

M. B. Dergacheva<sup>1</sup>, A. K. Zhanabaeva<sup>1</sup>,  
D. S. Puzikova<sup>1</sup>, V. I. Yaskevich<sup>1</sup>, V. F. Gremenok<sup>2</sup>

<sup>1</sup>D. V. Sokolsky Institute of fuel, catalyse and electrochemistry, Almaty, Kazakhstan,

<sup>2</sup>State Scientific and Production Association «Scientific-Practical Materials Research Centre  
of the National Academy of Sciences of Belarus», Minsk, Belarus,

E-mail: a.k.zhanabaeva@mail.ru, gremenok@ifftp.bas-net.by

## THE ELECTRODEPOSITION OF GALLIUM SELENIDE

**Abstract.** The electrochemical deposition of gallium selenide on a glassy carbon electrode from sulphate electrolytes at a constant potential was carried out. The cyclic voltammetric curves of the glassy carbon electrode in two different electrolytes were studied: sulfuric acid and citrate buffer solution containing gallium and selenium ions. The influence of change in the concentration of gallium ions and the deposition potential on the composition of the resulting precipitate is studied. Increasing of the gallium ions concentration from  $6 \cdot 10^{-3}$  M to  $1 \cdot 10^{-1}$  M at a constant concentration of selenium ions  $2 \cdot 10^{-3}$  M in the electrolyte leads to an increase in the gallium content in the deposit composition. It is established that in order to obtain the stoichiometric composition of the film, the content of gallium (III) ions in the electrolyte must be many times higher than the content of selenium (IV) ions. The results of elemental analysis of the precipitate confirmed that a film of gallium selenide with a content of 26.7 at% gallium was obtained at a ratio of the concentration of gallium ions and selenium of 50: 1 in the sulphate electrolyte at a potential of -0.8 V. Investigation of the morphology of the surface showed that a uniform coating of the surface of the glassy carbon electrode is achieved at potentials of -0.8 and -0.9 V. X-ray phase analysis confirmed the presence of the  $Ga_2Se_3$  phase in the resulting films.

**Keywords:** gallium selenide, electrodeposition, voltamperometry, thin films.

УДК 541.13

М. Б. Дергачева<sup>1</sup>, А. К. Жанабаева<sup>1</sup>,  
Д. С. Пузикова<sup>1</sup>, В. И. Яскевич<sup>1</sup>, В. Ф. Гременок<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д. В. Сокольского, Алматы, Казахстан,

<sup>2</sup>Научно-практический центр материаловедения Белорусской академии наук, Минск, Белоруссия

## ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ СЕЛЕНИДА ГАЛЛИЯ

**Аннотация.** Проведено электрохимическое осаждение селенида галлия на стеклоуглеродном электроде из сернокислых электролитов при постоянном потенциале. Исследованы циклические вольтамперные кривые стеклоуглеродного электрода в двух различных электролитах: сернокислом и цитратном буферном растворе, содержащих ионы галлия и селена. Исследовано влияние изменения концентрации ионов галлия и потенциала осаждения на состав получаемого осадка. Увеличение концентрации ионов галлия от  $6 \cdot 10^{-3}$  М до  $1 \cdot 10^{-1}$  М при постоянной концентрации ионов селена  $2 \cdot 10^{-3}$  М в электролите приводит к увеличению содержания галлия в составе осадка. Установлено, что для получения стехиометрического состава пленки содержание ионов галлия(III) в электролите должно во много раз превышать содержание ионов селена (IV). Результаты элементного анализа осадка подтвердили, что при соотношении концентраций ионов галлия и селена 50:1 в сернокислом электролите, при потенциале -0,8В получили пленку селенида галлия с содержанием 26,7 ат% галлия. Исследование морфологии поверхности показало, что однородное покрытие поверхности стеклоуглеродного электрода достигается при потенциалах -0,8 и -0,9В. Рентгенофазовый анализ подтвердил наличие фазы  $Ga_2Se_3$  в полученных пленках.

**Ключевые слова:** селенид галлия, электроосаждение, вольтапмерметрия, тонкие пленки.

**Введение.** Полупроводниковые соединения III-VI группы привлекают большое внимание исследователей благодаря подходящим структурным и оптическим свойствам для применения в фотоэлектронных преобразователях [1]. К этой группе относятся моноселенид галлия GaSe, который имеет гексагональную структуру с оптической шириной запрещенной зоны 2,1 эВ, и содержит слои Se-Ga-Ga-Se и диселенид галлия Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, который имеет кубическую структуру с шириной запрещенной зоны 1,8-2,6 эВ [2, 3] и кристаллизуется в α-и β-структурных модификациях. В структуре Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> одна треть катионных центров свободна, поэтому структура соединения является дефектной. В свою очередь дефектные соединения используются в оптоэлектронных устройствах для пассивации гетерогенных соединений, для переключения памяти светоизлучающих диодов [4], в сочетании с подложкой GaP [5]. Существует множество методов получения селенида галлия. К таким методам относится химическое осаждение из паровой фазы (CVD) [6], химический перенос пара в вакууме [7], парофазная эпитаксия [8], гетеровалентная реакция обмена V-VI [9], термическое испарение [10], молекулярно-пучковая эпитаксия [11, 12]. Самый известный метод Стокбаргер-Бриджмена [13] получения монокристаллов селенида галлия Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> представляет собой синтез при направленной кристаллизации, когда в специальной печи протягивается кварцевая ампула с материалом и нагревается до 1473 К с последующим медленным снижением температуры. Этот метод требует высокой чистоты материалов, высокого вакуума и температуры. Тонкие пленки Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> могут быть получены золь-гель методом при температуре образования кристаллов [14]. По сравнению с выше описанными, метод электроосаждения из водных растворов для получения тонких пленок на проводящих подложках обладает рядом преимуществ и относится к недорогим методам, позволяя контролировать толщину, морфологию и состав пленки в процессе осаждения [15-17].

В настоящей работе рассмотрены условия электроосаждения селенида галлия на стеклоуглеродном электроде при постоянном потенциале.

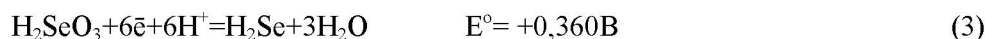
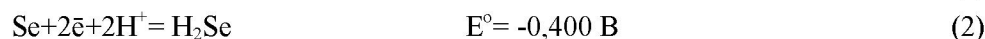
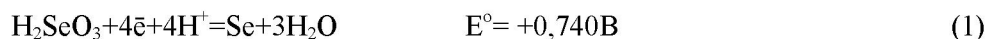
**Методы исследования.** Вольтамперные измерения на дисковом стеклоуглеродном электроде с площадью 0,07 см<sup>2</sup> и электроосаждение селенида галлия на плоских стеклоуглеродных пластинах, площадью 1,0 см<sup>2</sup>, выполнялись в трехэлектродной термостатированной стеклянной ячейке с использованием хлорсеребряного электрода сравнения и платинового противоэлектрода. Перед экспериментом электроды обрабатывали тонкой абразивной бумагой 2000, промывали дистиллированной водой и сушили на воздухе. В качестве фоновых электролитов использовали сернокислый электролит с pH=2,2 (0,45M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0,05M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) и цитратный буферный электролит с pH=2,92. Последний готовили из 39,3 мл 0,1M цитрата натрия и 60,7 мл 0,1н HCl. Использовали растворы солей галлия и селена марки (ч.д.а) 0,1M Ga<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, 0,1M NaHSeO<sub>3</sub> и 1M GaCl<sub>3</sub>. В исследованных электролитах изменяли концентрацию ионов галлия от 6·10<sup>-3</sup> до 1,2·10<sup>-1</sup> М и поддерживали постоянную концентрацию ионов селена (2·10<sup>-3</sup> М).

Электроосаждение селенида галлия проводилась при постоянном потенциале, который поддерживался с помощью потенциостата GillAC с программным обеспечением ACM Instruments Version 5 и при температуре 70°C, которая поддерживалась с помощью термостата LOIP, перемешивание электролита осуществляли магнитной мешалкой ММЗМ. После осаждения пленки промывали в дистиллированной воде и сушили на воздухе. Элементный анализ на содержание компонентов и микрофотографии поверхности пленок селенида галлия были получены с помощью электронного сканирующего микроскопа с возможностями микроанализа «JSM6610 LV» фирмы JEOL (Япония). Фазовый состав пленок определяли с помощью прибора ДРОН-4/07 с Со-трубкой.

**Результаты и обсуждение.** *Вольтамперные измерения на дисковом стеклоуглеродном электроде.* Для определения влияния концентрации компонентов в электролите на процесс электрохимического восстановления ионов были записаны циклические вольтамперные зависимости (ЦВА) стеклоуглеродного электрода в сернокислом электролите и в цитратном буферном растворе. Скорость сканирования потенциала составляла 20 мВ/с в интервале от 0 до -1,0В, и при обратной развертке потенциала от -1,0 до +1,2В. Исследовали электролиты с различной концентрацией ионов галлия (6·10<sup>-3</sup> М, 1,2·10<sup>-2</sup> М, 6·10<sup>-2</sup> М, 8·10<sup>-2</sup> М, 1·10<sup>-1</sup> М и 1,2·10<sup>-1</sup> М) при постоянной концентрации ионов селена (2·10<sup>-3</sup> М).

На рисунке 1 приведены ЦВА стеклоуглеродного электрода при восстановлении ионов Se(IV) и Ga(III), снятые в сернокислом электролите. Из рисунка видно, что катодный ток возрастает уже

при 0В потенциала, что свидетельствует о восстановлении Se(IV), которое начинается при более положительных потенциалах. На врезке рисунка 1 приведена ЦВА восстановления Se(IV) ( $2 \cdot 10^{-3} \text{M}$ ) на фоне сернокислого электролита, снятая при катодной развертке потенциала от +0,3 до -1,0 В. Восстановление Se(IV) сопровождается также появлением двух пиков тока при потенциалах около нуля В и при потенциале -0,5 В. Процессы восстановления и стандартные потенциалы описываются уравнениями:



В области потенциалов -0,5В возможно восстановление Se(IV) по уравнениям (2 и 3) с образованием селенид ионов.

Ионы галлия не восстанавливаются на стеклогуглеродном электроде в изученном интервале потенциалов (рисунок 2). ЦВА стеклогуглеродного электрода в сернокислом электролите демонстрируют отсутствие пиков тока при изменении концентрации ионов галлия от  $5 \cdot 10^{-4}$  до  $1 \cdot 10^{-2} \text{M}$ .

При добавлении ионов галлия в электролит (рисунок 1, кривые 3-6) меняется ток первого пика, форма пика тока при -0,5В становится сглаженной, ток восстановления продолжается до -0,85 В и достигает области восстановления водорода.

Анализ анодной части ЦВА свидетельствует, что при максимальном содержании галлия в электролите, равном  $1 \cdot 10^{-3} \text{M}$  на электроде осаждается максимальное количество селена в составе соединения с галлием. Селен из соединения окисляется при потенциалах, близких к +1,0 В.



Полученные результаты свидетельствуют, что образование соединения протекает при потенциалах -0,8 и -0,9В с участием ионов селенида за счет химической реакции положительно заряженных ионов галлия с отрицательно заряженными ионами селена.

ЦВА в цитратном буферном растворе показали, что при совместном присутствии ионов селена и галлия в электролите токи восстановления увеличиваются при увеличении концентрации галлия. При содержании Ga(III)  $6 \cdot 10^{-3}$   $1,2 \cdot 10^{-2}$  профиль кривых совпадает с приведенными на рисунок 1 для сернокислого электролита. При увеличении концентрации галлия (рисунок 3, кривые 3,4) до  $8 \cdot 10^{-2} \text{M}$  токи восстановления при  $E = -0,5\text{В}$  увеличиваются, и при  $E = -0,85\text{В}$  появляется дополнительный четко выраженный пик тока, который может характеризовать восстановление ионов галлия на стеклогуглеродном электроде, покрытом селеном. Анализ анодной ветви ЦВА также показывает, что на электроде в процессе восстановления формируется осадок соединения селена с галлием, потенциал окисления которого лежит в области потенциала +1,0 В (рисунок 3).

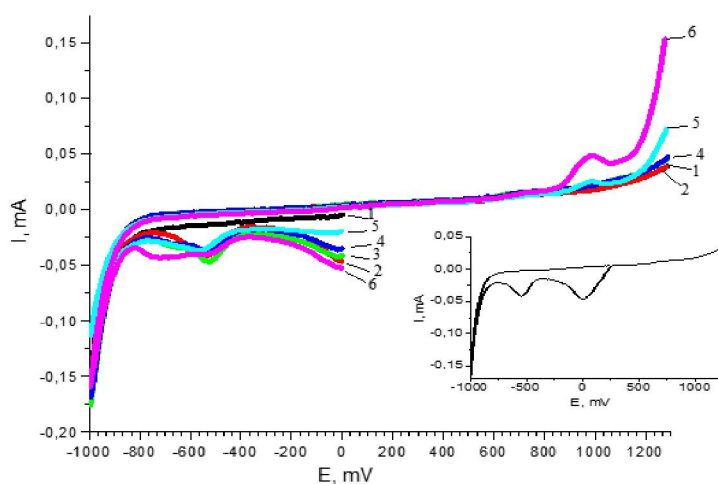


Рисунок 1 – ЦВА стеклогуглеродного электрода в сернокислом электролите при различных концентрациях ионов селена и галлия. 1)-фон; 2-6) Se(IV)- $2 \cdot 10^{-3} \text{M}$ ; Ga(III): 3) $6 \cdot 10^{-3}$ ; 4)  $1,2 \cdot 10^{-2}$ ; 5) $8 \cdot 10^{-2}$ ; 6) $1,0 \cdot 10^{-1} \text{M}$ . Врезка: Se(IV)- $2 \cdot 10^{-3} \text{M}$

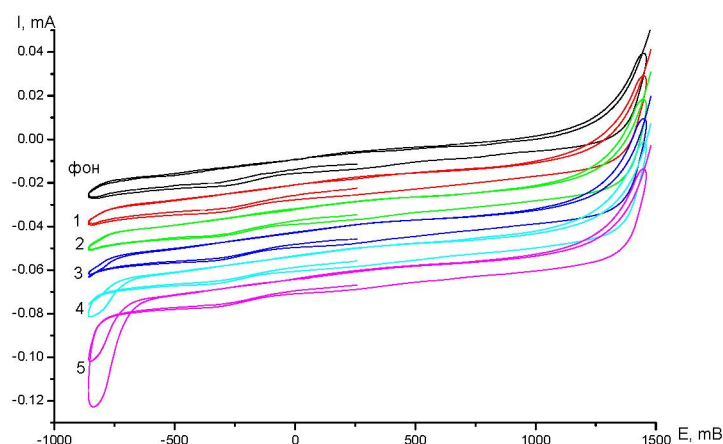


Рисунок 2 – ЦВА стеклоглеродного электрода в сернокислом электролите при различном содержании ионов галлия Ga(III)  $1 \cdot 5 \cdot 10^{-4}$ ;  $2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}$ ;  $3 \cdot 2 \cdot 10^{-3}$ ;  $4 \cdot 5 \cdot 10^{-3}$ ;  $5 \cdot 1 \cdot 10^{-2}$  М

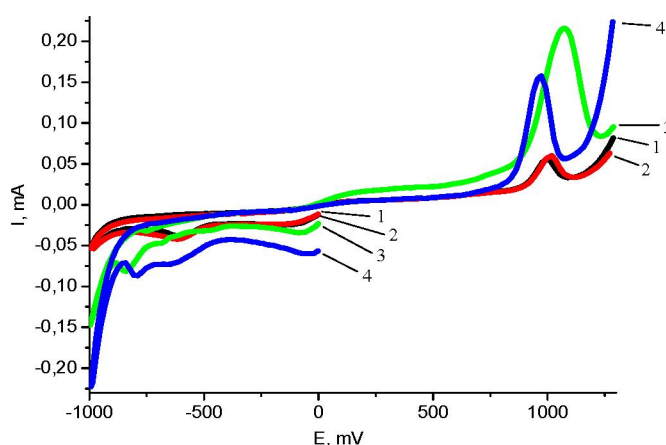


Рисунок 3 – ЦВА стеклоглеродного электрода в цитратном буферном растворе при постоянной концентрации ионов селена и различных концентрациях галлия. 1-4) Se(IV)= $2 \cdot 10^{-3}$ М; Ga(III): 1)  $6 \cdot 10^{-3}$ ; 4)  $1,2 \cdot 10^{-2}$ ; 5)  $6 \cdot 10^{-2}$ ; 6)  $8 \cdot 10^{-2}$ М

На основе полученных результатов выбрана область потенциалов -0,8 -0,9В для проведения потенциостатического осаждения соединения галлия с селеном на стеклоглеродном электроде.

**Электроосаждение селенида галлия в сернокислом электролите.** Электроосаждение проводили при концентрации ионов галлия  $6 \cdot 10^{-3}$ М и  $2 \cdot 10^{-3}$ М ионов селена, при потенциале -0,8В и температуре  $70^{\circ}\text{C}$ . Полученную пленку исследовали с помощью электронного сканирующего микроскопа с возможностями микроанализа, который показал 0,03ат% содержание галлия. В дальнейшем увеличили концентрацию ионов галлия от до  $1,2 \cdot 10^{-2}$ М и выполнили электроосаждение при потенциалах -0,8 и -1,2В. Исследованы элементный состав и сделаны микрофотографии поверхности полученных пленок (таблица 1).

Таблица 1 – Элементный состав свежесозажденной пленки селенида галлия на стеклоглероде при различных потенциалах

Подложка	Условия электроосаждения	Состав электролита
СУ-93	E=-0,8В T=70°C t = 30 минут	Ga - 0,51% Se - 99,49%
СУ-94	E=-1,2В T=70°C t = 30 минут	Ga - 0,54% Se - 99,41%



Из таблицы 1 видно, что содержание галлия увеличилось в осадке до ~ 0,5 ат%, сдвиг потенциала восстановления в отрицательную сторону слабо влияет на увеличение содержания галлия.

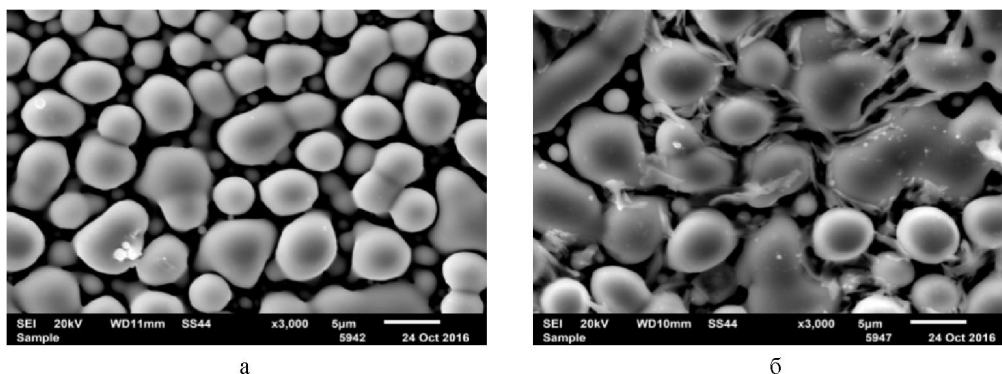


Рисунок 4 – Микрофотография поверхности пленок (при увеличении в 3000 раз):  
а – при потенциале -0,8В; б – при потенциале -1,2В

Микрофотография поверхности полученного образца, представленные на рисунке 4а, свидетельствует, что наблюдается образование отдельных, крупных зерен с диаметром 4,2-3,3 мкм. Восстановление при потенциале -1,2 В, когда начинается параллельное восстановление водорода, приводит к нарушению однородности осадка за счет образования нитевидных волокон (рисунок 4б).

В последующих экспериментах увеличивали содержание ионов галлия в электролите, при сохранении постоянной концентрации ионов селена, равной  $2 \cdot 10^{-3}$  М. В таблице 2 приведены результаты анализа состава осажденных пленок при потенциалах -0,8В, -0,9В, -1,0В. Лучший результат по содержанию галлия 7,2% показал эксперимент, проведенный при потенциале -0,8В.

Таблица 2 – Элементный состав свежесозданной пленки селенида галлия на стеклоглереде при различных потенциалах и микрофотографии поверхности

Подложка	Условия электроосаждения	Состав электролита	Содержание в осадке, ат%	Микрофотографии
СУ-95	E=-1,0В T=70°C t=30минут	$6 \cdot 10^{-2}$ М $\text{Ga}_2(\text{SO}_4)_3$ $2 \cdot 10^{-3}$ М NaHSeO <sub>3</sub>	Ga-6,7; Se-93,3	
СУ-96	E=-0,9В T=70°C t=30минут	$6 \cdot 10^{-2}$ М $\text{Ga}_2(\text{SO}_4)_3$ $2 \cdot 10^{-3}$ М NaHSeO <sub>3</sub>	Ga-4,5 Se-95,5	
СУ-97	E=-0,8В T=70°C t=30минут	$6 \cdot 10^{-2}$ М $\text{Ga}_2(\text{SO}_4)_3$ $2 \cdot 10^{-3}$ М NaHSeO <sub>3</sub>	Ga - 7,2 Se - 92,8	

Микрофотографии, приведенные в таблице 2, свидетельствуют, что величина зерна полученного осадка зависит от потенциала осаждения и от содержания галлия в осажденной пленке селенида галлия.

В дальнейших экспериментах использовали раствор  $1\text{M GaCl}_3$  в качестве источника ионов галлия, и увеличили их концентрацию в электролите до  $1,0 \cdot 10^{-1}\text{M}$  при постоянной концентрации ионов селена  $2 \cdot 10^{-3}\text{M}$ . Электрохимическое осаждение селенида галлия было выполнено при потенциалах  $-0,8$  и  $-0,9\text{В}$ . Использовали очищенные, отполированные стеклоуглеродные подложки. После электроосаждения получили однородные, плотные пленки красно-коричневого цвета и исследовали их состав и поверхность методом сканирующей электронной микроскопии.

Таблица 3 – Элементный состав свежесаженной пленки селенида галлия на стеклоуглероде при потенциалах  $E=-0,8\text{В}$ ,  $E=-0,9\text{В}$  в течение 30 минут

Подложка	Условия электроосаждения	Состав электролита	Содержание компонентов в пленке, ат%
СУ - 110	$E=-0,9\text{В}$ $T=70^\circ\text{C}$	$1 \cdot 10^{-1}\text{M GaCl}_3$ $2 \cdot 10^{-3}\text{M NaHSeO}_3$	Ga 15,1 Se 84,9
СУ - 111	$E=-0,9\text{В}$ $T=70^\circ\text{C}$	$1 \cdot 10^{-1}\text{M GaCl}_3$ $2 \cdot 10^{-3}\text{M NaHSeO}_3$	Ga 15,9 Se 84,1
СУ - 112	$E=-0,8\text{В}$ $T=70^\circ\text{C}$	$1 \cdot 10^{-1}\text{M GaCl}_3$ $2 \cdot 10^{-3}\text{M NaHSeO}_3$	Ga 26,7 Se 73,3

Из таблицы 3 видно, что при потенциале  $-0,8\text{В}$  в течение 30 минут при концентрации  $1,0 \cdot 10^{-1}\text{M GaCl}_3$  и  $2 \cdot 10^{-3}\text{M NaHSeO}_3$  на стеклоуглеродном электроде получена пленка с максимальным содержанием галлия ( $26,7\text{ат}\%$ ). На рисунке 5 приведены микрофотографии поверхности пленок селенида галлия, осажденных по условиям таблицы 3. Из рисунка видно, что равномерное распределение глобул нарушается скоплениями крупных кристаллов, состоящих из более мелких частиц. На рисунке 5в отмечено появление дендритов в виде цветков, что характерно для осажденных пленок галлия с селеном

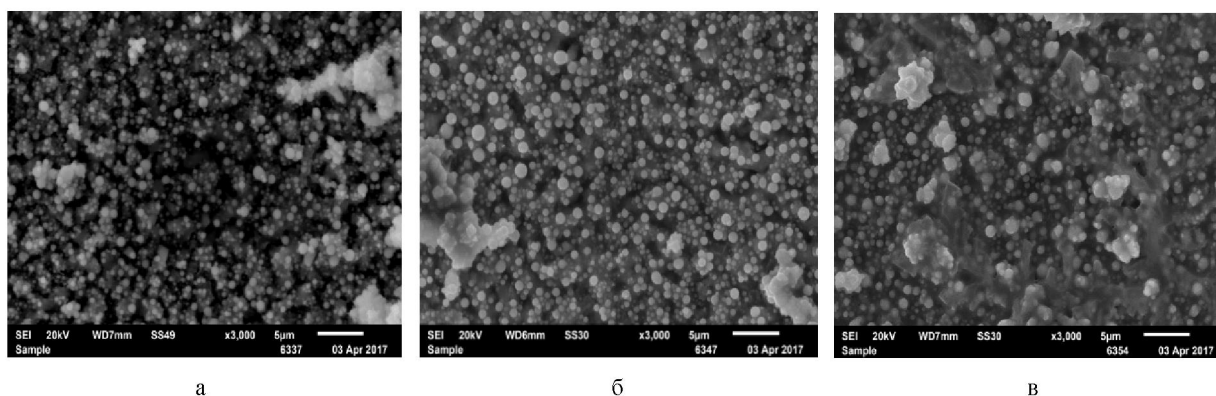


Рисунок 5 – Микрофотографии поверхности пленок:  
а)  $E_{oc} = -0,9\text{В}$  на СУ – 110; б)  $E_{oc} = -0,9\text{В}$  на СУ – 111; в)  $E_{oc} = -0,8\text{В}$  на СУ – 112

Однородное образование сфер с диаметром от  $0,5 - 1,1\text{мкм}$ , наиболее характерно для осадков, полученных при электроосаждении при  $E_{oc} = -0,9\text{В}$ .

На рисунке 6 можно увидеть возрастание содержания галлия в составе пленки  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$ , при концентрации  $1 \cdot 10^{-1}\text{M GaCl}_3$  в фоновом электролите.

**Температурная обработка пленок.** Для подтверждения фазового состава и выполнения рентгенофазового анализа осажденные пленки селенида галлия отжигали в муфельной печи в воздушной атмосфере двухступенчатым способом: первый раз отжигали при  $200^\circ\text{C}$  10 минут, а второй раз при  $500^\circ\text{C}$  15 минут. После отжига пленка приобрела серый цвет, адгезия к подложке плотная, поверхность однородная.

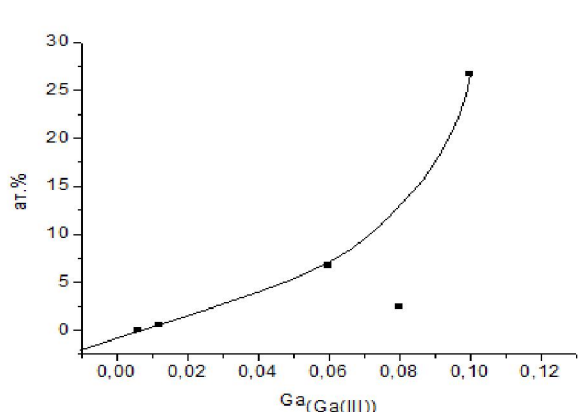


Рисунок 6 – Зависимость содержания галлия в осажденной пленке от концентрации ионов галлия в электролите при постоянном потенциале  $-0,8$  и концентрации  $Se = 2 \cdot 10^{-3} M$

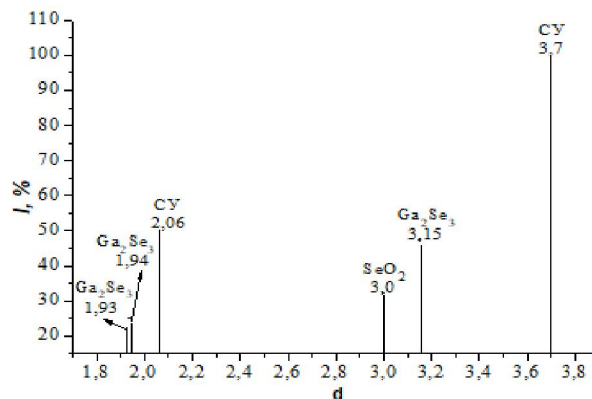


Рисунок 7 – Зависимость интенсивности от межплоскостного расстояния для образца СУ-112

Был выполнен рентгенофазовый анализ тонких пленок селенида галлия, электроосажденных на стеклоуглеродных пластинах по условиям таблицы 3. На рисунке 7 приведена штрих рентгенограмма, отражающая зависимость интенсивности рентгеновских рефлексов от межплоскостных расстояний. Видно, что на графике 7 присутствуют рефлексы фазы  $Ga_2Se_3$ , отвечающие межплоскостным расстояниям 1,93; 1,94; 3,15 согласно таблицам ASTM. Отмечено, что интенсивность рефлексов возрастает с ростом содержания галлия в осадке. На рентгенограммах также отмечены сильные рефлексы от подложки стеклоуглерода (СУ), поскольку полученные пленки не превышают толщину 1,5 мкм. Примесь оксида селена может свидетельствовать об окислении части селена на поверхности в процессе отжига.

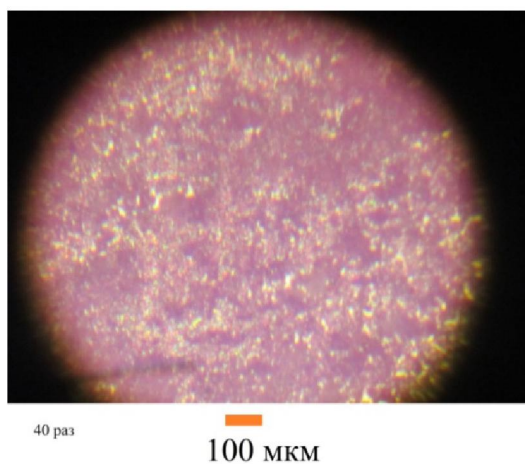


Рисунок 7 – Изображение поверхности пленки селенида галлия (образец СУ-112)

Исследование морфологии поверхности пленок после термической обработки было выполнено с помощью оптического микроскопа и атомного силового микроскопа JSPM 5200 (JEOL Japan).

Изображение, полученное с помощью оптического микроскопа, представляет равномерно покрытую поверхность образца (рисунок 8). Результаты атомной силовой микроскопии (АСМ) свидетельствуют, что высота покрытия достигает 5 мкм после отжига. Поверхность пленки растет в одном направлении и представляет собой на отрезке 25x25 мкм плоскости, растущие параллельно.

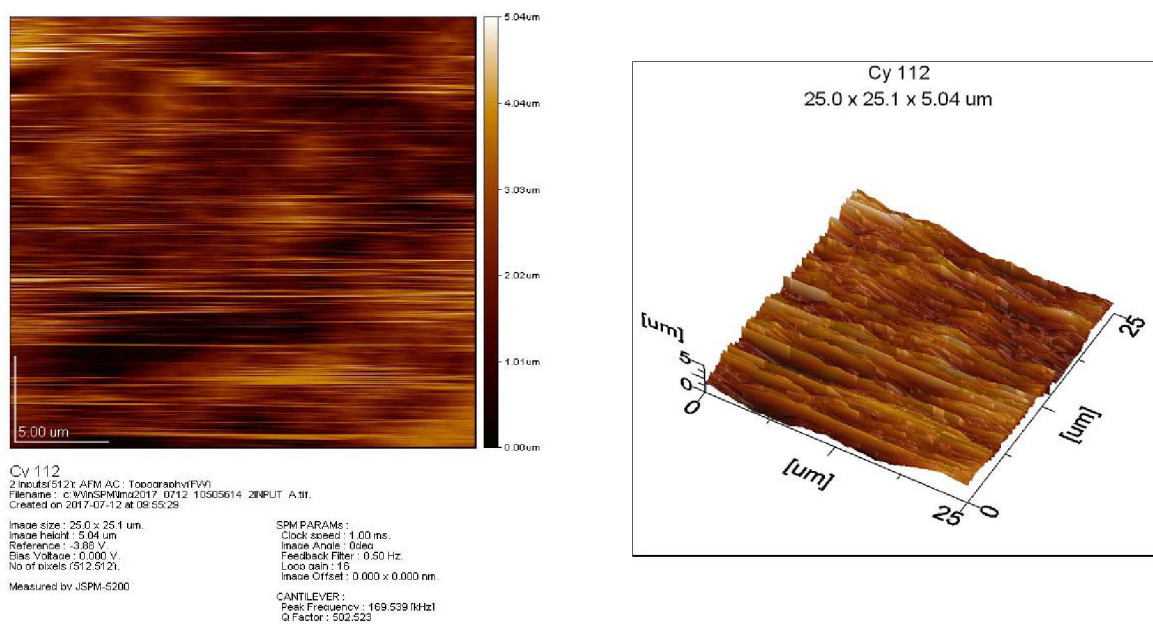


Рисунок 8 – Изображение поверхности образца CY-112, полученное с помощью атомной силовой микроскопии

**Выводы.** Выполнено электрохимическое осаждение селенида галлия на стеклоглеродном электроде из сернокислых электролитов при постоянном потенциале. Выбраны оптимальные условия электроосаждения при постоянном потенциале  $-0,8$  В(Ag/AgCl) и соотношении концентраций ионов галлия и селена 50:1 в электролите, температура  $70^{\circ}\text{C}$ . Получены пленки селенида галлия толщиной до  $1,5$  мкм, с содержанием  $26,7$  ат% галлия и  $73,3$  ат% селена. Состав близок к стехиометрическому составу соединения  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$ . Рентгенофазовый анализ подтвердил наличие фазы  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$  в полученных пленках. Исследование морфологии поверхности показало, что однородное покрытие поверхности стеклоглеродного электрода достигается при потенциалах  $-0,8$  и  $-0,9$  В.

*Работа выполнена по гранту МОН РК AP05130392 по теме: «Повышение энергоэффективности фотоэлектрохимических солнечных элементов за счет применения новых полупроводниковых материалов».*

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hahn H., Klinger W. (1949) The crystal structures of  $\text{Ga}_2\text{S}_3$ ,  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$  and  $\text{Ga}_2\text{Te}_3$  // *Z. Anorg. Chem.* 259 135. – DOI:10.1002/zaac.19492590102
- [2] Peressi M., Baldereschi A. (1998) Structural and electronic properties of  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$  // *J. Appl. Phys.* 83 3092. – DOI: 10.1063/1.367066
- [3] Chikan V., Kelley D.F. (2002) Synthesis of Highly Luminescent GaSe // *Nanoparticles Nano Lett.* 2 141. – DOI: 10.1021/nl015641m
- [4] Bekheet A.E. (2008) Ac conductivity and dielectric properties of  $\text{Ga}_2\text{S}_3$ – $\text{Ga}_2\text{Se}_3$  films // *Physica B: Condensed Matter* 403 (23), 4342–4346. – DOI: 10.1016/j.physb
- [5] Chikan V., Kelley D.F. (2002) Synthesis of highly luminescent GaSe nanoparticles // *NanoLett.* 2 141–145. – DOI: 10.1021/nl015641m
- [6] Park J.H., Afzaal M., Helliwell M., Malik M.A., O'Brien P., Raftery J. (2003) Chemical vapor deposition of indium selenide and gallium selenide thin films from mixed alkyl/dialkylselenophosphorylamides // *Chem. Mater.*, 15 (22), 4205–4210. – DOI: 10.1021/cm0310420
- [7] Rusu M., Wiesner S., Lindner S., Strub E., Rohrich J., Wurz R., Fritsch W., Bohne W., Schedel-Niedrig T., Lux-Steiner M.C., Giesen C., Heuken M. (2003) Deposition and characterization of  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$  thin films prepared by a novel chemical close-spaced vapour transport technique // *J. Phys.: Condensed Matter* 15 8185. – DOI:10.1088/0953-8984/15/47/021
- [8] Wright A.C., Williams J.O., Krost A., Richter W., Zahn D.R.T. (1992) High resolution and conventional transmission electron microscopy of  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$  thin films grown by vapour phase epitaxy // *J. Cryst. Growth* 121 111. – DOI: 10.1063/1.361264
- [9] Markl A., M. Von der Emde, Nowak C., Richter W., Zahn D.R.T. (1995) Investigation of Se capping of epitaxial  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$  layers // *Surf. Sci.* 331–333631. – DOI: 10.1016/0039-6028(95)00356-8



- [10] Afifi M.A., Bekheet A.E., El-Shair H.T., Zedan I.T. (2003) Determination and analysis of optical constants for Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> films near absorption edge // *Physica B* 325 308. – DOI: 10.1016/S0921-4526(02)01544-2
- [11] Ueno K., Tokuchi S., Saiki K., Koma A. (2002) Epitaxial growth of a vacancy-ordered Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> thin film on a vicinal Si(001) substrate // *J. Cryst. Growth* 237–239 1610. – DOI: 10.1016/S0022-0248(01)02353-3
- [12] Ueno K., Kawayama M., Dai Z.R., Koma A., Ohuchi F.S. (1999) Growth and characterization of Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>/GaAs(1 0 0) epitaxial thin films // *J. Cryst. Growth* 207 69. – DOI: 10.1016/S0022-0248(99)00359-0
- [13] Savchenko K.V., Shchennikov V.V. (1994) A phase transition in Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> under high pressure // *Can. J. Phys.*, 72, 681–682. – DOI: 10.1139/P94-088
- [14] Mutlu, I.H., Zarbaliyev M.Z., Aslan F. (2009) Preparation of Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> thin films by sol–gel technique // *F. J Sol-Gel SciTechnol* 50: 271. – DOI: 10.1007/s10971-009-1973-7
- [15] Lincot D. (2005) Electrodeposition of semiconductors, *Thin Solid Films* 487 40. DOI: 10.1016/j.tsf.2005.01.032
- [16] Budevski E., Staikov G., Lorenz W.J. (2000) Electrochemical approaches to environmental problems in the process *Electrochim. Acta* 45 2559. – DOI: 10.1016/S0013-4686(00)00339-X
- [17] Dharmadasa I.M., Haigh J. (2006). Strengths and advantages of electrodeposition as a semiconductor growth technique for applications in macroelectronic devices // *J. Electrochem.* – DOI: 10.1149/1.2128120

**М. Б. Дергачева<sup>1</sup>, Ә. Қ. Жаңабаева<sup>1</sup>,  
Д. С. Пузикова<sup>1</sup>, В. И. Яскевич<sup>1</sup>, В. Ф. Гременок<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Д. В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты, Алматы, Қазақстан,

<sup>2</sup>Беларусь ғылым академиясының материалтану ғылыми-практикалық орталығы, Минск, Белоруссия

### ГАЛИЙ СЕЛЕНИДІН ЭЛЕКТРОТҰНДЫРУ

**Аннотация.** Тұрақты потенциалда күкірт қышқылды электролиттен галлий селенидін шыны көміртекті электродта электрохимиялық тұндыру жүргізілді. Шыны көміртекті электродтың циклдік вольтамперлі қисықтары галлий және селен иондары бар екі түрлі электролитте: күкірт қышқылды және цитратты буферлі ертінді де зерттелді. Қабат құрамына галлий ионының концентрациясының өзгерісі мен тұныру потенциалының әсері зерттелді. Галлий ионының концентрациясын  $6 \cdot 10^{-3}$  М -ден  $1 \cdot 10^{-1}$  М-ге дейін үлкейткенде тұнба құрамында галлийдың максимальды құрамына алып келеді, өз кезегінде селен ионының концентрациясы тұрақты  $2 \cdot 10^{-3}$  М болып қалады. Стехиометриялыққа құрамдағы қабат алу үшін электролитте галлий ионы (III) селен ионына (IV) қарағанда артығырақ болуы керек. Тұнбаның элементтік анализ нәтижесі күкірт қышқылды электролитте галлий ионының селен ионына қарағанда концентрациясының қатынасы 50:1 болғанда, -0,8 В потенциалында құрамында 26,7 ат% галлий бар алынатындығын анықтады. Беттің морфологиясының зерттеулері шыны көміртегі электроды бетінде -0,8 және -0,9 В потенциалдарында біркелкі жабынды түзілетіндігін көрсетті. Рентгенофазалық анализ нәтижесі алынған қабаттарда Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> фазасының бар екендігін растады.

**Түйін сөздер:** галлий селениді, электротұндыру, вольтапмерметрия, жұқа қабаттар.

#### Сведения об авторах:

Дергачева Маргарита Борисовна – доктор технических наук, профессор, чл-корр. Российской Академии Естествознания, главный научный сотрудник лаборатории электрохимических технологий, Институт топлива, катализа и электрохимии (ИТКЭ), email: m\_dergacheva@mail.ru

Жанабаева Асем Калдыбекқызы – магистр, инженер лаборатории электрохимических технологий, Институт топлива, катализа и электрохимии (ИТКЭ), email: a.k.zhanabaeva@mail.ru

Яскевич Владимир Иванович – специалист с высшим образованием, научный сотрудник лаборатории физических методов исследования, Институт топлива, катализа и электрохимии (ИТКЭ).

Гременок В.Ф. – Научно-практический центр материаловедения Белорусской академии наук, Минск, Белоруссия, gremenok@ifftp.bas-net.by