

## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 543.257.1

## СЕНСОР ИЗ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ ДЛЯ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОГО ТИТРОВАНИЯ ИОНОВ СЕРЕБРА, МЕДИ, СВИНЦА И КАДМИЯ

© 2020 г. В. А. Буракhta<sup>a</sup>, \*, С. С. Сатаева<sup>b</sup>, \*\*<sup>a</sup>Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет,  
просп. Достык-Дружба, 208, Уральск, 009006 Республика Казахстан<sup>b</sup>Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана,  
ул. Жангир хана, 51, Уральск, 009090 Республика Казахстан

\*e-mail: vburakhta@mail.ru

\*\*e-mail: sataeva\_safura@mail.ru

Поступила в редакцию 18.03.2019 г.

После доработки 31.05.2019 г.

Принята к публикации 19.12.2019 г.

Разработаны полупроводниковые сенсоры на основе арсенида галлия, модифицированные электрохимическим способом, для потенциометрического титрования ионов металлов. Показано, что после модифицирования поверхности электроаналитические характеристики GaAs-электродов улучшаются: увеличивается крутизна электродной функции, расширяется интервал линейности электродной функции, сокращается время отклика.

**Ключевые слова:** полупроводниковые сенсоры, арсенид галлия, электродная функция, ионы серебра, меди, свинца, кадмия

DOI: 10.31857/S0044450220060031

Методы потенциометрического титрования с использованием ионселективных электродов широко применяют для анализа различных объектов благодаря их экономичности, простоте и портативности оборудования. Одной из актуальных задач в потенциометрическом анализе является создание новых индикаторных электродов, а также совершенствование уже известных. Для анализа жидких сред часто применяют полупроводниковые электроды, которые имеют ряд преимуществ – доступность, устойчивость в агрессивных средах, механическая прочность, длительный срок службы.

Для улучшения электроаналитических свойств индикаторных электродов используют модифицирование. Модифицированные электроды в последнее время находят все более широкое применение в электроаналитической практике. Модифицирование поверхности позволяет к традиционным свойствам индикаторных электродов добавить новые, которые повышают их реакционную способность и избирательность [1].

Способам целенаправленного модифицирования поверхности ионселективных (ИСЭ), металлических и полупроводниковых электродов и их использованию в потенциометрическом анализе посвящено множество публикаций. Так, в монографии [2] установлена возможность модифицирования поверхности ПАВ-сенсоров поливинил-

хлоридными мономолекулярными ситами с различным диаметром пор. При этом коэффициент потенциометрической селективности для модифицированных электродов уменьшается на 3–4 порядка, что свидетельствует о возможности раздельного определения ПАВ.

В работе [3] предложено модифицирование поверхности халькогенидных электродов путем химического, электрохимического или механического изменения ее свойств. Установлено, что для халькогенидных сенсоров изменение функции в растворах мешающих катионов металлов связано с протеканием твердофазных реакций, приводящих к образованию в электродноактивном слое более труднорастворимых соединений. При выдерживании мембран из сульфида серебра в растворах хлорида ртути(II) они приобретают ртутную и хлоридную функции.

Ранее в работе [4] разработаны и исследованы характеристики немодифицированных и модифицированных полупроводниковых электродов типа  $A^{III}B^V$  в растворах солей металлов, галогенидов, комплексообразующих реагентов. Предлагаемые электроды пригодны в качестве индикаторных в кислотно-основном, осадительном, комплексомерметрическом потенциометрическом титровании.

В работе [5] изучены полупроводниковые электроды на основе арсенида галлия (GaAs) и

показана возможность их использования в качестве индикаторных в различных вариантах потенциометрического титрования. Предложенное модифицирование полупроводниковой поверхности электрода из GaAs электрохимическим способом позволило улучшить электродную функцию, рабочий интервал, время отклика и воспроизводимость.

Таким образом, исследование электродных свойств твердых полупроводниковых электродов из арсенида галлия в растворах солей металлов и применение их в потенциометрическом титровании является актуальным. Ранее нами исследованы электроаналитические характеристики электрода из GaAs в растворах ионов серебра и галогенидов.

Цель настоящей работы – изучение закономерностей функционирования электрохимически модифицированных электродов на основе полупроводниковых материалов из арсенида галлия (GaAs) в растворах солей серебра, меди, свинца и кадмия.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для потенциометрических исследований в качестве электрохимических сенсоров использовали электроды на основе полупроводниковых материалов из арсенида галлия (GaAs). Для изготовления сенсоров в качестве электродноактивных мембран использовали монокристаллические полупроводниковые материалы типа  $A^{III}B^V$  – арсенид галлия. Из приготовленных полупроводниковых материалов вырезали диски диаметром 5–6 мм и толщиной  $2.0 \pm 0.5$  мм и клеивали их эпоксидным компаундом в корпус электрода. Внутренний токоотвод осуществляли по принципу “твердое-твердое”, характерному для бесконтактного типа электродов. Крепление провода к внутренней стороне мембраны осуществляли с помощью токопроводящего контактола, изготовленного на основе эпоксидного компаунда и мелкодисперсного порошка серебра. Корпус электрода изготавливали из инертно-полимерного материала. На конце проводника припаян разъем для подключения к измерительному прибору.

Поверхность мембраны GaAs-сенсора перед экспериментом предварительно обновляли механической обработкой с помощью тонкой наждачной бумаги, затем тщательно промывали дистиллированной водой и высушивали с помощью фильтровальной бумаги. Между измерениями сенсор хранили в сухом виде.

В качестве индикаторных электродов использовали также твердофазные ионселективные электроды: стеклянные электроды ЭСЛ-43-07 (Гомель), медьселективный (Cu-СЭ) с мембраной состава  $Ag_2S-CuS$ , свинецселективный (Pb-СЭ)

с мембраной  $Ag_2S-PbS$ , кадмийселективный (Cd-СЭ) с мембраной  $Ag_2S-CdS$ , разработанные в лаборатории химических сенсоров Санкт-Петербургского государственного университета и в научно-исследовательском институте Западно-Казахстанского аграрно-технического университета им. Жангир хана.

В работе использовали универсальный иономер Анион-4100 в режиме милливольтметра (погрешность измерения ЭДС  $\pm 0.01$  мВ). Электрохимическая ячейка состояла из GaAs-электрода и стандартного хлоридсеребряного электрода сравнения ЭВЛ-1МЗ, заполненного насыщенным раствором хлорида калия. Растворы перемешивали магнитной мешалкой.

Поверхность GaAs-электрода модифицировали методом электрохимической обработки в растворах сульфида натрия и нитрата серебра, время обработки варьировали. Модифицирование выполняли в режиме  $U = 20-25$  В,  $I = 0.05$  А с использованием выпрямителя ВУП-2М.

Время выдерживания электродов в растворах-модификаторах варьировали. Оно составило: 3, 5 и 10 мин. В табл. 1 в качестве примера приведены результаты, полученные после электрохимического модифицирования электрода с мембраной из GaAs растворами  $AgNO_3$  в зависимости от времени модифицирования и концентрации модифицирующего раствора. Как видно, наилучшие результаты получены при выдерживании мембраны исследуемых электродов в 0.1 М растворе  $AgNO_3$ , так как при использовании более разбавленных растворов исходные характеристики электродов не изменяются. Рекомендуемое время электрохимического модифицирования, достаточное для получения оптимальных электродных характеристик, составило 5 мин. В этом случае электрод приобретает устойчивую электродную функцию к ионам  $Ag^+$  в интервале концентраций  $10^{-5}-0.1$  М с крутизной  $66 \pm 2$  мВ/рс $_{Ag^+}$ .

Для сопоставления результатов и учета воспроизводимости определение проводили многократно, полученные результаты обрабатывали статистически. Время отклика фиксировали секундомером после одной минуты нахождения электродов в растворе. рН раствора контролировали стеклянным электродом. Все измерения проводили при  $25 \pm 1^\circ C$ . При переходе от потенциометрического титрования одного металла к другому поверхность полупроводникового сенсора обновляли с помощью наждачной бумаги, после чего функция электрода к определяемому иону оставалась хорошо воспроизводимой.

**Таблица 1.** Аналитические характеристики модифицированных сенсоров с мембраной из GaAs в 0.1 М растворах Na<sub>2</sub>S и AgNO<sub>3</sub>

Характеристика сенсора	Время модифицирования		
	3 мин	5 мин	10 мин
<i>E</i> , мВ	–175	–170	–170
Интервал линейности электродной функции, $E = f(\text{pc}_{\text{Ag}^+})$ (М)	$10^{-5}$ –0.1	$10^{-5}$ –0.1	$10^{-5}$ –0.1
Крутизна электродной функции, мВ/pc <sub>Ag<sup>+</sup></sub>	65 ± 2	66 ± 2	66 ± 2

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследовали электроаналитические свойства потенциометрических сенсоров на основе полупроводникового материала из арсенида галлия до и после электрохимического модифицирования их поверхностей в растворах солей металлов. Установили, что после электрохимической обработки поверхности функции электродов из арсенида галлия заметно улучшаются за счет реакций, протекающих на поверхности мембран, что приводит к возникновению тонкого модифицированного слоя. При этом в ряде случаев наблюдается расширение диапазона линейности, увеличение угла наклона электродной функции, уменьшение времени отклика.

Для изучения электроаналитических характеристик немодифицированных и модифицированных электродов из GaAs (крутизна электродной функции, интервал линейности функции, время отклика, воспроизводимость) исследовали их поведение в растворах ионов Cu, Pb и Cd. В качестве стандартных электродов взяли классические Ag-CЭ, Cu-CЭ, Pb-CЭ, Cd-CЭ.

Оценили поведение GaAs-электрода в растворах солей серебра. Установили, что GaAs-электроды проявляют наибольшую чувствительность к ионам серебра. Сопоставление данных по немодифицированным и модифицированным GaAs-электродам показало, что зависимость  $E$ -pc прямолинейна в интервале концентраций  $10^{-5}$ –0.1 М для обоих электродов, однако они отличаются по крутизне электродной функции: для модифицированных GaAs-электродов  $S = 66 \pm 2$  мВ/pc<sub>Ag<sup>+</sup></sub>, в то время как до модифицирования она составляла  $S = 56 \pm 2$  мВ/pc<sub>Ag<sup>+</sup></sub>. После обработки поверхности мембран кривая зависимости потенциала от концентрации для GaAs-электрода смещена в область значений потенциалов, характерных для серебряселективного электрода (Ag-CЭ). Время установления стационарных потенциалов не превышает 15–20 с.

Изучено поведение GaAs-электрода в растворах солей меди. Наилучшие результаты получены после обработки поверхности мембран. Крутизна электродной функции GaAs-электрода после мо-

дифицирования составила  $28 \pm 2$  мВ, в то время как до модифицирования она равна  $20 \pm 2$  мВ. В результате обработки поверхности GaAs-электрода предел обнаружения снизился на порядок с  $10^{-5}$  до  $10^{-6}$  М. Для сенсора с модифицированной поверхностью время установления потенциала сократилось почти втрое с 60 с до 15–20 с. После последовательной электрохимической обработки поверхности GaAs-электрода 0.1 М растворами Na<sub>2</sub>S и Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> градуировочная кривая смещается в область положительных значений потенциалов, характерных для медьселективного электрода (Cu-CЭ). Это свидетельствует о протекании на поверхности GaAs-электрода твердофазных реакций с образованием пленки из труднорастворимого сульфида меди, вследствие чего GaAs-электрод функционирует как Cu-CЭ.

Аналогичные результаты получены при изучении зависимости потенциал электрода–концентрация для GaAs-электрода в растворах ионов свинца до и после модифицирования его поверхности. Установили, что электрохимическое модифицирование поверхности мембраны приводит к улучшению аналитических характеристик электрода. Электрод из GaAs, поочередно обработанный 0.1 М растворами Na<sub>2</sub>S и Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> в течение 5 мин, обладает Pb<sup>2+</sup>-функцией в интервале  $10^{-6}$ –0.1 М с крутизной электродной функции  $25 \pm 2$  мВ, тогда как для немодифицированного электрода она равна  $22 \pm 2$  мВ. Время отклика сократилось до 15–20 с по сравнению с 60 с для немодифицированного электрода. В результате электрохимического модифицирования GaAs-электрода наблюдается смещение градуировочных кривых в область положительных значений потенциалов, что характерно для халькогенидных электродов.

Исследования зависимости потенциалов немодифицированных и модифицированных GaAs-электродов от концентрации ионов кадмия показали, что наилучшие результаты получены после обработки поверхности мембран. Электрохимическое активирование GaAs-электрода 0.1 М растворами Na<sub>2</sub>S и Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> в течение 5 мин приводит к улучшению характеристик электрода: крутизна электродной функции становится равной  $22 \pm 2$  мВ,

**Таблица 2.** Электроаналитические характеристики немодифицированных и модифицированных GaAs-электродов в растворах нитратов серебра, меди, свинца и кадмия

Ион	Электрод	Интервал линейности функции $E = f(c_i)$ (М)	Крутизна электродной функции, мВ/рс	Время отклика, с
Ag <sup>+</sup>	GaAs (немод.)	10 <sup>-5</sup> –0.1	56 ± 2	60–90
	GaAs (мод.)	10 <sup>-5</sup> –0.1	66 ± 1	15–20
	Ag-СЭ	10 <sup>-6</sup> –0.1	59 ± 2	20–30
Cu <sup>2+</sup>	GaAs (немод.)	10 <sup>-5</sup> –0.1	20 ± 5	60–90
	GaAs (мод.)	10 <sup>-6</sup> –0.1	28 ± 1	15–20
	Cu-СЭ	10 <sup>-6</sup> –0.1	29 ± 2	20–30
Pb <sup>2+</sup>	GaAs (немод.)	10 <sup>-5</sup> –0.1	22 ± 5	60–90
	GaAs (мод.)	10 <sup>-6</sup> –0.1	25 ± 1	15–20
	Pb-СЭ	10 <sup>-5</sup> –0.1	29 ± 2	20–30
Cd <sup>2+</sup>	GaAs (немод.)	10 <sup>-4</sup> –0.1	18 ± 5	60–90
	GaAs (мод.)	10 <sup>-5</sup> –0.1	22 ± 1	15–20
	Cd-СЭ	10 <sup>-5</sup> –0.1	29 ± 2	20–30

в то время как до модифицирования она составляла  $18 \pm 2$  мВ. Концентрационный диапазон расширяется до  $10^{-5}$  М. Время отклика для GaAs-электрода с обработанной поверхностью уменьшается в 3 раза. Следует отметить, что для модифицированного GaAs-электрода наблюдается смещение градуировочной кривой в область значений потенциалов, характерных для кадмийселективного электрода. В результате электрохимической обработки на поверхности мембраны происходит образование модифицированного слоя и в дальнейшем электрод функционирует как электрод I рода.

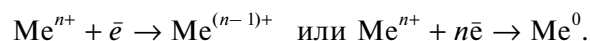
Результаты эксперимента приведены в табл. 2. Видно, что для модифицированных GaAs-электродов улучшаются электроаналитические характеристики по сравнению с немодифицированными электродами: увеличивается крутизна электродной функции, расширяется диапазон линейности функции  $E$ –рс и сокращается время установления потенциала.

Таким образом, установлено, что электрохимический способ модифицирования является эффективным при обработке поверхности мембран. Так, после электрохимической обработки поверхности функции электродов из GaAs улучшились, за счет реакций, протекающих на поверхности мембраны и приводящих к возникновению сульфидного слоя.

На границе полупроводник–раствор электролита протекают электрохимические реакции, которые являются причиной возникновения электродного потенциала полупроводников. Различают анодную реакцию, связанную с окислением (коррозией, растворением) полупроводника, и

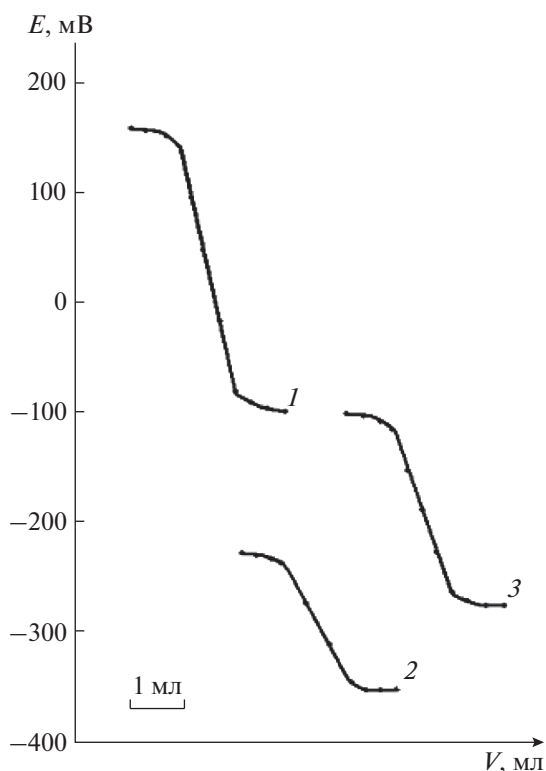
катодную, протекающую с восстановлением растворенного окислителя.

При погружении электродов в растворы солей металлов на катодных участках поверхности происходит восстановление ионов металлов до металлического состояния:



Полученные нами данные показали, что значение электродного потенциала GaAs-электрода зависит от концентрации ионов серебра, меди, свинца и кадмия. Найдена корреляция между чувствительностью GaAs-электродов к ионам этих металлов и значениями стандартных электродных потенциалов. Чем более положителен стандартный окислительно-восстановительный потенциал адсорбируемого металла, тем в более положительную область сдвигается потенциал полупроводникового электрода. Это сказывается и на величине тангенса угла наклона электродной функции в растворах солей металлов. Наибольшую чувствительность GaAs-электрод проявляет к ионам серебра ( $E_{\text{Ag}^+/\text{Ag}^0}^0 = 0.799$  В), а наименьшую к ионам кадмия ( $E_{\text{Cd}^{2+}/\text{Cd}^0}^0 = -0.403$  В).

Таким образом, чувствительность полупроводникового GaAs-электрода в растворах солей металлов можно объяснить протеканием на поверхности электрода окислительно-восстановительных реакций, приводящих к образованию поверхностного слоя, и специфической сорбцией ионов окислителей, т.е. восстановлением сорбированных ионов до металлического состояния на поверхности электрода [6].

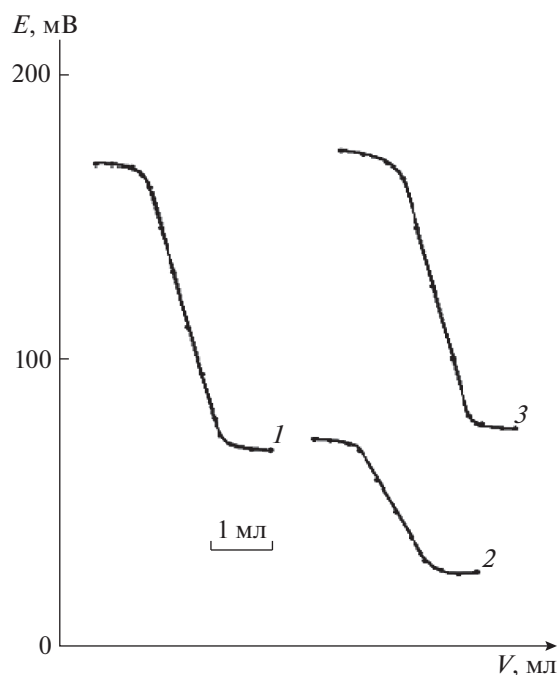


**Рис. 1.** Кривые потенциометрического титрования ионов серебра 0.01 М растворами  $\text{Na}_2\text{S}$  с Ag-СЭ (1), GaAs электродами (2, 3) до модифицирования (2) и после модифицирования (3)

Наличие отклика исследуемых электродов к ионам Ag, Cu, Pb и Cd подтверждают кривые их потенциометрического титрования 0.01 М раствором  $\text{Na}_2\text{S}$ . На рис. 1–4 приведены кривые потенциометрического титрования растворов нитратов Ag, Cu, Pb и Cd 0.01 М раствором  $\text{Na}_2\text{S}$  с немодифицированными и модифицированными GaAs-электродами.

На рис. 1 представлены кривые потенциометрического титрования 0.01 М раствора  $\text{AgNO}_3$  растворами сульфида натрия. Видно, что с модифицированными GaAs-электродами получены более четкие скачки потенциалов большей величины (рис. 1, кривая 3) по сравнению с немодифицированными электродами (рис. 1, кривая 2). Если изменение потенциала в конечной точке титрования (КТТ) с немодифицированным GaAs-электродом составило 105 мВ, то после модифицирования поверхности – 145 мВ. Кривая потенциометрического титрования после обработки поверхности GaAs-электрода смещена в область функционирования Ag-СЭ (рис. 1, кривая 1). Время установления стационарного потенциала в КТТ не превышает 10 с.

Аналогичные результаты получены при потенциометрическом титровании ионов меди 0.01 М раствором  $\text{Na}_2\text{S}$ . Из рис. 2 видно, что с модифи-

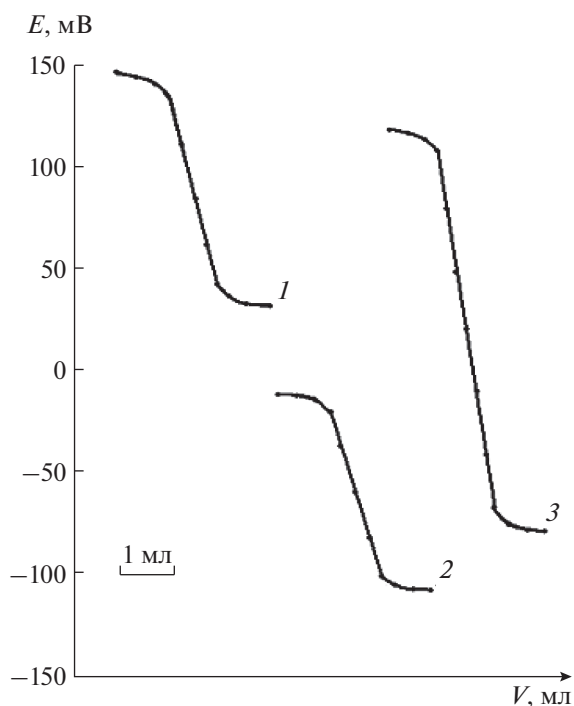


**Рис. 2.** Кривые потенциометрического титрования ионов меди 0.01 М раствором  $\text{Na}_2\text{S}$  с Cu-СЭ (1) и GaAs-электродами (2, 3) до модифицирования (2) и после модифицирования (3).

цированными GaAs-электродами получены кривые титрования со скачками потенциалов большей величины, смещенные в более положительную область значений потенциалов. Скачок потенциала с модифицированным GaAs-электродом составляет 135 мВ (рис. 2, кривая 3), с немодифицированным – 100 мВ (рис. 2, кривая 2). Результаты эксперимента хорошо коррелируют с данными прямой потенциометрии. С модифицированными GaAs-электродами вдвое сократилось время установления стационарного потенциала.

При потенциометрическом титровании ионов свинца 0.01 М раствором  $\text{Na}_2\text{S}$  с GaAs-электродами наилучшие результаты получены с модифицированным электродом. Скачок потенциала для немодифицированного GaAs-электрода равен 90 мВ (рис. 3, кривая 2), а для последовательно модифицированного 0.1 М растворами  $\text{Na}_2\text{S}$  и  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  величина скачка потенциала составила 110 мВ (рис. 3, кривая 3). Значение потенциала на немодифицированном электроде стабилизируется в течение 60 с, а после модифицирования поверхности электрода – мгновенно.

Сравнение характеристик немодифицированных и модифицированных GaAs-электродов в растворах ионов кадмия показало, что электроды с обработанной поверхностью мембран дают более резкие, четкие и воспроизводимые кривые титрования (рис. 4, кривая 3). Величина скачка



**Рис. 3.** Кривые потенциометрического титрования ионов свинца 0.01 М раствором  $\text{Na}_2\text{S}$  с Рб-СЭ (1) и GaAs-электродами (2, 3) до модифицирования (2) и после модифицирования (3).

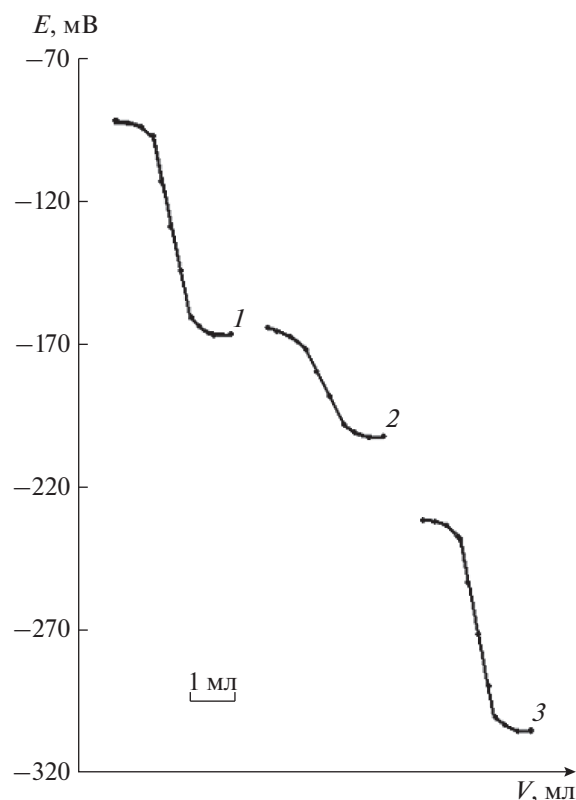
потенциала для немодифицированного GaAs-электрода составила 30 мВ (рис. 4, кривая 2), а для модифицированного электрода она увеличилась в 2 раза и составила 60 мВ (рис. 4, кривая 3). Установление стационарного потенциала происходит в течение 10 с после добавления очередной порции титранта. В КТТ равновесный потенциал устанавливается мгновенно.

Таким образом, предложенное модифицирование поверхности полупроводниковых электродов из GaAs электрохимическим способом приводит к увеличению величины скачка потенциала и уменьшению времени отклика, что позволяет более точно и надежно фиксировать конечную точку титрования.

В табл. 3 представлены результаты определения ионов меди потенциометрическим титрованием раствором  $\text{Na}_2\text{S}$  с модифицированным GaAs-элек-

**Таблица 3.** Результаты (мг) потенциометрического титрования ионов меди 0.01 М раствором  $\text{Na}_2\text{S}$  с модифицированным GaAs-электродом ( $n = 4$ ,  $P = 0.95$ )

Введено	Найдено, $c \pm \delta$	$s_r$	$\delta$ , %
2.13	$2.11 \pm 0.03$	0.05	2
3.20	$3.26 \pm 0.06$	0.03	6
6.40	$6.5 \pm 0.1$	0.04	14



**Рис. 4.** Кривые потенциометрического титрования ионов кадмия 0.01 М растворами  $\text{Na}_2\text{S}$  с Cd-СЭ (1) и GaAs-электродами (2, 3) до модифицирования (2) и после модифицирования (3).

тродом. Правильность определения оценивали методом введено—найдено.

Видно, что потенциометрическое титрование  $\text{Cu}^{2+}$  в модельных растворах с применением GaAs-электродов характеризуется достаточной точностью и хорошей воспроизводимостью.

Исследована возможность использования электрохимически модифицированных GaAs-электродов в качестве индикаторных для определения сульфид-ионов в газовом конденсате Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения Западно-Казахстанской области. Определение сульфидов очень важно при решении экологических проблем Западного Казахстана, богатого углеводородным сырьем с высоким содержанием сернистых соединений.

Сульфид-ионы определяли по методу осаждения с использованием в качестве титранта 0.1 М раствора  $\text{AgNO}_3$ . В табл. 4 приведены результаты титрования газового конденсата Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения с сульфидселективным и GaAs-электродами. Как видно, результаты, полученные с помощью классического сульфидселективного электрода и модифицированных GaAs-электродов, характеризуются

**Таблица 4.** Результаты (%) определения меркаптанов в газовом конденсате с сульфидселективным электродом (I), немодифицированным (II) и модифицированным GaAs-электродами (III) ( $n = 4, P = 0.95$ )

Проба	I	II	III
1	$0.29 \pm 0.01$	$0.27 \pm 0.01$	$0.28 \pm 0.02$
2	$0.37 \pm 0.01$	$0.35 \pm 0.01$	$0.36 \pm 0.02$

хорошей сходимостью. Можно заключить, что электрохимически модифицированные полупроводниковые электроды из GaAs позволяют определять меркаптаны с высокой точностью и хорошей воспроизводимостью. Эти электроды обладают длительным сроком службы (более 10 лет), механической прочностью, стойкостью в агрессивных серосодержащих средах. GaAs-электрод использовали также в аналитических, экологических и нефтехимических лабораториях при исследовании различных объектов и он показал высокую надежность при выполнении серийных анализов.

\* \* \*

Таким образом, показана возможность использования сенсоров на основе полупроводниковых соединений  $A^{III}B^V$  (арсенида галлия) для потенциометрического титрования. Чувствительность предлагаемого электрода к катионам делает его перспективным для экологического мониторинга природных объектов и для экспрессного контроля качества различной продукции.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будников Г.К. Аналитическая химия в Казанском университете. Фрагменты истории. Казань: Казанский ун-т, 2003. С. 360.
2. Кулапина Е.Г., Чернова Р.К., Кулапин А.И. Потенциометрические сенсоры для определения синтетических поверхностно-активных веществ. Саратов: Научная книга, 2008. 179 с.
3. Киянский В.В. Функции халькогенидных электродов в растворах комплексообразующих реагентов и мешающих ионов // Журн. аналит. химии. 1990. Т. 45. № 1. С. 104. (Kiyansky V.V. Functions of chalcogenide electrodes in solutions of complexing reagents and interfering ions // J. Analyt. Chem. 1990. V. 45. № 1. P. 104.)
4. Буракhta В.А. Новые электроды с мембранами на основе полупроводниковых соединений  $A^{III}B^V$  // Журн. аналит. химии. 2003. Т. 58. № 4. С. 430. (Burakhta V.A. New electrodes with membranes based on semiconductor compounds  $A^{III}B^V$  // J. Analyt. Chem. 2003. V. 58. №. 4. P. 430.)
5. Буракhta В.А., Сатаева С.С. Электрохимически модифицированные полупроводниковые электроды на основе арсенида галлия для argentометрического титрования хлоридов в природных объектах нитратом серебра // Журн. аналит. химии. 2014. Т. 69. № 11. С. 1179. (Burakhta V.A., Sataeva S.S. Electrochemically modified semiconductor gallium arsenide electrodes for the argentometric titration of chlorides with silver nitrate in natural samples // J. Analyt. Chem. 2014. V. 69. № 11. P. 1079.)
6. Буракhta В.А. Развитие потенциометрических методов анализа объектов окружающей среды // Новости науки. Алматы. 2004. № 4. С. 37.