

АДАТОМЫ СВИНЦА НА СУБМОНОСЛОЯХ СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА, ОСАЖДЕННЫХ НА Au-ЭЛЕКТРОД

© 2000 г. Н. П. Осипович, Е. А. Стрельцов

НИИ физико-химических проблем Белорусского государственного университета, Минск

Поступила в редакцию 12.02.99 г.

Исследованы процессы электрохимической адсорбции–десорбции атомов свинца (Pb_{ad}) при потенциалах, превышающих равновесный потенциал системы $Pb^{2+}-Pb^0$ на Au-электрод, покрытом субмонослоями Se и Te (Au/Se_{ad} , Au/Te_{ad}). С помощью метода циклической вольтамперометрии (ЦВА) установлена зависимость энергетических состояний Pb_{ad} от наличия субмонослойных или сверхмонослойных количеств халькогена. Процесс образования Pb_{ad} в условиях недонапряжения на Au/Se_{ad} и Au/Te_{ad} характеризуется необратимостью, что связано с наличием химических связей Pb–Se и Pb–Te. Электрохимическая адсорбция атомов Pb на Au/Se_{ad} и Au/Te_{ad} позволяет формировать субмонослойные структуры халькогенидов свинца – $Au/PbSe_{ad}$ и $Au/PbTe_{ad}$. Исследование стабильности субмонослойных структур Au/Se_{ad} , Au/Te_{ad} , $Au/PbSe_{ad}$ и $Au/PbTe_{ad}$ в условиях разомкнутой цепи показало их достаточно высокую сохранность (десятки минут) в кислых водных растворах HNO_3 , насыщенных аргоном.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование закономерностей процессов адсорбции атомов металлов в условиях недонапряжения (underpotential deposition – UPD) позволяет получать дополнительную информацию о механизмах адсорбции, явлениях переноса заряда, начальных стадиях электрокристаллизации и др. [1–12]. Наряду с теоретическими аспектами, изучение процессов формирования адатомных слоев весьма актуально и в практическом плане. Было обнаружено, что покрытие монослоями адатомов поверхности электродов приводит к увеличению их электрокаталитической активности и селективности [13–18]. Электрохимическая адсорбция адатомов может быть использована для детектирования ионов в растворе (например, галогенид-ионов [4, 19, 20]) и электрохимического мониторинга состояния поверхности электрода [4, 21]. До настоящего времени основное количество работ по UPD посвящено исследованию систем металлический электрод–адатомы иородного металла. В литературе описано несколько десятков систем такого типа [5]. В то же время процессам UPD на поверхности полупроводников уделялось существенно меньше внимания [22]. Изучение процессов адсорбции атомов металлов на атомах халькогенов представляет значительный интерес в связи с выяснением механизма электрокристаллизации халькогенидов металлов. Так, в работах [23–28] был разработан электрохимический метод получения эпитаксиальных пленок $A^{IV}B^{VI}$ (electrochemical atomic layer epitaxy). Он основан на последовательной реализации стадий UPD адатомов металла и халькогена, образую-

щих халькогенид. Адсорбция атомов металлов может быть использована для формирования наноразмерных пленок полупроводников на поверхности электродов [29–33].

Проведенные ранее нами исследования [34–39] показали, что UPD Pb_{ad} играет существенную роль в процессах катодного электрохимического синтеза селенидов и теллуридов свинца, а также их твердых растворов $PbSe_{1-x}Te_x$. Образование $PbSe$ и $PbTe$ в кислых водных растворах, содержащих соединения Pb(II), Se(IV) и Te(IV), происходит за счет взаимодействия атомов халькогенов, электроосажденных в условиях перенапряжения, и Pb_{ad} , осажденных на Se и Te при недонапряжении. Цель данной работы заключалась в установлении закономерностей формирования субмонослойных структур $PbSe$ и $PbTe$ на поверхности Au-электрода. Была исследована также стабильность во времени систем Au/Se_{ad} , Au/Te_{ad} , $Au/PbSe_{ad}$ и $Au/PbTe_{ad}$ в условиях разомкнутой цепи.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводили на Au-электродах (фольга толщиной 0.1 мм), которые механически полировали алмазным порошком, прокаливали на воздухе при 700°C (1 ч), а затем промывали в концентрированной H_2SO_4 и бидистиллате. Далее электроды погружали в кварцевую ячейку с 0.1 М HNO_3 , платиновым вспомогательным электродом и насыщенным хлорсеребряным электродом сравнения (все потенциалы приведены относительно данного электрода сравнения). Вспомогательный и электрод сравнения были отделены от

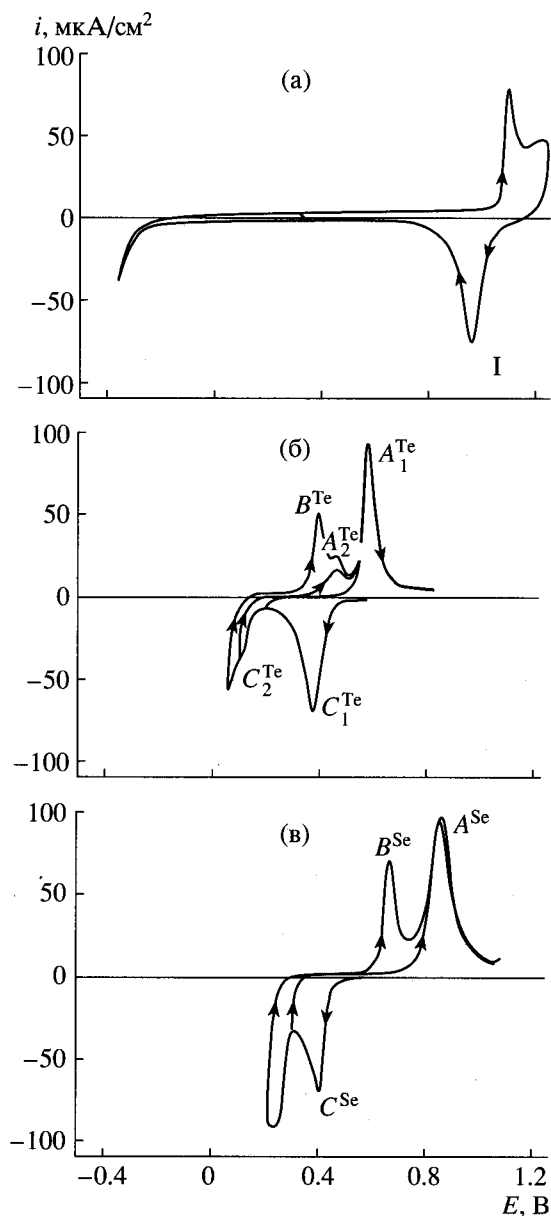


Рис. 1. ЦВА Au-электрода в растворах: а – 0.1 М HNO_3 ; б – 0.1 М HNO_3 + 0.002 М TeO_2 ; в – 0.1 М HNO_3 + 0.002 М SeO_2 . Скорость развертки потенциала ($v = 20$ мВ/с). Стрелками указано направление сканирования потенциала.

основного объема стеклянными кранами. Рабочие электроды подвергали длительному циклированию в диапазоне -0.2 – 1.2 В. Подготовленная таким образом поверхность имела коэффициент шероховатости 1.45, определенный по адсорбции атомов кислорода. Для поликристаллического Au была использована величина заряда 390 мкКл/см² (в предположении адсорбции кислорода мономолекулярным слоем в количестве, относящемся к количеству поверхностных атомов Au, как 1 : 1 [40]).

Осаждение Se (Te) на поверхность Au проводили из растворов состава 0.1 М HNO_3 + 0.002 М SeO_2 (TeO_2), а свинца – из растворов состава 0.1 М HNO_3 + 0.002 М $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$. Растворы готовили из реактивов квалификации “ос. ч.” на бидистиллате. Для удаления растворенного кислорода и предотвращения загрязнения раствора и электрода в ячейке поддерживали небольшое избыточное давление аргона, что позволяло получать воспроизводимые ЦВА адсорбции–десорбции атомов халькогенов и свинца.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1а представлены ЦВА на Au-электроде в 0.1 М растворе HNO_3 . Как видно из данного рисунка, существует достаточно большой интервал потенциалов (-0.30 В $< E < 1.05$ В), где Au-электрод является идеально поляризуемым. При $E < -0.30$ В регистрируется катодный ток, связанный с выделением H_2 . Анодный ток при $E > 1.05$ В обусловлен образованием оксидных слоев на поверхности Au. Их восстановление происходит при катодном импульсе потенциала в интервале 1.0 В $\rightarrow 0.8$ В и регистрируется в виде катодного пика тока I (рис. 1а).

При добавлении в раствор миллимолярных количеств Te появляется ряд катодных (C_1^{Te} , C_2^{Te}) и анодных (A_1^{Te} , A_2^{Te} , B^{Te}) пиков тока на i , E -кривых (рис. 1б). Приведенные циклические вольтамперограммы идентичны полученным ранее в работах [41, 42] при осаждении теллура на Au из водных растворов H_2SO_4 . В этих работах была показана возможность UPD Te_{ad} на поверхность Au-электрода. На ЦВА данному процессу отвечают пики катодного тока C_1^{Te} и C_2^{Te} . Использование методов оже-спектроскопии и дифракции медленных электронов при изучении структуры осадков Te на поверхности Au позволило установить [42], что область пика C_1^{Te} соответствует низкой степени заполнения поверхности (менее половины монослоя), причем осаждение Te_{ad} происходит в виде изолированных атомов, окислению которых соответствует пик A_1^{Te} . Дальнейшее осаждение Te_{ad} требует катодного смещения потенциала на величину около 300 мВ (плохо разрешимый пик катодного тока C_2^{Te} – рис. 1б). На этой стадии заполнения поверхности электрода происходит образование димеров Te_{ad} [42]. Анодному окислению димеров отвечает пик анодного тока A_2^{Te} . Анодный пик B^{Te} соответствует окислению фазового осадка Te (трехмерных зародышей), который образуется при катодной поляризации электрода при $E < 0.1$ В (рис. 1б).

На рис. 1в представлены ЦВА на Au-электроде в 0.1 М растворе HNO_3 , содержащем миллимолярные количества Se(IV) . Приведенные ЦВА идентичны полученным ранее в работах [43, 44]. Как было показано в работе [43], в области потенциалов, соответствующих пику C^{Se} , происходит UPD адатомов селена (Se_{ad}) на поверхности Au-электрода. Анодному окислению Se_{ad} отвечает пик A^{Se} . Пик B^{Se} соответствует окислению фазового осадка селена.

Обращает на себя внимание тот факт, что пики (C_1^{Te} , C_2^{Te} , C^{Se}) и (A_1^{Te} , A_2^{Te} , A^{Se}) существенно смещены друг относительно друга на шкале потенциалов. Это связано с необратимостью образования Te_{ad} и Se_{ad} на поверхности золота. Нами было установлено, что при выключении внешней поляризации электрода (условие разомкнутой цепи) адатомы Te и Se сохраняются на поверхности Au. Об этом можно судить по регистрации пиков окисления адатомов халькогенов на ЦВА. Так, если осадить Te_{ad} при потенциале $E = 0.2$ В и выключить поляризацию на 2 ч, то потенциал электрода релаксирует до значения $E \approx 0.4$ В. Если далее от этого значения потенциала включить его анодную развертку – регистрируется пик A_1^{Te} , идентичный представленному на рис. 1б. Адатомы Te сохраняются на поверхности Au и при перемещении электродов Au/ Te_{ad} из одной электрохимической ячейки в другую. Указанные операции осуществлялись следующим образом. Электрохимически осаждались адатомы Te при потенциодинамической поляризации электрода до $E = 0.2$ В (см. катодную ветвь i, E -кривой на рис. 2а). Далее выключалась внешняя поляризация, электрод Au/ Te_{ad} промывался бидистиллатом, а затем, покрытый капелькой воды (для предотвращения попаданий загрязнений из воздуха), переносился в 0.1 М раствор HNO_3 . Анодное сканирование потенциала осуществлялось от стационарного потенциала погружения ($E_{\text{ст}}$) в данном растворе. Анодная потенциодинамическая кривая представлена на рис. 2а. Аналогичные операции были осуществлены и с Au/ Se_{ad} -электродом (рис. 2б). Регистрация пиков A_1^{Te} , A^{Se} позволяет заключить, что Te_{ad} и Se_{ad} сохраняются на поверхности Au-электрода при перемещении его из одной электрохимической ячейки в другую. По идентичности зарядов, соответствующим пикам A_1^{Te} , A^{Se} , нами было установлено, что концентрации Te_{ad} и Se_{ad} не изменяются от первоначальных значений в течение 120 ± 10 мин. Стабильность систем Au/ Se_{ad} и Au/ Te_{ad} позволяет изучать UPD металлов на этих электродах в растворах, не содержащих Te(IV) и Se(IV). В данной работе мы ис-

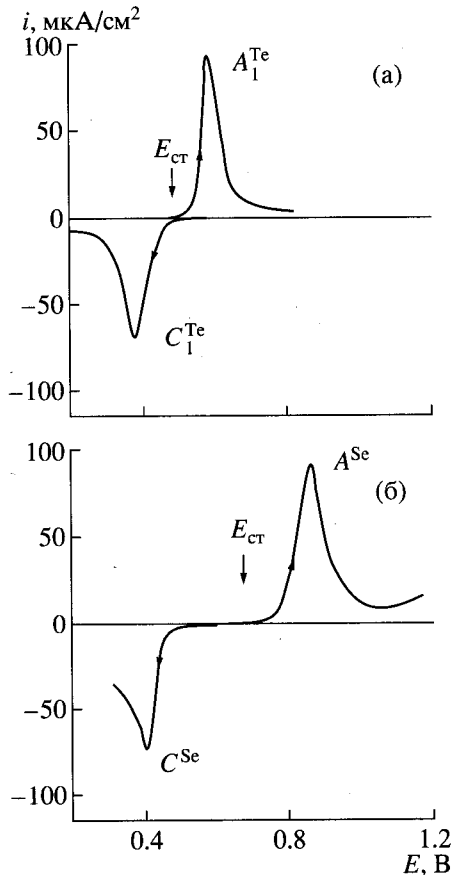


Рис. 2. Потенциодинамические кривые ($v = 20$ мВ/с) катодного осаждения (ячейка 1) и анодного окисления (ячейка 2) Te_{ad} (а) и Se_{ad} (б) на Au-электроде. После осаждения Te_{ad} и Se_{ad} выключалась поляризация электрода и он перемещался из ячейки 1 в ячейку 2. Состав раствора: ячейка 1 – 0.1 М HNO_3 + 0.002 М TeO_2 (а) и 0.1 М HNO_3 + 0.002 М SeO_2 (б); ячейка 2 – 0.1 М HNO_3 (а, б). Стрелкой указано значение стационарного потенциала погружения электрода в ячейке 2.

следовали адсорбцию–десорбцию Pb_{ad} на Au-электродах, содержащих на поверхности Te_{ad} и Se_{ad} .

Адсорбция атомов свинца на золоте, широко исследовалась на поликристаллических и монокристаллических электродах [45–56]. Количество адсорбционных состояний Pb_{ad} существенно зависит от кристаллографической ориентации поверхности и проявляется на ЦВА в виде различного числа анодных и катодных пиков тока при потенциалах положительнее равновесного потенциала системы $\text{Pb}^0/\text{Pb}^{2+}$. Для исследовавшихся в данной работе поликристаллических Au-электродов, ЦВА в растворе, содержащем Pb(II) , представлены на рис. 3. Как видно из рис. 3 адсорбция Pb_{ad} на Au-электроде регистрируется в виде четырех пиков катодного тока. Четырем адсорбционным состояниям Pb_{ad} на поверхности Au отвечают 4 пика анодного тока при сканировании

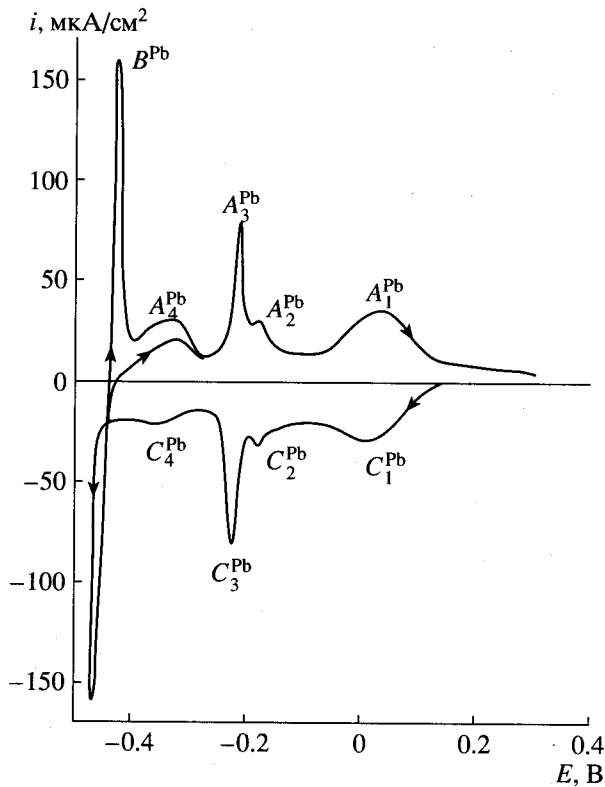


Рис. 3. ЦВА ($\nu = 20$ мВ/с) Au-электрода в растворе $0.1 \text{ M HNO}_3 + 0.002 \text{ M Pb(NO}_3)_2$.

потенциала в интервале от -0.42 В до 0.1 В . Анодный пик B^{Pb} отвечает окислению фазового осадка свинца. Его осаждению соответствует катодная ветвь i, E -кривой при $E < -0.45 \text{ В}$. Интегрирование анодной части ЦВА, отвечающей десорбции Pb_{ad} (пики $A_1^{\text{Pb}}, A_2^{\text{Pb}}, A_3^{\text{Pb}}, A_4^{\text{Pb}}$), дает значение $Q_{\text{Pb}} = 400 \pm 10 \text{ мКл/см}^2$, что соответствует осаждению монослоя [45].

В присутствии Te_{ad} на поверхности Au вид кривых ЦВА существенно изменяется (рис. 4). Атомы Te предварительно осаждались на поверхность Au-электрода в растворе $0.1 \text{ M HNO}_3 + 0.002 \text{ M TeO}_2$. Затем выключалась поляризация, электрод промывался бидистиллатом и переносился в электрохимическую ячейку, содержащую раствор $2 \times 10^{-3} \text{ M Pb(NO}_3)_2 + 1 \times 10^{-1} \text{ M HNO}_3$. После указанных операций стационарный потенциал погружения Au/ Te_{ad} -электрода составлял $E_{\text{ст}} \approx 0.4 \text{ В}$. Далее осуществлялось катодное сканирование потенциала (рис. 4а). На ЦВА в области адсорбции Pb_{ad} на Au/ Te_{ad} -электроде регистрируется два катодных (E_1 и E_2) и два анодных пика (D_1 и D_2). Тот факт, что Te присутствует на поверхности Au в виде субмонослоя, подтверждается регистрацией пика A_1^{Te} в области $E > 0.5 \text{ В}$. При увеличении количества осажденного теллу-

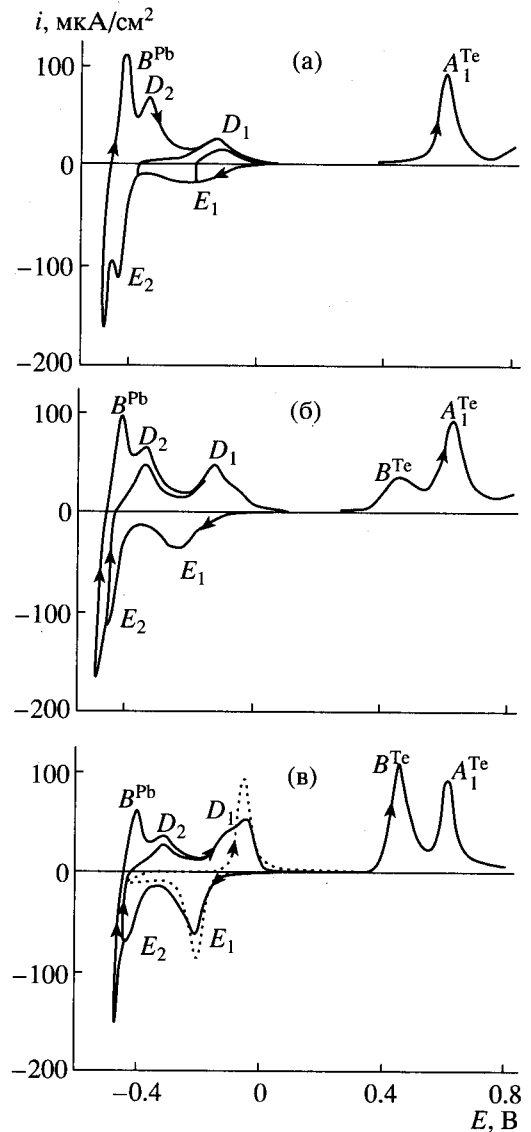


Рис. 4. ЦВА ($\nu = 20$ мВ/с) для Au/ Te_{ad} -электрода в растворе $0.1 \text{ M HNO}_3 + 0.002 \text{ M Pb(NO}_3)_2$. Теллур предварительно осаждался на поверхность Au-электрода из раствора $0.1 \text{ M HNO}_3 + 0.002 \text{ M TeO}_2$ при катодном сканировании ($\nu = 20$ мВ/с) потенциала: а $-0.6 \rightarrow 0.2 \text{ В}$; б $-0.6 \rightarrow 0.1 \text{ В}$; в $-0.6 \rightarrow 0.05 \text{ В}$. Пунктиром показана ЦВА для массивного Te-электрода в растворе $0.1 \text{ M HNO}_3 + 0.002 \text{ M Pb(NO}_3)_2$.

ра более монослоя на ЦВА происходят следующие изменения (рис. 4б, 4в). Уменьшаются пики E_2 и D_2 при одновременном увеличении пиков E_1 и D_1 , причем анодный пик D_1 раздваивается. Наличие сверхмонослойных количеств теллура на поверхности Au-электрода подтверждается регистрацией анодного пика B^{Te} в интервале потенциалов $0.3\text{--}0.5 \text{ В}$. Прерывистой линией на рис. 4в представлена ЦВА адсорбции-десорбции Pb_{ad} на массивном Te-электроде. Отчетливо видно, что пики E_1 и D_1 близки к пикам адсорбции-десорб-

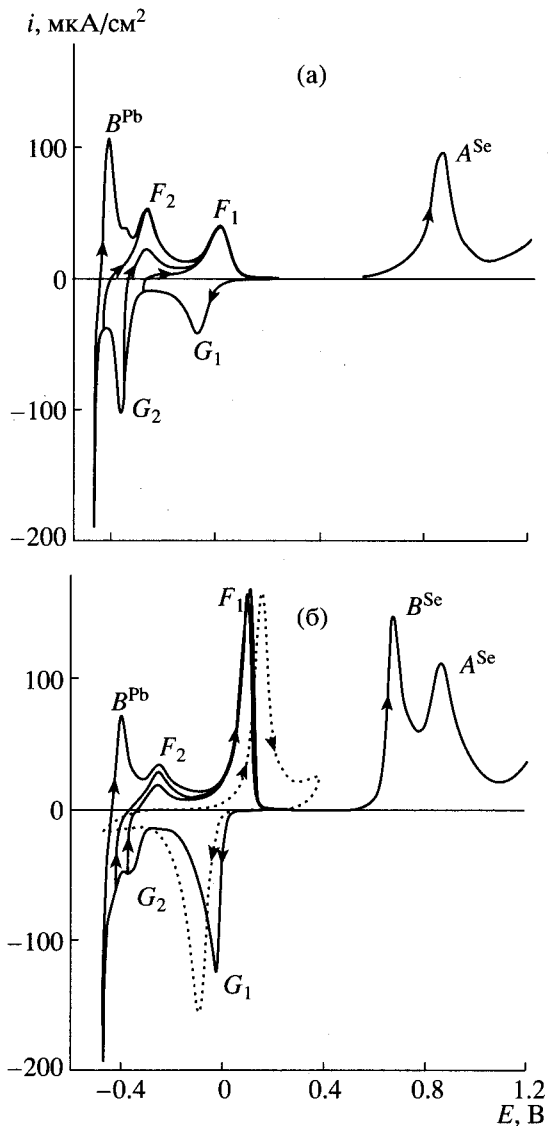


Рис. 5. ЦВА ($v = 20$ мВ/с) Au/Se_{ад}-электрода в растворе 0.1 М HNO₃ + 0.002 М Pb(NO₃)₂. Селен предварительно осаждался на поверхность Au-электрода из раствора 0.1 М HNO₃ + 0.002 М SeO₂ при катодном сканировании ($v = 20$ мВ/с) потенциала: а - 0.6 → 0.3 В; б - 0.6 → 0.15 В. Пунктиром показана ЦВА для массивного Se-электрода в растворе 0.1 М HNO₃ + 0.002 М Pb(NO₃)₂.

ции Pb_{ад} на массивном теллурическом электроде. Как отмечалось выше, осаждение Те при $E = -0.2$ В не приводит к формированию полного монослоя адатомов. По-видимому, пики E_2 и D_2 отвечают слабосвязанным формам адсорбции Pb_{ад} на поверхности Au (пики C_4^{Pb} и A_4^{Pb} на рис. 3).

ЦВА для Au/Se_{ад}-электрода в растворе 2×10^{-3} М Pb(NO₃)₂ + 1×10^{-1} М HNO₃ представлены на рис. 5. На ЦВА в области UPD Pb_{ад} на Au/Se_{ад}-электроде регистрируется два катодных (G_1 и G_2) и

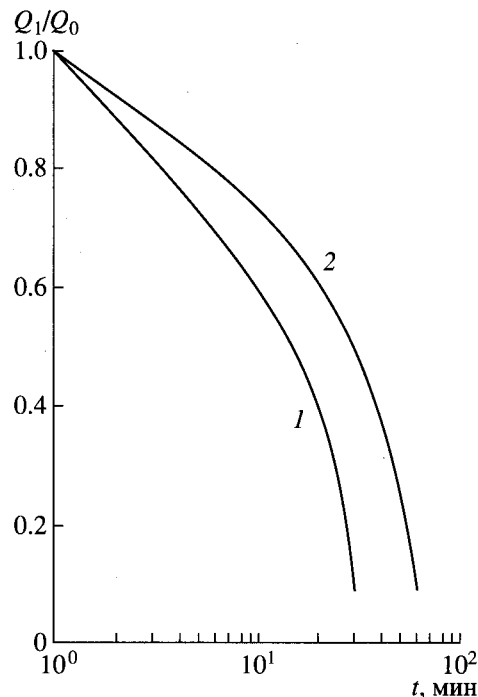


Рис. 6. Влияние длительности нахождения систем Au-PbTe_{ад} (1) и Au-PbSe_{ад} (2) в растворе 0.1 М HNO₃ + 0.002 М Pb(NO₃)₂ в условиях разомкнутой цепи на их стабильность. Q_1 – заряд, соответствующий пикам D_1 (рис. 4а) и F_1 (рис. 5а) и регистрируемый после определенного промежутка времени, на который выключалась поляризация электрода при $E = -0.42$ В. Q_0 – заряд, регистрируемый на электроде при непрерывном снятии потенциодинамической кривой.

два анодных пика (F_1 и F_2). Тот факт, что Se присутствует на поверхности Au в виде субмонослоя, подтверждается регистрацией пика A^{Se} в области $E > 0.6$ В (рис. 5а). При увеличении количества осажденного селена более монослоя на ЦВА происходят следующие изменения (рис. 5б): уменьшаются пики G_2 и F_2 при одновременном увеличении пиков G_1 и F_1 . Наличие сверхмонослойных количеств Se на поверхности Au-электрода подтверждается регистрацией анодного пика B^{Se} в интервале потенциалов 0.3–0.5 В. Прерывистой линией на рис. 5б представлена ЦВА адсорбции-десорбции Pb_{ад} на массивном Se-электроде. Видно, что пики G_1 и F_1 близки пикам адсорбции-десорбции Pb_{ад} на массивном Se-электроде. Заполнение поверхности Au селеном уменьшает долю слабосвязанных форм Pb_{ад} на поверхности Au (см. пики G_2 и F_2 на рис. 5 и пики C_4^{Pb} и A_4^{Pb} на рис. 3).

Ранее [37, 38] нами отмечалось, что пики адсорбции-десорбции Pb_{ад} на массивных Se- и Te-электродах смещены относительно друг друга на шкале потенциалов (см. пунктирные кривые на рис. 4в и 5б). Необратимость адсорбции атомов Pb на атомах халькогенов связана с образованием

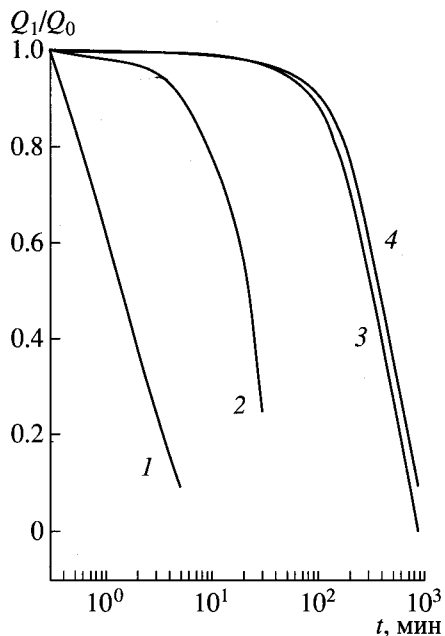


Рис. 7. Стабильность адатомов Pb на поверхности массивных Te (1, 2) и Se (3, 4) в растворе 0.1 М HNO_3 + 0.002 М $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$. Q_1 – заряд, соответствующий пика десорбции $\text{Pb}_{\text{ад}}$ после определенного промежутка времени, на который выключалась поляризация электрода при $E = -0.35$ В. Q_0 – заряд десорбции $\text{Pb}_{\text{ад}}$, регистрируемый на Se- и Te-электродах при непрерывном снятии потенциодинамической кривой. Раствор насыщен O_2 (1, 3), и Ar (2, 4).

химических связей металл–халькоген, что является движущей силой процесса UPD. Из кривых ЦВА, представленных на рис. 4, 5 можно сделать вывод, что необратимость процесса образования $\text{Pb}_{\text{ад}}$ сохраняется и при формировании субмонослойных структур халькогенидов на поверхности Au. Об этом можно судить по смещению друг относительно друга пиков E_1 и D_1 (рис. 4), а также пиков G_1 и F_1 (рис. 5). Однако эта необратимость выражена в меньшей степени, чем на массивных халькогенах.

В данной работе была исследована стабильность во времени систем $\text{Au}/\text{PbSe}_{\text{ад}}$ и $\text{Au}/\text{PbTe}_{\text{ад}}$ в условиях разомкнутой цепи. Формирование данных гетероструктур осуществлялось потенциодинамически до потенциала -0.42 В (потенциал катоднее пиков E_2 и G_2 , однако образование осадка массивного свинца в этих условиях не происходит). Далее внешняя поляризация выключалась на определенный промежуток времени. После этого включалось анодное сканирование потенциала. На рис. 6 показано влияние длительности нахождения систем $\text{Au}/\text{PbTe}_{\text{ад}}$ и $\text{Au}/\text{PbSe}_{\text{ад}}$ в условиях разомкнутой цепи на их стабильность. Отчетливо видно, что полная десорбция $\text{Pb}_{\text{ад}}$ достигается за несколько десятков минут – за 30 мин в случае $\text{PbTe}_{\text{ад}}$ и за 60 мин в случае $\text{PbSe}_{\text{ад}}$. Таким

образом, можно сделать вывод, что система $\text{Au}/\text{PbSe}_{\text{ад}}$ является несколько более стабильной, чем система $\text{Au}/\text{PbTe}_{\text{ад}}$. Эта же тенденция сохраняется и при десорбции $\text{Pb}_{\text{ад}}$ с поверхности массивных Se- и Te-электродов (рис. 7). Следует также отметить увеличение стабильности $\text{Pb}_{\text{ад}}$ на поверхности массивных халькогенов по сравнению с их субмонослойными количествами. Существенное влияние на процесс десорбции $\text{Pb}_{\text{ад}}$ с поверхности Te и Se оказывает наличие в растворе молекулярного кислорода. Последний, по-видимому, окисляет $\text{Pb}_{\text{ад}}$ до катионных форм, которые далее десорбируются с поверхности электрода.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Адсорбция атомов Se и Te на Au-электроде в условиях недонапряжения происходит необратимо. Системы $\text{Au}/\text{Se}_{\text{ад}}$ и $\text{Au}/\text{Te}_{\text{ад}}$ проявляют высокую стабильность в условиях разомкнутой цепи – в атмосфере аргона десорбция адатомов халькогенов не происходит в течение нескольких часов. Адаомы халькогенов сохраняются на поверхности золота и при перемещении электродов из одной электрохимической ячейки в другую. Это позволяет использовать предварительно сформированные гетероструктуры $\text{Au}/\text{Se}_{\text{ад}}$ и $\text{Au}/\text{Te}_{\text{ад}}$ для изучения на них процессов адсорбции–десорбции адатомов металлов в условиях недонапряжения.

2. Исследован процесс электрохимической адсорбции атомов Pb на $\text{Au}/\text{Se}_{\text{ад}}$ - и $\text{Au}/\text{Te}_{\text{ад}}$ -электродах. Энергетические состояния $\text{Pb}_{\text{ад}}$ зависят от наличия субмонослоя или сверхмонослойных количеств халькогена – на кривых ЦВА процесс десорбции $\text{Pb}_{\text{ад}}$ с поверхности субмонослоев регистрируется при более отрицательных потенциалах. Электрохимическая адсорбция атомов Pb на $\text{Au}/\text{Se}_{\text{ад}}$ и $\text{Au}/\text{Te}_{\text{ад}}$ позволяет формировать субмонослойные структуры халькогенидов свинца – $\text{Au}/\text{PbSe}_{\text{ад}}$ и $\text{Au}/\text{PbTe}_{\text{ад}}$. Исследование временной стабильности субмонослойных халькогенидных структур в условиях разомкнутой цепи показало их достаточно высокую сохранность (десятки минут) в кислых водных растворах HNO_3 , насыщенном аргоном.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь (проект М96-044).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kolb D.M. // Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering / Eds Gerischer H., Tobias C.W. N. Y.: Wiley, 1978. V. 11. P. 125.
2. Jüttner K., Lorenz W.J. // Z. phys. Chem. 1980. Bd 122. S. 163.
3. Conway B.E. // Progr. Surface Sci. 1984. V. 16. P. 1.
4. Kolb D.M. // Ber. Buns. Phys. Chem. 1988. Bd. 92. S. 1175.

5. *Петрий О.А., Лана А.С.* // Итоги науки. Электрохимия. М.: ВИНТИ, 1987. Т. 24. С. 94.
6. *Данилов А.И., Молодкина Е.В., Полукаров Ю.М.* // Электрохимия. 1994. Т. 30. С. 748.
7. *Данилов А.И.* // Успехи химии. 1995. Т. 64. С. 818.
8. *Данилов А.И., Молодкина Е.В., Полукаров Ю.М.* // Электрохимия. 1997. Т. 33. С. 313.
9. *Данилов А.И., Молодкина Е.В., Полукаров Ю.М.* // Электрохимия. 1997. Т. 33. С. 320.
10. *Lucas C.A., Markovic N.M., Ross P.N.* // Phys. Rev. (B). 1998. V. 57. P. 13184.
11. *Yee H.S., Abruna H.D.* // Langmuir. 1993. V. 9. P. 2460.
12. *Sackmann J., Bunk A., Potzchke R.T., Staikov G., Lorentz W.J.* // Electrochim. Acta. 1998. V. 43. P. 2863.
13. *Adzic R.R., Despic A.R.* // J. Phys. Chem. 1974. V. 61. P. 3482.
14. *Adzic R.R., Despic A.R., Simic D.N., Drazic D.M.* // U. S. Nat. Bur. Stand. Spec. Publ. 1975. № 455. P. 191.
15. *Han-Wei L., Hattori H., Kita H.* // Electrochim. Acta. 1996. V. 41. P. 1619.
16. *Abe T., Swain G.M., Sashikata K., Itaya K.* // J. Electroanal. Chem. 1995. V. 382. P. 73.
17. *Herrero E., Llorca M.J., Feliu J.M., Aldaz A.* // J. Electroanal. Chem. 1995. V. 383. P. 145.
18. *Jüttner K.* // Electrochim. Acta. 1984. V. 29. P. 1597.
19. *Markovic N.M., Gasteiger H.A., Ross P.N.* // Langmuir. 1995. V. 11. P. 4098.
20. *Michaelis R., Zei M.S., Zhai R.S., Kolb D.M.* // J. Electroanal. Chem. 1992. V. 339. P. 299.
21. *Scortichini C.L., Reilley C.* // J. Electroanal. Chem. 1982. V. 139. P. 247.
22. *Брайнина Х.З., Никифоров В.В.* // Электрохимия. 1989. Т. 25. С. 1237.
23. *Gregory B.W., Stickney J.L.* // J. Electroanal. Chem. 1991. V. 300. P. 543.
24. *Gregory B.W., Suggs D.W., Stickney J.L.* // J. Electrochem. Soc. 1991. V. 138. P. 1279.
25. *Huang B.M., Colletti L.P., Gregory B.W., Anderson J.L., Stickney J.L.* // J. Electrochem. Soc. 1995. V. 142. P. 3007.
26. *Goetting L.B., Huang B.M., Lister T.E., Stickney J.L.* // Electrochim. Acta. 1995. V. 40. P. 143.
27. *Colletti L.P., Flowers B.H., Stickney J.L.* // J. Electrochem. Soc. 1998. V. 145. P. 1442.
28. *Colletti L.P., Stickney J.L.* // J. Electrochem. Soc. 1998. V. 145. P. 3594.
29. *Стрельцов Е.А., Лабаревич И.И., Талапин Д.В.* // Доклады АН Беларуси. 1994. Т. 38. С. 64.
30. *Demir U., Shannon C.* // Langmuir. 1994. V. 10. P. 2794.
31. *Boone B.E., Shannon C.* // J. Phys. Chem. 1996. V. 100. P. 9480.
32. *Demir U., Shannon C.* // Langmuir. 1996. V. 12. P. 594.
33. *Demir U., Shannon C.* // Langmuir. 1996. V. 12. P. 6091.
34. *Стрельцов Е.А., Осипович Н.П., Ивашкевич Л.С., Ляхов А.С.* // Докл. АН Беларуси. 1997. Т. 41. С. 69.
35. *Стрельцов Е.А., Осипович Н.П., Ивашкевич Л.С., Ляхов А.С., Свиридов В.В.* // Журн. прикл. химии. 1997. Т. 70. С. 1735.
36. *Стрельцов Е.А., Осипович Н.П., Ивашкевич Л.С., Ляхов А.С.* // Докл. АН Беларуси. 1997. Т. 41. С. 65.
37. *Streltsov E.A., Osipovich N.P., Ivashkevich L.S., Lyakhov A.S., Sviridov V.V.* // Electrochim. Acta. 1998. V. 43. P. 869.
38. *Streltsov E.A., Osipovich N.P., Ivashkevich L.S., Lyakhov A.S.* // Electrochim. Acta. 1998. V. 44. P. 407.
39. *Streltsov E.A., Osipovich N.P., Ivashkevich L.S., Lyakhov A.S.* // Electrochim. Acta. 1999. V. 45.
40. *Трассати С., Петрий О.А.* // Электрохимия. 1993. Т. 29. С. 557.
41. *Gregory B.W., Norton M.L., Stickney J.L.* // J. Electroanal. Chem. 1990. V. 293. P. 85.
42. *Suggs D.W., Stickney J.L.* // J. Phys. Chem. 1991. V. 95. P. 10056.
43. *Andrews R.W., Johnson D.C.* // Anal. Chem. 1975. V. 47. P. 294.
44. *Lister T.E., Stickney J.L.* // J. Electroanal. Chem. 1976. V. 100. P. 568.
45. *Takamura T., Takamura K., Nippe W., Yeager E.* // J. Electrochem. Soc. 1970. V. 117. P. 626.
46. *Takamura T., Sato Y., Takamura K.* // J. Electroanal. Chem. 1973. V. 41. P. 31.
47. *Vicente V.A., Bruckenstein S.* // Anal. Chem. 1973. V. 45. P. 2036.
48. *Adzic R., Yeager E., Cahan B.D.* // J. Electrochem. Soc. 1974. V. 121. P. 474.
49. *Lorenz W.J., Hermann H.D., Wüthrich N., Hilbert F.* // J. Electrochem. Soc. 1974. V. 121. P. 1167.
50. *Hamelin A., Katayama A.* // J. Electroanal. Chem. 1981. V. 117. P. 221.
51. *Hepel M., Kanige K., Bruckenstein S.* // Langmuir. 1990. V. 6. P. 1063.
52. *Green M.P., Hanson K.J., Scherson D.A., Xing X., Richter M., Ross P.N., Carr R., Lindau I.* // J. Phys. Chem. 1989. V. 93. P. 2181.
53. *Conway B.E., Chacha J.S.* // J. Electroanal. Chem. 1990. V. 287. P. 13.
54. *Binggeli M., Carnal D., Nyffenegger R., Siengenthaler H., Christoph R., Rohrer H.* // J. Vac. Sci. Technol. 1991. V. B9. P. 1985.
55. *Chen C., Washburn N., Gewirth A.* // J. Phys. Chem. 1993. V. 97. P. 9754.
56. *Brunt A., Rayment T., O'Shea S.J., Welland M.E.* // Langmuir. 1996. V. 12. P. 5942.