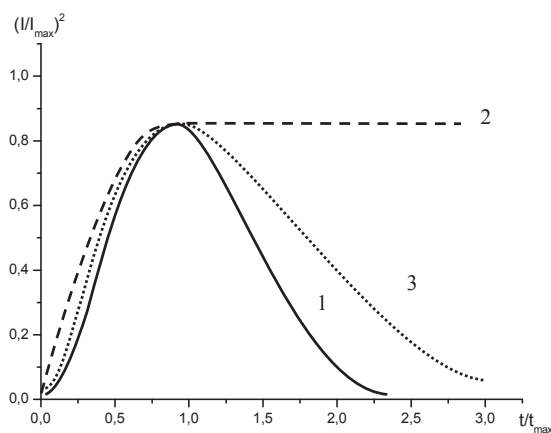


а

а – Площадь электрода 2,5 см²; 1 – модель мгновенной нуклеации; 2-4 – эксперимент: 2 -E_{ос.} = - 0,55В;

3 -E_{ос.} = - 0,6В; 4 -E_{ос.} = - 0,7 В

б –Площадь электрода 33,5 см²; 1 – модель прогрессивной нуклеации; 2 – модель мгновенной нуклеации; 3 – экспериментальная кривая для E = - 0,65В



б

Рисунок 4 – Сопоставление теоретических безразмерных величин (I/I_{\max}) относительно (t/t_{\max}) для уравнений мгновенной и прогрессивной нуклеации CdTe на поверхности электрода CdS/SnO₂/стекло с экспериментальными данными

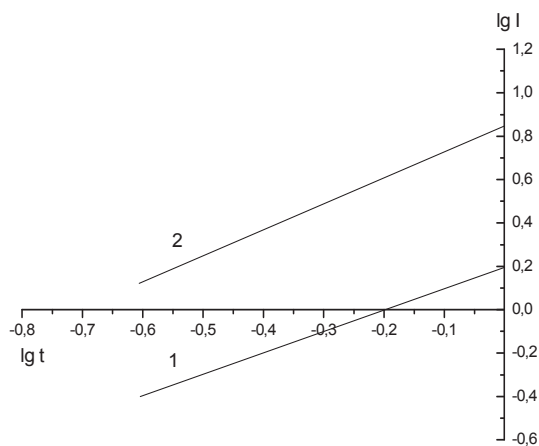
Аналогичные результаты по изучению зависимости тока электроосаждения от времени получены для электродов большой поверхности

(рисунок 4,б). Экспериментальная зависимость тока электроосаждения соответствует расчетной кривой согласно 2D модели мгновенной

нуклеации. Вначале, вплоть до $t/t_{\max} = 0,5$, экспериментальная кривая соответствует 2D модели мгновенной нуклеации, далее происходит ее отклонение вследствие диффузионных процессов, которые могут быть обусловлены как уменьшением количества ионов теллура вблизи электрода, так и уменьшением проводимости

теллурида кадмия. Скорость нуклеации уменьшается с увеличением заполнения поверхности ад-атомами.

Билогарифмическая зависимость тока электроосаждения от времени $\lg I - \lg t$ (рисунок 5) имеет наклон равный 1, что соответствует 2D нуклеации CdTe на поверхности CdS [11, 15].



1 - $E_{oc} = -0,6V$, $S = 2,5 \text{ cm}^2$; 2 - $E_{oc} = 0,65V$, $S = 33,5 \text{ cm}^2$

Рисунок 5 – Билогарифмическая зависимость тока от времени для подложек с различной площадью

Для определения лимитирующей стадии процесса электрокристаллизации, информацию о которой дает анализ зависимости тока от времени, были построены зависимости тока от t^2 и $t^{1/2}$. Как известно, ток электроосаждения пропорционален t^2 для условий замедленного

разряда, для диффузионного и омического контроля ток пропорционален $t^{1/2}$ [1]. На графике $I-t^2$ наблюдается прямая линия для первых секунд осаждения, соответствующая кинетическому контролю начальной стадии нуклеации CdTe (рисунок 6).

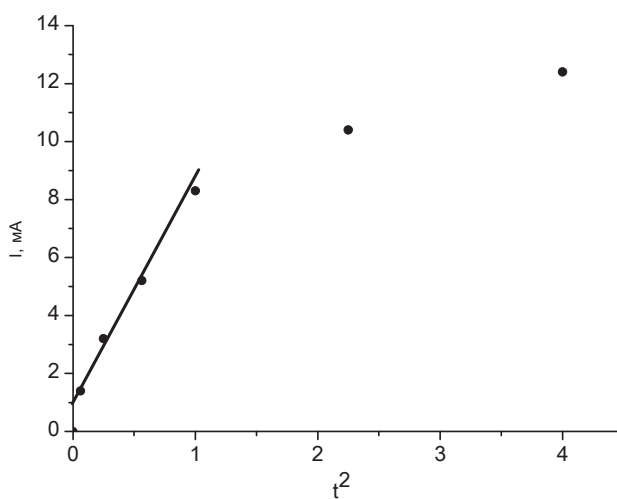


Рисунок 6 – Зависимость тока электроосаждения от времени t^2 . $E_{oc} = -0,6V$, $S = 2,5 \text{ cm}^2$

Полученные экспериментальные данные делают возможным предположение, что процесс восстановления, происходящий благодаря образованию соединения $\text{Cd}_{\text{ad}}\text{Te}$, приводит к синтезу 2D структур, в которых координационное число как металла, так и халькогена в отношении друг к другу меньше, чем в кристаллах CdTe . Координационная насыщенность Cd_{ad} в 2D структурах достигается благодаря взаимодействию с

компонентами электролита и диполями воды. 2D-островки Cd_{ad} , образующиеся в потенциостатических условиях, срastaются со временем, и процесс сопровождается диффузией металла на периферию атомов теллура.

Изучение морфологии поверхностных свойств CdTe свидетельствует об образовании наноразмерных частиц, которые формируются в виде колончатых зерен (рисунок 7).

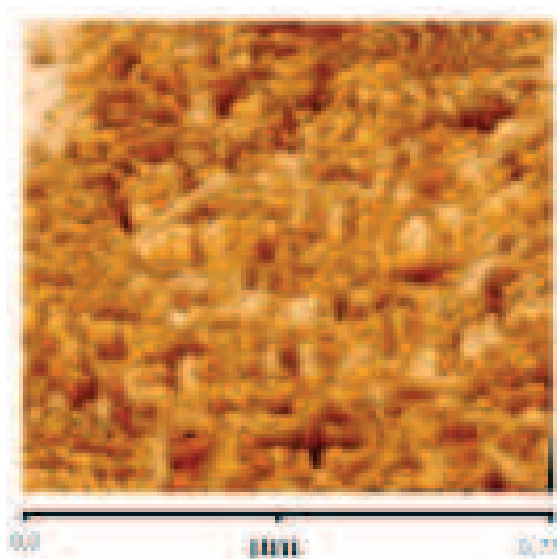


Рисунок 7 – Микрофотография поверхности CdTe/CdS/SnO_2 стекло, полученная с помощью атомного силового микроскопа JSPM-5200. Размер 750×750 нм

Заключение

Таким образом, проведение исследования кинетики процесса нуклеации и роста электроосажденных нанокристаллов CdS и CdTe для солнечных элементов методом хроноамперометрии позволило установить, что в зависимости условий электроосаждения, нуклеация и рост CdTe и CdS описываются закономерностями двумерного 2D или трехмерного 3D роста с мгновенной нуклеацией, осложненной последующей диффузией.

В процессе электроосаждения сульфида кадмия на стеклоуглеродном электроде имеет место механизм 2D мгновенной нуклеации. Сульфид кадмия на электроде SnO_2 /стекло электроосаждается по механизму мгновенной нуклеации, по 3D типу. Нуклеация и рост CdTe на поверхности CdS является двумерным 2D ростом с мгновенной нуклеацией.

В результате электролиза возможно формирование наноразмерных частиц сульфида и теллурида кадмия.

Литература

- 1 Дамаскин Б.Б., Петрий О.А., Цирлина Г.А. Электрохимия. – М.: Колос, 2006. – 672 с.
- 2 Дергачева М.Б. Электроосаждение полупроводников // Вестн. КазНУ. – 2007. – №2(46). – С.128-139.
- 3 Дергачева М.Б., Гуделева Н.Н., Бекмухаметова Ф.С., Салаева З.П. Электрохимическое поведение CdS/Cd электрода в растворах электролитов, содержащих сульфид-ионы // Журн. общ. Химии. – 1999. – Т. 69, № 10. – С.1615–1619.
- 4 Дергачева М.Б., Чайкин В.В., Пантлеева Е.П. Электроосаждение соединения CuSe_x на углеродсодержащих электродах // Журн. Прикл. Химии. – 2004. – Т. 77, № 8. – С. 1289–1294.
- 5 Дергачева М.Б., Чайкин В.В. Электроосаждение полупроводниковых пленок CuInSe_2 на стеклоуглеродном электроде из сернокислых электролитов // Журн. Прикл. Химии. – 2008. – Т. 81, № 4. – С. 576–579.

- 6 Дергачева М.Б., Уразов К.А., Чайкин В.В. Получение пленочных полупроводников состава $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ методом электроосаждения //Сб. Докл. VI Международного Беремжановского съезда по химии и хим. технологии. - Караганда, 2008. - С.234-238.
- 7 Дергачева М.Б., Уразов К.А., Пенькова Н.В., Гуделева Н.Н. Электроосаждение полупроводниковых пленок CuInSe_2 на молибденовом электроде //Журн. Прикл. Химии. - 2010. - Т. 83, № 4. - С.601-605.
- 8 Дергачева М.Б., Пенькова Н.В., Ким И.Э. Электроосаждение теллурида кадмия из электролитов на основе этиленгликоля //Журн. Прикл. Химии. - 2010. Т. 83, № 3. - С.431-434.
- 9 Дергачева М.Б., Маева К.А., Гуделева Н.Н., Уразов К.А., Григорьева В.П. Влияние освещения на электрохимическое осаждение селена (IV) //Изв. НАН РК. Серия химии и технологии. - 2012, № 5. - С.54-61.
- 10 M.B. Dergacheva, K.A. Urazov, K.A. Mit, K.A. Mayeva. AFM studies of ZnS thin films produced by electrodeposition // The 3-rd International Symposium on Nanotechnology, Energy and Space. - Almaty, 2013. - P.60-61.
- 11 Dergacheva M.B., Mayeva K.A., Mit K.A., Urazov K.A., Khussurova G.M. The investigation of the surface of CdS films, prepared by electrodeposition in galvanostatic mode// The 3-rd International Symposium on Nanotechnology, Energy and Space. - Almaty, 2013. - P.62-63.
- 12 Дергачева М.Б., Уразов К.А., Мить К.А., Гуделева Н.Н., Григорьева В.П. Состав и морфология поверхности пленок CuInSe_2 , электроосажденных на молибдене//Физика и химия обр. матер. - 2013, №4. - С.39-44.
- 13 Дергачева М.Б., Гуделева Н.Н., Пенькова Н.В., Чайкин В.В., Малахов В.А., Комашко Л.В., Григорьева В.П. Метод химического осаждения тонких пленок CdS на подложки SnO_2 /стекло при изготовлении тонкопленочных фотоэлементов//Изв. НАН РК. Сер. Хим. - 2007, № 3. - С. 55-62.
- 14 Дергачева М.Б., Гуделева Н.Н., Пенькова Н.В., Хусурова Г.М., Матакова Р.Н., Григорьева В.П. Электроосаждение CdTe на пленочном CdS электроде. II. Электрохимические процессы при совместном восстановлении ионов Cd(II) и Te(IV)//Изв. НАН РК. Сер. Хим. - 2005, № 3. - С. 36-45.
- 15 Руднев А.В., Запрянова Т., Молодкина Е.Б., Данилов А.И., Полукаров Ю.М. Начальные стадии электрокристаллизации меди на поликристаллической платине и стеклоуглероде в присутствии ацетонитрила //Электрохимия. - 2008. - Т. 44, № 7. - С. 906-913.
- 16 Рабчинский С. М., Багаев С. И., Стрельцов Е. А. Атомные слои кадмия на Те-электродах //Электрохимия. - 2006. - Т. 42, № 8. - С.916-923.
- 17 Mori E., Rajeshwar R. The kinetics of electrocrystallization of tellurium and cadmium telluride at the glassy carbon surface //J. Electroanal. Chem. - 1989. - Vol. 258. - P. 415-429.
- 18 Valderrama R.C., Miranda-Hernandez M., Sebastian P.J., Ocampo A.L. Electrodeposition of indium onto Mo/Cu for the deposition of Cu(In,Ga)Se_2 thin films //Electrochim. Acta. - 2008. - Vol. 53. - P. 3714- 3721.
- 19 Scharifker B.R., Mostany J. Three-dimensional nucleation with diffusion controlled growth. Part I. Number density of active sites and nucleation rates per site // J. Electroanal. Chem. - 1984. - Vol.177, № 1-2. - P.13 -23.

References

- 1 Damaskin B.B., Petriy O.A., Tsirlina G.A. Elektrokhimiya. - M.: Kolos, 2006. 672 p. (in Russ.)
- 2 Dergacheva M.B. Electrodeposition of semiconductors. [ElectroElektroosajdenie poluprovodnikov]. Vestnik KazNU. Ser. Khim. - KazNU Bulletin. Chem. ser. 2007. 2(46). P. 128-139. (in Russ.)
- 3 Dergacheva M.B., Gudeleva N.N., Bekmukhametova F.S., Salaeva Z.P. Electrochemical behavior of CdS / Cd electrode in an electrolyte solution containing sulfide ions. [Elektrokhimicheskoe povedenie CdS/Cd elektroda v rastvorakh elektrolitov, soderzhashchikh sul'fid-iony] Journ. obshch. Khimii. 1999. 69 (10). P.1615-1619. (in Russ.)
- 4 Dergacheva M.B., Chaikin V.V., Pantileeva E.P. Electrochemical behavior of CdS / Cd electrode in an electrolyte solution containing sulfide ions. [Elektroosazhdenie soedineniya CuSe_x na uglerodsoderzhashchikh elektrodakh]. Journ. Appl.chem. - Journ. prikl. khimii. 2004. 77(8). P. 1289-1294. (in Russ.)
- 5 Dergacheva M.B., Chaikin V.V. Electrodeposition of CuInSe_2 semiconductor films on glassy carbon electrode from sulfuric acid electrolytes. [Elektroosazhdenie poluprovodnikovyykh plenok CuInSe_2 na steklogludnerodnom electrode iz sernokislykh elektrolitov]. Journ. Appl.chem. - Journ. prikl. Khimii. 2008. 81(4). P. 576-579. (in Russ.)
- 6 Dergacheva M.B., Urazov K.A., Chaikin V.V. Poluchenie plenochnykh poluprovodnikov sostava $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ metodom elektroosajdeniya. Sb. Dokl. VI Mezhdunarodnogo Beremzhanovskogo s'ezda po khimii i khim. tekhnologii. Karaganda. 2008. P. 234-238. (in Russ.)
- 7 Dergacheva M.B., Urazov K.A., Pen'kova N.V., Gudeleva N.N. Electrodeposition of CuInSe_2 semiconductor films on glassy carbon electrode from sulfuric acid electrolytes. [Elektroosajdenie oluprovodnikovyykh plenok CuInSe_2 na molibdenovom electrode]. Journ. Appl.chem. - Journ. prikl. Khimii. 2010. 83(4). P.601-605. (in Russ.)
- 8 Dergacheva M.B., Pen'kova N.V., Kim I.E. Electrodeposition of cadmium telluride of electrolytes based on ethylene glycol. [Elektroosajdenie telluride kadmiya iz elektrolitov na osnove etilenglikolya. Journ. Appl.chem. - Journ. prikl. Khimii. 2010. 83(3). P.431-434. (in Russ.)
- 9 Dergacheva M.B., Mayeva K.A., Gudeleva N.N., Urazov K.A., Grigir'eva V.P. [Vliyanie osveshcheniya na elektrokhimicheskoe osazhdenie selena (IV)]. Izv. NAN RK. Seriya khim. i khim. tekhnol. 2012, 5. P. 54-61. (in Russ.)
- 10 Dergacheva M.B., Urazov K.A., Mit K.A., Mayeva K.A. AFM studies of ZnS thin films produced by electrodeposition. The 3-rd International Symposium on Nanotechnology, Energy and Space. Almaty, 2013. P.60-61. (in Eng.)

- 11 Dergacheva M.B., Mayeva K.A., Mit K.A., Urazov K.A., Khussurova G.M. The investigation of the surface of CdS films, prepared by electrodeposition in galvanostatic mode. The 3-rd International Symposium on Nanotechnology, Energy and Space. Almaty, 2013. P.62-63. (in Eng.)
- 12 Dergacheva M.B., Urazov K.A., Mit K.A., Gudeleva N.N., Grigir'eva V.P. /Sostav i morfologiya poverkhnosti plenok CuInSe₂, elektroosazhdennykh na molibdene/ Fizika i khimiya obr. mater. 2013, no 4. P. 39-44. (in Russ.)
- 13 Dergacheva M.B., Gudeleva N.N., Pen'kova N.V., Chaikin V.V., Malakhov V.A., Komashko L.V., Grigir'eva V.P. /Metod khimicheskogo osazhdeniya tonkih plenok CdS na podlozhki SnO₂/steklo pri izgotovlenii tonkoplenochnikh aotoelementov/. Izv. NAN RK. Seriya khim. i khim. tekhnol. 2007, no 3. P. 55-62. (in Russ.)
- 14 Dergacheva M.B., Gudeleva N.N., Pen'kova N.V., Khussurova G.M., Matakova R.N., Grigir'eva V.P. Elektroosajdenie CdTe na plenochnom CdS electrode. II. /Elektrokhimicheskie processi pri sovmestnom vosstanovlenii ionov Cd(II) i Te(IV) J. Izv. NAN RK. Seriya khim. 2005, no 3. S. 36-45. (in Russ.)
- 15 Rudnev A.V., Zapryanova T., Molodkina E.B., Danilov A.I., Polukarov Yu.M. /Nachal'nye stadia elektrokristallizatsii medi na polikristallicheskoj platine i steklogl'uglerode v prisutstvii atsetonitrila/. *Elektrokhimiya. – Electrochemistry*. 2008. 44(7). P. 906-913. (in Russ.)
- 16 Rabchinskiy S.M., Bagaev S.I., Strel'tsov E.A. /Atomnye sloi kadmiya na Te-elektrodakh/. *Elektrokhimiya – Electrochemistry*. 2006. 42(8). SC. 916-923. (in Russ.)
- 17 Mori E., Rajeshwar R. The kinetics of electrocrystallization of tellurium and cadmium telluride at the glassy carbon surface. *J. Electroanal. Chem.* 1989. 258. P. 415-429. (in Eng.)
- 18 Valderrama R.C., Miranda-Hernandez M., Sebastian P.J., Ocampo A.L. Electrodeposition of indium onto Mo/Cu for the deposition of Cu(In,Ga)Se₂ thin films. *Electrochim. Acta*. 2008. 53. P. 3714- 3721. (in Eng.)
- 19 Scharifker B.R., Mostany J. Three-dimensional nucleation with diffusion controlled growth. Part I. Number density of active sites and nucleation rates per site. *J. Electroanal. Chem.* 1984. 177(1-2). P.13 -23. (in Eng.)