

УДК 544.03, 544.057, 544.63, 544.65

ПРОЦЕССЫ НА ПЛАТИНОВЫХ ЭЛЕКТРОДАХ ПРИ КАТОДНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В СПИРТОВОМ РАСТВОРЕ АЗОТНОКИСЛОГО ЭРБИЯ

© 2024 г. С. А. Волчек^{а, *}, В. А. Яковцева^{а, **}

^аБелорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Беларусь

* e-mail: volchek@bsuir.by

** e-mail: yakovtseva@yahoo.com

Поступила в редакцию 19.06.2023 г.

После доработки 23.10.2023 г.

Принята к публикации 27.10.2023 г.

Обсуждаются процессы, происходящие на платиновых электродах при катодной поляризации в спиртовом растворе нитрата эрбия. Установлено, что максимумы плотности тока на катодной ветви вольтамперограмм соответствуют потенциалам реакций восстановления водорода. Показано, что формирующийся в процессе катодной обработки гелеобразный осадок состава $\text{Er}(\text{OH})_x(\text{NO}_3)_y(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_z \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $x + y + z = 3$, не является продуктом электронного обмена между катодом и компонентами раствора. Предложен следующий механизм формирования эрбийсодержащего осадка. Сначала реализуется электрохимический процесс катодного восстановления водорода. Этот процесс приводит к ионному дисбалансу и вызывает подщелачивание прикатодного пространства. Тем самым создаются условия для реализации химического процесса формирования гелеобразной гидроокиси эрбия, которая физически адсорбируется на поверхности катода в виде осадка.

Ключевые слова: катодная поляризация, платиновый электрод, спиртовой раствор нитрата эрбия, эрбийсодержащий осадок, механизм формирования эрбийсодержащего осадка

DOI: 10.31857/S0424857024050021, EDN: QONHTM

PROCESSES AT PLATINUM ELECTRODES DURING THE CATHODE POLARIZATION IN ALCOHOL ERBIUM NITRATE SOLUTION

© 2024 S. A. Volchek^{а, *}, V. A. Yakovtseva^{а, **}

^аBelarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

*e-mail: volchek@bsuir.by

**e-mail: yakovtseva@yahoo.com

Abstract – The processes at platinum electrodes during the cathode polarization in an alcohol solution of erbium nitrate are discussed. The current density maxima on the cathode branch of voltammograms were found to correspond to the potentials of the hydrogen reduction reactions. The gel-like deposit $\text{Er}(\text{OH})_x(\text{NO}_3)_y(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_z \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $x + y + z = 3$, formed during the cathode treatment was shown to be not a product of the electron exchange between the cathode and the solution components. The following formation mechanism of the erbium-containing deposit has been suggested. First, the electrochemical process of the hydrogen cathode reduction is implemented. This process leads to the ionic unbalance and causes the alkalization of the cathode space. This creates conditions for the chemical process of the gel-like erbium hydroxide formation, which is physically adsorbed on the cathode surface as a precipitate.

Keywords: cathode polarization, platinum electrode, alcohol solution of erbium salt, erbium-containing deposit, formation mechanism of erbium-containing deposit

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что монокристаллический кремний является непрямозонным полупроводниковым материалом с очень низкой эффективностью межзонной излучательной рекомбинации. Придание кремнию люминесцентных свойств является актуальной задачей интегральной оптоэлектроники. Одним из возможных решений этой проблемы является введение в кремний редкоземельных элементов (РЗЭ). В этом случае люминесценция возникает за счет внутризонных переходов между $4f$ -состояниями ионов РЗЭ в кристаллическом поле. Поскольку $4f$ -электроны хорошо экранируются внешними $5s$ - и $5p$ -электронами, длина волны излучения слабо зависит как от природы кристаллической матрицы, в которую введен РЗЭ, так и от температуры [1].

Среди редкоземельных элементов особый интерес вызывает эрбий. В спектре люминесценции центра, содержащего трехзарядный ион эрбия Er^{3+} , наблюдается узкая температурно-независимая линия на длине волны 1.54 мкм, соответствующей минимуму оптических потерь и дисперсии в волокнах из кварцевого стекла [2]. Свет с длиной волны 1.54 мкм также хорошо распространяется в кремнии. Это открывает широкие перспективы использования легированных эрбием кремниевых структур Si:Er для оптоэлектронных применений.

К настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал по введению эрбия в кремний различными методами. Показано, что для создания структур Si:Er могут быть использованы методы ионной имплантации [3, 4] и термодиффузии [5]. Однако для реализации этих методов требуются дорогостоящее энергоемкое специализированное оборудование и большие временные затраты. Кроме того, из-за низкого коэффициента диффузии эрбия в кремнии толщина слоев Si:Er, формируемых методами ионной имплантации и термодиффузии, не превышает 0.5–1 мкм, в то время как для обеспечения эффективного распространения света в слоях Si:Er на длине волны люминесценции Er она должна быть более 1.54 мкм.

Процесс легирования кремния РЗЭ можно активировать, если создать в монокристалле кремния развитую сеть пор, т. е. сформировать на поверхности монокристаллической подложки слой пористого кремния (ПК). Слои пористого кремния можно создавать путем анодной электрохимической обработки монокристаллических кремниевых пластин в растворах на основе

фтористоводородной кислоты. Изменяя условия анодной обработки, можно получать слои ПК толщиной до 100 мкм с объемной плотностью 0.7–2.1 г/см³ при диаметре пор от десятков нанометров до 0.1–0.5 мкм. Развитая поверхность пор облегчает глубокое проникновение примесей в пористый слой по сравнению с объемным кремнием, что позволяет формировать толстые слои Si:Er.

Еще в 1994 г. впервые была показана возможность введения эрбия в ПК в процессе электрохимической обработки [6]. После катодной обработки в спиртовых растворах соли ErCl_3 с последующим отжигом при высоких (~1000°C) температурах слои ПК демонстрировали люминесценцию на длине волны 1.54 мкм, что убедительно подтверждало присутствие эрбия в материале. Однако известно, что электрохимическое восстановление ионов эрбия из растворов их солей практически невозможно, поскольку равновесный электродный потенциал соответствующих реакций восстановления составляет –2.296 В [7]. При попытках обеспечить катодную поляризацию кремния до этого потенциала, в растворах происходит опережающее электрохимическое разрушение растворителей. Поэтому несомненный интерес представляет как изучение процессов, протекающих при катодной электрохимической обработке кремния в растворах солей РЗЭ, так и выяснение механизма образования эрбий-содержащего осадка на кремниевых подложках.

Однако кремний как полупроводниковый материал является достаточно сложным объектом при изучении электрохимических обработок по следующим причинам. Во-первых, при контакте с раствором в приповерхностной области кремния возникает область пространственного заряда (ОПЗ), на которой падает часть напряжения поляризации, прикладываемого к исследуемой системе. Зависимость тока поляризации от напряжения поляризации является нелинейной функцией, что приводит к искажению информации об электрохимических процессах на электродах. Во-вторых, на поверхности полупроводника существуют поверхностные состояния, которые осложняют интерпретацию процессов на исследуемой границе раздела. В-третьих, количество свободных электронов в полупроводнике, по крайней мере, на несколько порядков меньше, чем в металле, что приводит к осложнению осуществления электрохимических реакций на электроде. Это приводит к тому, что важная информация об электрохимических реакциях может быть искажена или потеряна. В этой связи исследованию катодных

процессов в эрбийсодержащих растворах на пористом кремнии предшествовало изучение этих процессов на плоских непористых платиновых электродах. Платину выбирали по следующим соображениям. Во-первых, платина химически и электрохимически не вступает в окислительно-восстановительные реакции. Во-вторых, электрохимические свойства поверхности платины хорошо воспроизводимы от опыта к опыту.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для изучения катодных процессов на платиновых электродах использовалась электрохимическая ячейка, конструкция которой представлена на рис. 1.

Ячейка состоит из рабочего электрода (катода) 1, электрода сравнения с капилляром Луггина 2, вспомогательного электрода (анода) 3 и стеклянного стакана 4. В качестве электрода сравнения использовали хлоридсеребряный электрод, заправленный одномолярным раствором хлористого калия. Анодом служила пластина спектрально чистого графита. Напряжение на электродах задавали с помощью импульсного

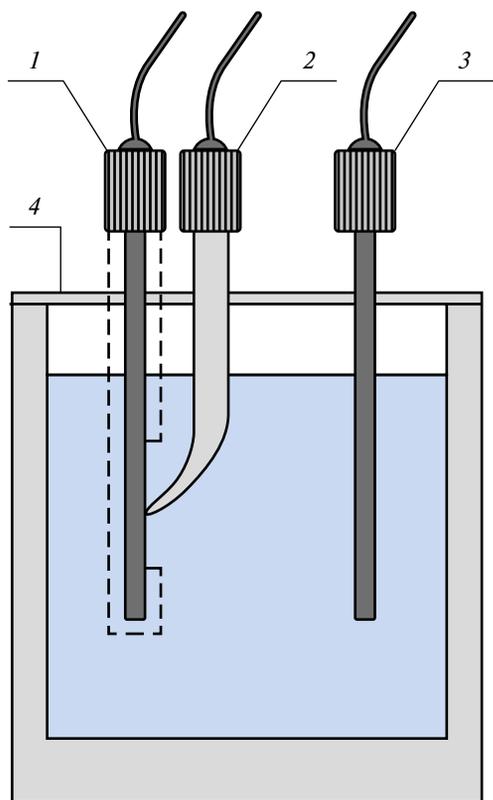


Рис. 1. Конструкция электрохимической ячейки для изучения катодных процессов на платиновых электродах: 1 – рабочий электрод (катод), 2 – электрод сравнения, 3 – вспомогательный электрод (анод), 4 – стеклянный стакан.

потенциостата и программатора. Ток, генерируемый в системе, измеряли между рабочим и вспомогательным электродами, а напряжение – между рабочим электродом и электродом сравнения.

Для приготовления рабочего 0.1 М раствора $\text{Er}(\text{NO}_3)_3$ использовали этиловый спирт (95% $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 5\% \text{H}_2\text{O}$) и пятиводную азотнокислую соль эрбия 99.9% “х. ч.” $\text{Er}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Для исследования электрохимических процессов, происходящих на границе раздела электрод/раствор, использовали вольтамперометрию с однократной линейной и циклической развертками потенциала. По вольтамперограммам (ВА) можно получить информацию о кинетике переноса заряда, обратимости электрохимических реакций, окислительно-восстановительных потенциалах электроактивных веществ, адсорбции и химической иммобилизации веществ.

Наблюдаемая плотность тока при вольтамперометрии с линейной разверткой потенциала является суммой нефарадеевской i_{nf} и фарадеевской i_{f} компонент, что соответствует априорному разделению этих компонент тока в виде:

$$i = i_{\text{nf}} + i_{\text{f}} = C_d \frac{dE}{dt} + i_{\text{f}}, \quad (1)$$

где C_d – емкость двойного слоя, E – истинный электродный потенциал, t – время. Емкость двойного слоя зависит от потенциала, поэтому нефарадеевская компонента не является постоянной. В вольтамперометрии с медленной разверткой (т. е., со скоростью развертки напряжения меньше 1 В с^{-1}) плотности нефарадеевского тока обычно малы по сравнению с фарадеевскими. При более высоких скоростях развертки нефарадеевская компонента может стать довольно большой и оказывать значительное влияние на форму ВА.

Для обратимого катодного процесса переноса электрона типа $\text{O} + ne \leftrightarrow \text{R}$ плотность фарадеевского тока:

$$i_{\text{f}} = i_{\text{p}} + i_{\text{s}}, \quad (2)$$

где i_{p} – плотность тока на плоском электроде и i_{s} – поправка на его сферичность. Фарадеевская плотность тока на плоском электроде связана со скоростью ν развертки напряжения в катодном направлении соотношением:

$$i_{\text{p}} = \frac{(nF)^{3/2} c_{\text{O}}^0 (\nu D_{\text{O}})^{1/2} W_{\text{p}}}{(RT)^{1/2}}, \quad (3)$$

где c_{O}^0 – объемная концентрация частиц O , D_{O} – коэффициент диффузии этих частиц, W_{p} – функция электродного потенциала. Для W_{p} трудно

дать точное выражение, однако имеются таблицы численных значений [8]. Поправка на сферичность также представлена в этой работе.

На рис. 2 показана теоретическая вольтамперограмма при линейной развертке потенциала в случае обратимого переноса заряда.

Форма ВА для процесса обратимого переноса заряда в основном определяется множителем W_p , который проходит через максимум по мере смещения потенциала в катодном направлении. Потенциал максимального тока равен

$$E_m = E_{1/2} - \frac{(1.11)RT}{nF} = E_{1/2} - \frac{(1.11)kT}{ne}, \quad (4)$$

где $E_{1/2}$ – потенциал полуволны, R – газовая постоянная, T – абсолютная температура, F – число Фарадея, n – число электронов, k – постоянная Больцмана, e – заряд электрона.

Потенциал максимального тока не зависит от скорости развертки, что дает возможность экспериментальной проверки обратимости процесса. Потенциал полуволны $E_{1/2}$ можно определить по ВА, соответствующей обратимому случаю, поскольку этот потенциал имеет место при $I = 0.852i_m$, где i_m – пиковая плотность тока [8]. Величина i_m зависит от скорости развертки и в случае плоского электрода равна

$$(i_p)_m = \frac{0.447 (nF)^{3/2} c_O^0 (vD_O)^{1/2}}{(RT)^{1/2}}, \quad (5)$$

Таким образом, по ВА можно определить число электронов, участвующих в элементарном акте (см. рис. 2):

$$\Delta E = E_{1/2} - E_m = 1.1 \frac{RT}{nF}, \quad (6)$$

На основе вышеописанной методики определяли количество электронов, принимающих участие в элементарном акте электрохимических реакций, исследуемых в работе.

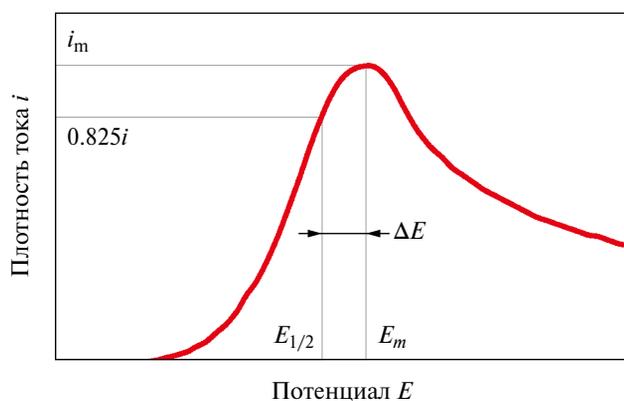
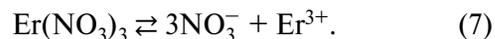


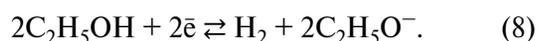
Рис. 2. Вольтамперограмма при линейной развертке потенциала в случае обратимого переноса заряда.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

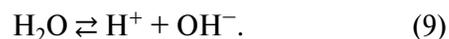
Как указывалось выше, рабочий 0.1 М спиртовой раствор $\text{Er}(\text{NO}_3)_3$ содержит этиловый спирт (95% $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ + 5% H_2O) и азотнокислый эрбий $\text{Er}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Как соль сильной кислоты (HNO_3), азотнокислый эрбий при растворении в воде диссоциирует на положительно заряженные ионы Er^{3+} и отрицательно заряженные ионы NO_3^- :



Электролиз этилового спирта происходит по реакции:



Вода – слабый амфотерный электролит, и в растворе имеет место ее одноступенчатая диссоциация:



При погружении платинового электрода в раствор, содержащий заряженные частицы, происходят следующие процессы. Отрицательно заряженная поверхность платинового электрода адсорбирует положительно заряженные ионы эрбия Er^{3+} и водорода H^+ . На границе металл/раствор происходит эквивалентный обмен зарядами. Со временем количество зарядов, переносимых в раствор и обратно, выравнивается и устанавливается на вполне определенном значении. В установившемся стационарном состоянии потенциал определяется равновесием между адсорбированным на платиновом электроде и растворенным веществом. Условием образования стационарного потенциала является равенство скоростей переноса зарядов в прямом и обратном направлениях, т. е. баланс зарядов. При этом ток электронов из металла в раствор равен их току из раствора в металл. Силу этого тока, отнесенную к единице поверхности электрода, называют током обмена.

Для определения времени достижения платиновым электродом стационарного значения катодного потенциала была исследована зависимость потенциала платинового электрода от времени в рабочем растворе без приложения внешнего напряжения (рис. 3).

Как видно из рис. 3, время установления потенциала до стационарного значения ($E \sim 320$ мВ) составляет 4 мин. В течение этого времени устанавливается равновесие токов обмена между платиновым электродом и раствором, а также происходит процесс сорбции положительно заряженных ионов из раствора.

Проанализируем процессы, происходящие при приложении катодного потенциала к платиновому

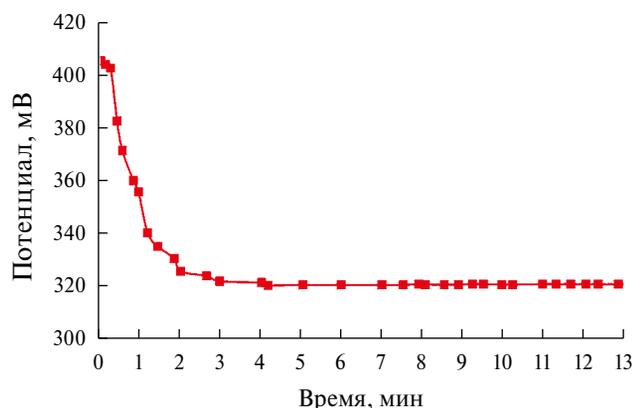


Рис. 3. Временная зависимость потенциала платинового электрода в 0.1 М спиртовом растворе $\text{Er}(\text{NO}_3)_3$ без приложения внешнего потенциала.

электроду. На рис. 4 представлена вольтамперограмма платинового катода в 0.1 М спиртовом растворе $\text{Er}(\text{NO}_3)_3$. Видно, что на прямой катодной ветви наблюдаются два небольших максимума плотности тока при потенциалах примерно +50 и -400 мВ. При потенциале -650 мВ плотность тока значительно возрастает. На обратной катодной ветви наблюдается один максимум плотности тока при потенциале примерно -250 мВ.

В ходе исследований было обнаружено, что при потенциалах от -400 до -500 мВ на платиновом катоде наблюдается выделение единичных пузырьков газа. При дальнейшем увеличении потенциала до -650 мВ и выше на катоде происходит бурное газообразование. Предполагается, что максимумы плотности тока на прямой катодной ветви соответствуют потенциалам реакций восстановления водорода. Водород является продуктом диссоциации как этилового спирта (константа автопротолиза $10^{-19.1}$), так и воды (константа автопротолиза 10^{-14}) [9]. Вода

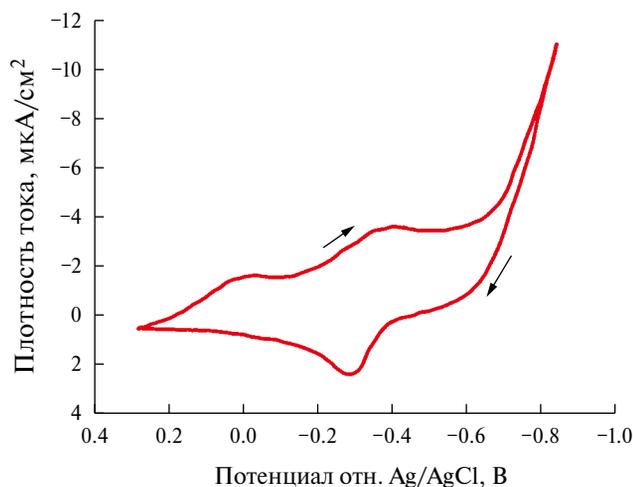
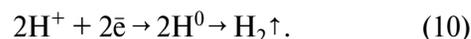


Рис. 4. Вольтамперограмма платинового электрода в 0.1 М спиртовом растворе $\text{Er}(\text{NO}_3)_3$.

поступает в раствор из двух источников: этилового спирта (95% $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 5\% \text{H}_2\text{O}$) и пятиводной азотнокислой соли эрбия $\text{Er}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Для подтверждения этого предположения были проведены дополнительные исследования. На рис. 5 представлены циклические ВА платинового электрода в 0.1 М спиртовом растворе $\text{Er}(\text{NO}_3)_3$, снятые в диапазоне от +400 до -800 мВ при различных скоростях развертки потенциала.

Как видно из рис. 5, на ВА наблюдается один пик тока. Расчеты, проведенные по методике [8], показывают, что полуширина данного пика при токе $I = 0.852 I_{\text{max}}$ составляет ~28 мВ. Это свидетельствует о том, что при потенциале -400 мВ протекает реакция с участием одного электрона в элементарном акте [8].

Анализ анионного и катионного состава рабочего раствора и стандартных электродных потенциалов для возможных катодных реакций с их участием [10], а также учитывая, что при данном потенциале на платиновом электроде наблюдается образование единичных пузырьков газа, позволил сделать следующие выводы. Пик плотности тока при 50 мВ на рис. 3 соответствует разряду и адсорбции атомарного водорода по реакции:



Малая амплитуда данного пика свидетельствует о небольшом количестве адсорбированного водорода на поверхности платинового электрода.

При потенциале -400 мВ реализуется реакция восстановления молекулярного водорода:

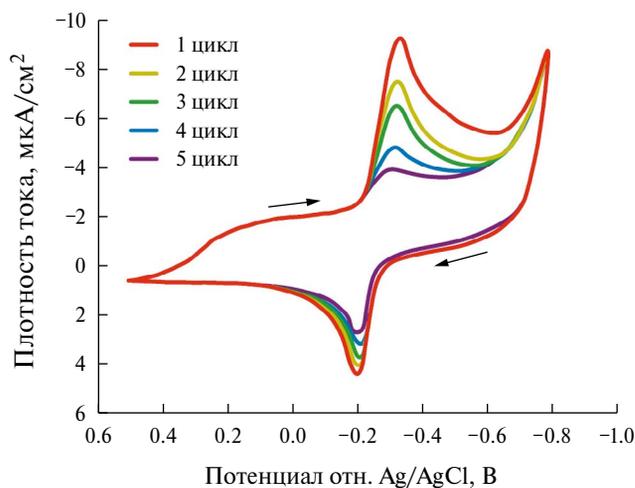
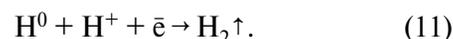


Рис. 5. Циклические вольтамперограммы платинового электрода в 0.1 М спиртовом растворе $\text{Er}(\text{NO}_3)_3$, снятые в диапазоне от +400 до -800 мВ при различных скоростях развертки потенциала.

Значительное возрастание плотности тока при потенциалах выше -650 мВ и наблюдаемое при этом бурное газообразование связано с процессом прямого электролиза этилового спирта и воды с образованием молекулярного водорода.

В результате катодной обработки в 0.1 М спиртовом растворе $\text{Er}(\text{NO}_3)_3$ поверхность платинового электрода покрывалась прозрачным осадком гелеобразной консистенции. Химическое исследование осадка показало, что он хорошо растворяется в разбавленных соляной и азотной кислотах, но практически нерастворим в воде. Рентгеновский микроанализ обнаружил присутствие эрбия в составе осадка. Однако на ВА в катодной области не обнаруживаются никаких других пиков, кроме водородных. Это означает, что на поверхности платинового катода не происходит никаких других электрохимических реакций, кроме восстановления атомарного и молекулярного водорода, и непосредственно на электроде не образуется никаких других продуктов.

На обратной катодной ветви (см. рис. 4 и 5) платинового электрода зафиксирован пик плотности тока при потенциале примерно -250 мВ. По расположению пика на ВА и величине его полуширины при $I = 0.852 I_{\text{max}}$, равной ~ 27 мВ, можно утверждать, что этот пик соответствует реакции окисления молекулярного водорода [8]. Как видно, пик окисления водорода смещен относительно пика восстановления. Причиной сдвига может быть наличие осадка на поверхности электрода, что приводит к изменению потенциала реакции окисления водорода.

Как видно из циклических ВА, амплитуда пикового тока, соответствующая окислению-восстановлению молекулярного водорода, уменьшается с каждым последующим циклом. Хорошо известно, что амплитуда пикового тока пропорциональна коэффициенту диффузии ионов, вовлеченных в реакцию электронного обмена. С увеличением толщины осадка доставка ионов водорода к поверхности платинового электрода затрудняется. Поэтому амплитуда пика, соответствующая реакции окисления-восстановления водорода, уменьшается с каждым последующим циклом. Промывка платинового электрода в кислотах или механическое удаление осадка восстанавливают амплитуду пикового тока при потенциале -400 мВ.

Однако в анодной области на ВА не обнаруживаются никаких других пиков, кроме водородных. Это свидетельствует о том, что процесс образования, равно как и разрушения осадка, не связан непосредственно с электронным обменом между электродом и раствором.

Рассмотрим реакции, происходящие во время электрохимической катодной обработки платинового электрода. Единственно возможная окислительно-восстановительная реакция эрбия

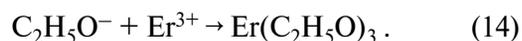


имеет стандартный потенциал -2.296 В. В то же время электрохимическая стабильность этилового спирта ограничена областью потенциалов $-1 \dots -1.5$ В. Поэтому очевидно, что реакция катодного восстановления эрбия (12) оказывается нереализуемой в спиртовом растворе.

Как было показано выше, при катодной поляризации на поверхности электрода происходит восстановление водорода по реакциям (10) и (11). При этом прикатодная область обедняется ионами H^+ и ионное равновесие в растворе сдвигается в сторону избытка групп OH^- . Иначе говоря, происходит подщелачивание прикатодного пространства. Тем самым создаются условия для протекания химической реакции образования гидроокиси эрбия, поскольку известно, что при равновесных условиях в растворах с pH $6.8-7.5$ наблюдается химическая реакция образования гидроокисей лантаноидов $\text{Ln}(\text{OH})_3$ [11, 12]:



Кроме того, появляется избыток спиртовых радикалов по отношению к ионам водорода H^+ . При этом происходит реакция объединения ионов Er^{3+} с радикалами спирта. Данная реакция проходит без участия свободных электронов, т. е. является химической реакцией:



Таким образом, при достижении определенного значения кислотности раствора в прикатодной области начинает формироваться соединение $\text{Er}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_3$ по реакции (14). Эта реакция реализуется не только непосредственно у поверхности катода, но и в толще раствора на некотором удалении от катода. При этом концентрация эрбийсодержащих молекул будет максимальной у поверхности электрода и уменьшается с увеличением расстояния от электрода вглубь раствора.

По достижении определенной концентрации эрбийсодержащих молекул у поверхности электрода происходит образование геля. Этот гель, в последующем физически адсорбируясь на поверхности электрода, формирует эрбийсодержащий осадок.

Для исследования состава осадка были измерены ИК-спектры пропускания образцов и проведен ВИМС-анализ. Оба метода подтвердили наличие эрбия в составе осадка. На ИК-спектрах

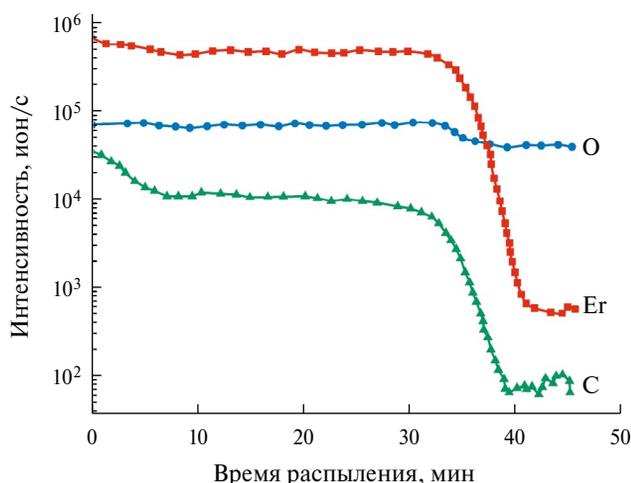


Рис. 6. ВИС профили распределения элементов в эрбийсодержащей пленке.

пропускания наблюдались полосы поглощения, соответствующие координационно-связанным (би- или моноквантно в симметрии C_{2v} и C_s соответственно) группам NO_3^- . Кроме того, в ИК-спектрах присутствовали полосы поглощения, связанные с наличием групп CH_3 и CH_2 , характеризующих спиртовый радикал $C_2H_5O^-$. При проведении ВИС распыление образца осуществляли ионами азота. На рис. 6 представлен профиль распределения элементов в осажденной пленке от времени распыления ионами азота.

Как видно из рисунка, по всей толщине пленки в значительном количестве регистрируются эрбий, кислород и углерод. Профили распределения азота не приведены, поскольку распыление образца при регистрации ВИС-спектра проводили ионами азота. Присутствие углерода в осадке подтверждает предположение о включении спиртового радикала ($C_2H_5O^-$) в состав эрбийсодержащего осадка.

Таким образом, результаты химического, ИК- и ВИС-анализа осадка, полученного при катодной поляризации платинового электрода в спиртовом растворе азотнокислого эрбия, показывают, что осадок содержит Er^{3+} , OH^- и NO_3^- – группы и спиртовый радикал $C_2H_5O^-$. Состав осадка можно представить как $Er(OH)_x(NO_3)_y(C_2H_5O)_z \cdot nH_2O$. Поскольку в соединениях степень окисления эрбия 3+, стехиометрические коэффициенты будут равны $x + y + z = 3$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что при катодной обработке платиновых электродов в 0.1 М $Er(NO_3)_3$ спиртовом растворе происходят реакции окисления

восстановления водорода и образуется гелеобразный осадок, содержащий эрбий. Установлено, что формирующийся осадок не является продуктом электронного обмена между катодом и компонентами раствора. Предложен следующий механизм формирования эрбийсодержащего осадка. Сначала реализуется электрохимический процесс катодного восстановления водорода на платиновых катодах. Этот процесс формирует ионный дисбаланс в прикатодной области и обуславливает увеличение щелочности раствора в прикатодном пространстве. Тем самым создаются условия для протекания химической реакции образования гидроксида эрбия. Физическая адсорбция геля на поверхности катода и формирует эрбийсодержащий осадок. Установлено, что эрбийсодержащий осадок имеет состав $Er(OH)_x(NO_3)_y(C_2H_5O)_z \cdot nH_2O$, где $x + y + z = 3$.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность доценту БГУИР кандидату технических наук В. А. Петровичу за ценные замечания при написании статьи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной поддержке Государственных программ научных исследований Республики Беларусь “Материаловедение, новые материалы и технологии”, подпрограмма “Многофункциональные и композиционные материалы”, задание № 4.1.5, и “Фотоника и электроника для инноваций”, подпрограмма “Микро- и нанoeлектроника”, задание № 3.6.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reisfeld, R., Application of luminescence spectroscopy in new materials for solar energy utilization, *Online Elsevier Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.11688-9>
2. Kenyon, A.J., Erbium in silicon, *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, vol. 20, p. R65.
3. Феклистов, К.В., Абрамкин, Д.С., Ободников, В.И., Попов, В. П. Легирование кремния эрбием методом имплантации атомов отдачи. *Письма в ЖТФ*. 2015. Т. 41. № 16. С. 52. [Feklistov, K.V., Abramkin, D.S., Obodnikov, V.I., and Popov, V.P.,

- Doping silicon with erbium by recoil implantation, *Techn. Phys. Lett.*, 2015, vol. 41 (8), p. 788.]
<https://doi.org/10.1134/S1063785015080209>
4. Kukharchyk, N., Pal, S., Rödiger, J., Ludwig, A., Probst, S., Ustinov, A.V., Bushev, P., and Wieck, A.D., Photoluminescence of focused ion beam implanted Er³⁺: Y₂SiO₅ crystals, *Phys. Status Solidi (RRL) – Rapid Res. Lett.*, 2014, vol. 8 (10), p. 880.
<https://doi.org/10.1002/pssr.201409304>
 5. Drozdov, M.N., Latukhina, N.V., Stepikhova, M.V., Pokoeva, V.A., and Surin, M.A., Oxygen and erbium distribution in diffusion doped silicon, *Modern Electronic Mater.*, 2016, vol. 2, p. 7.
<https://doi.org/10.1016/j.moem.2016.08.001>
 6. Kimura, T., Yokoi, A., Horiguchi, H., and Saito, R., Electrochemical Er doping of porous silicon and its room-temperature luminescence, *Appl. Phys. Lett.*, 1994, vol. 65, p. 983.
<https://doi.org/10.1063/1.112169>
 7. Pourbaix, M. *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*. Second English Edition. National Association of Corrosion Engineer, 1974, 645 p.
 8. *Методы измерения в электрохимии: в 2 т.*, под ред. Ю. А. Чизмаджева. М.: Мир, 1977. Т. 1. 588 с.
 9. Фритц, Дж., Шенк, Г. *Количественный анализ*. Пер. с англ. Т. Н. Шеховцовой, О. А. Шпигуна; под ред. Ю. А. Золотова. М.: Мир, 1978. 557 с.
 10. Bard, A.J. and Faulkner, L. R. *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 2nd ed.; New York: Wiley, 2001, 850 p.
 11. *The Rare Earth Elements Fundamentals and Applications*, Atwood D. A., Ed., John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, UK, 2012, 629 p.
 12. *Handbook on the physics and chemistry of rare earths, vol.01*, Gschneidner K. A., Jr. et al. Eds., Elsevier, 1978, 900 p.