

Ф И З И К А

УДК 535.37+541.1382

DOI: 10.31429/vestnik-16-2-59-67

ТЕРМОВЛИЯНИЕ НА КИНЕТИКУ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ АЛЮМИНИЯ И ТАНТАЛА ПРИ ИХ АНОДИРОВАНИИ В ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЕ

Овеченко Д. С., Бойченко А. П.

THERMAL INFLUENCE ON THE ELECTROLUMINESCENCE KINETICS OF ALUMINUM AND TANTALUM IN THEIR ANODIZATION IN DISTILLED WATER

D. S. Ovechenko, A. P. Boychenko

Kuban State University, Krasnodar, Russia
e-mail: bojchenco@yandex.ru

Abstract. For example, metals from Al and Ta, anodized at a voltage of 1.2 kV in pure distilled water (DW) with an initial electrical conductivity of $1.7 \cdot 10^{-4}$ S/m, for the first time, the possibilities of generating electroluminescence (EL) and the studied kinetics of its luminosity change are available in terms of thermal stabilization and thermal effect of current flow (joule heating). At the same time, a significant influence of the latter conditions on the kinetic and other characteristics of EL for both metals and the morphology formed on them of oxide films, as well as on the electrical conductivity of the DW, was established. Under conditions of thermal stabilization, the change in the initial value is $42 \cdot 10^{-4}$ S/m for the Al anode and $141 \cdot 10^{-4}$ S/m for the anode from Ta, and the thermal stabilization is the change in the value of this parameter for the listed Me $71 \cdot 10^{-4}$ S/m and $9 \cdot 10^{-4}$ S/m, respectively. The induced current flow through the DW changes the temperature leads to the formation of a more disordered structure of oxide films in Al and Ta. In addition, in a number of metal anodes, such as Pt, Pd, Ir, Rh, Sn, Cu, Ag, Cr, and Mo, at a voltage of even 2 kV in the DW, no light emission was detected, despite the formation of the last three metals noticeable film anodizing products.

Keywords: anodization, aluminum and tantalum, distilled water, electroluminescence, thermal influence.

Введение

Перспективной технологией создания тонкопленочных покрытий и барьерных слоев с наноструктурой на различных металлах (Me) является в настоящее время их электролитическое анодирование [1], благодаря которому удается создавать материалы и их композиции с заданными физико-химическими [2, 3], оптическими [4, 5] и другими свойствами. Для генерируемого в этом процессе светового излучения разные авторы использовали различную терминологию: гальванолюминесценция [6, 7], электрохемилюминесценция [8], электролюминесценция [9, 10] и пр. Очевидно, что различие терминов, интерпретация результатов исследований явления и отсутствие единства в понимании его механизма связаны как с сочетанием разнородных Me под какой-то полярностью напряжения, так и с преимущественным использованием вод-

ных растворов электролитов неорганической или органической природы (кислоты, щелочи, соли), которые фактически представляют собой смеси растворителя и растворенного вещества. На эту особенность условий анодирования Me указывали авторы [3], проводившие его исследования на примере Al в деионизованной воде при постоянном и импульсном напряжении до 2 кВ. Аналогичным исследованиям анодирования Zn в дистиллированной воде посвящены работы малазийских ученых [11, 12], отмечавших влияние температуры (T) на этот процесс [12]. Хотя перечисленные работы [3, 11, 12] посвящены только анодированию Al и Zn, описываемые в них процессы явно указывают на существование электрогенерированной люминесценции.

Как в деионизованной, так и в дистиллированной воде (ДВ) нами выявлены условия генерации светового излучения при анодиро-

Овеченко Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета; e-mail: bojchenco@yandex.ru.

Бойченко Александр Павлович, д-р физ-мат наук, доцент, доцент кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета; e-mail: bojchenco@yandex.ru.

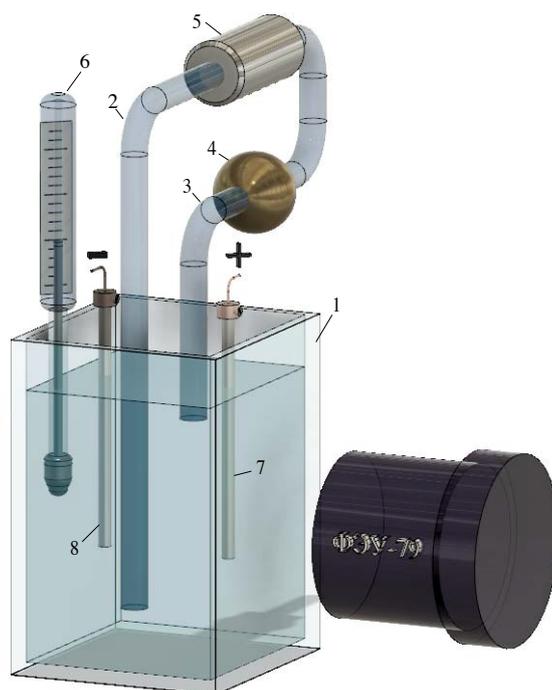


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования ЭЛ при анодировании Me (описание в тексте)

вании целого ряда Me таблицы Д.И. Менделеева: Ti, W, In, Ga, Nb, Al, Ta, а также Si при постоянном напряжении на электродах, начиная от 500 В [13,14]. Это позволяет исследовать явление без влияния каких-либо добавок электролитов, упрощая интерпретацию результатов. Настоящая работа посвящена первым результатам исследований наиболее яркого свечения электродов из Al и Ta, возникающего при их анодировании в ДВ как высокоомном электролите и влияния на это явление теплового эффекта при протекании тока (джоулев нагрев). Учитывая, что в настоящее время отсутствует единое понимание механизма описанного явления, особенно в чистой воде, его пока условно будем называть электролюминесценцией (ЭЛ).

1. Экспериментальная часть

Регистрация ЭЛ осуществлялась на установке, схему конструкции которой отражает рис. 1. Здесь 1 — кювета из кварца (диапазон пропускания 190–2000 нм) с входным — 2 и выходным — 3 патрубками для циркуляции воды, подаваемой с помощью перистальтического насоса — 4 через термостат — 5; 6 — термометр; 7 — исследуемый Me-анод, выполненный из проволоки диаметром 0,59 мм и чистотой 99,999 % для Al и 99,99 % — для Ta-

проволоки диаметром 0,5 мм, которые ориентировались к фотокатоду фотоэлектронного умножителя (ФЭУ-79); 8 — Pt-катод с чистотой металла 99,999 %, выполненный из проволоки диаметром 0,5 мм и одинаковой с анодом длины. Расстояние между электродами составляло 12 мм, а площадь их рабочей поверхности определялась по высоте анодированной части проволок, в среднем составлявшей 22 мм и соответствующей фиксированному в ходе экспериментов уровню жидкости. Удельная электропроводность σ исходной ДВ имела значение $1,7 \cdot 10^{-4}$ См/м, что соответствует ГОСТ 6709-72. При фиксированном на электродах внешнем напряжении 1,2 кВ и температуре 298 К в ходе всего времени анодирования $t = 1700$ с они омывались ДВ общим объемом 20 мл со скоростью потока 0,33 мл/с. Генерируемому в этом процессе излучению Me-анодов сопутствовало выделение пузырьков газа на электродах, что однозначно указывало на электролиз воды. Для выявления влияния теплового эффекта протекания тока через ДВ на характеристики ЭЛ термостат исключался. При этом исходная T в данном варианте эксперимента составляла $300 \pm 0,5$ К.

По общепринятым методикам регистрировались изменения во времени величин свети-

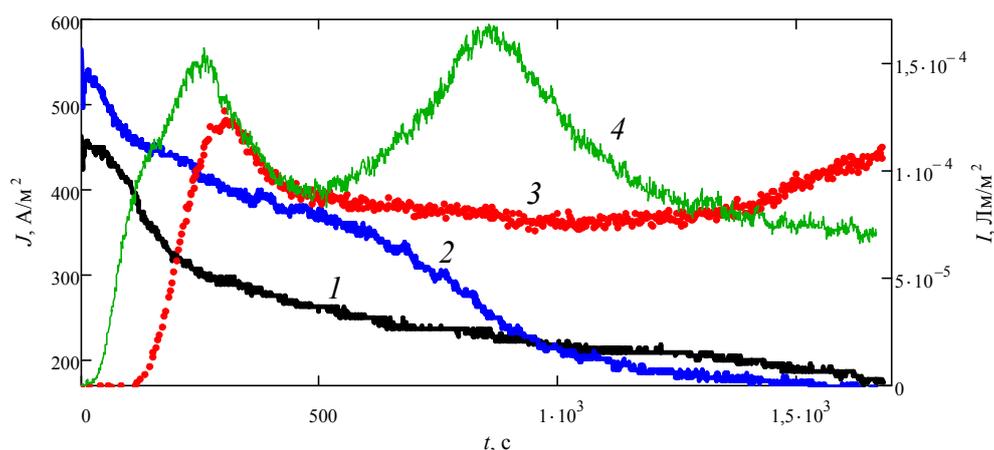


Рис. 2. Кинетические зависимости плотности тока (1), (2) и светимости ЭЛ (3), (4) при высоковольтном анодировании Al в ДВ: (1), (3) — при $T = 298$ К; (2), (4) — при $\Delta T = 11 \pm 1$ К

мости ЭЛ (I) и плотности тока между электродами (J), а по достижении времени анодирования 1700 с — конечная электропроводность воды (она измерялась спустя 45 суток после анодирования Me с целью установления химического равновесия между образовавшимися продуктами) и температура, по которым определялось их изменение ($\Delta\sigma$ и ΔT) относительно исходных значений. По кинетическим зависимостям $J(t)$ и $I(t)$ оценивались: исходная плотность тока между электродами (J_0) и момент зажигания ЭЛ (t_z) со светимостью (I_z) при соответствующем ей токе (J_z). Анализ морфологии продуктов анодирования на поверхности Me проводился при 10000-кратном увеличении электронного микроскопа. Усредненные по трем измерениям результаты оценки перечисленных параметров для Al и Ta представлены на рис. 2–5 и в табл. 1 (рис. 3 представлен двумя отдельными графиками из-за близости величин измеряемых параметров).

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Как видно из рис. 2 и рис. 3а, при фиксированных температуре и напряжении на электродах из разнородных Me кинетические зависимости плотности тока и светимости ЭЛ для них количественно различаются. Для системы Al–Pt первый параметр характеризуется монотонным спадом за все время процесса анодирования, а для Ta–Pt системы — ток за первые 240 с падает до 315 A/m^2 , а затем сохраняет это значение до окончания названного процесса. Существенные различия име-

ют время зажигания ЭЛ и ее кинетика. Так, на Al-аноде вспышка света возникает на 134 секунде после приложенного напряжения в момент достижения плотности тока 361 A/m^2 , а на аноде из Ta — это происходит через 54 с при $J_z = 429 \text{ A/m}^2$ (см. табл. 1). Кинетическая зависимость светимости ЭЛ для первого металла имеет максимум в $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ Лм/м}^2$ на 300-й секунде анодирования, а к его завершению выходит на значение $1,1 \cdot 10^{-4} \text{ Лм/м}^2$. В случае анода из Ta наблюдается более яркая ЭЛ, зависимость $I(t)$ которой имеет два максимума со светимостями $3,8 \cdot 10^{-4} \text{ Лм/м}^2$ на 300-й секунде и $9,0 \cdot 10^{-4} \text{ Лм/м}^2$ на 1650-й секунде соответственно. Причем, в промежутке между максимумами, начиная с 800-й секунды и до окончания процесса анодирования, на кинетической кривой $I(t)$ наблюдаются стохастически чередующиеся вспышки амплитудой до $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Лм/м}^2$ и средней длительностью 2 с, по виду подобные регистрируемым на начальной стадии высоковольтного пробоя деионизованной воды [15] и у ЭЛ на пропитанных растворами электролитов ионообменных мембранах [16, 17]. О влиянии продуктов анодирования и процесса электролиза ДВ на ее электрические свойства говорят данные изменения $\Delta\sigma$ в сторону увеличения, что видно из таблицы. Относительно исходного значения электропроводности ДВ это изменение для Al–Pt системы электродов составило $42 \cdot 10^{-4} \text{ См/м}$, а для Ta–Pt системы — $141 \cdot 10^{-4} \text{ См/м}$.

Учитывая, что в результате вышеописанных процессов на анодах формируется оксидная пленка с высокими диэлектрическими

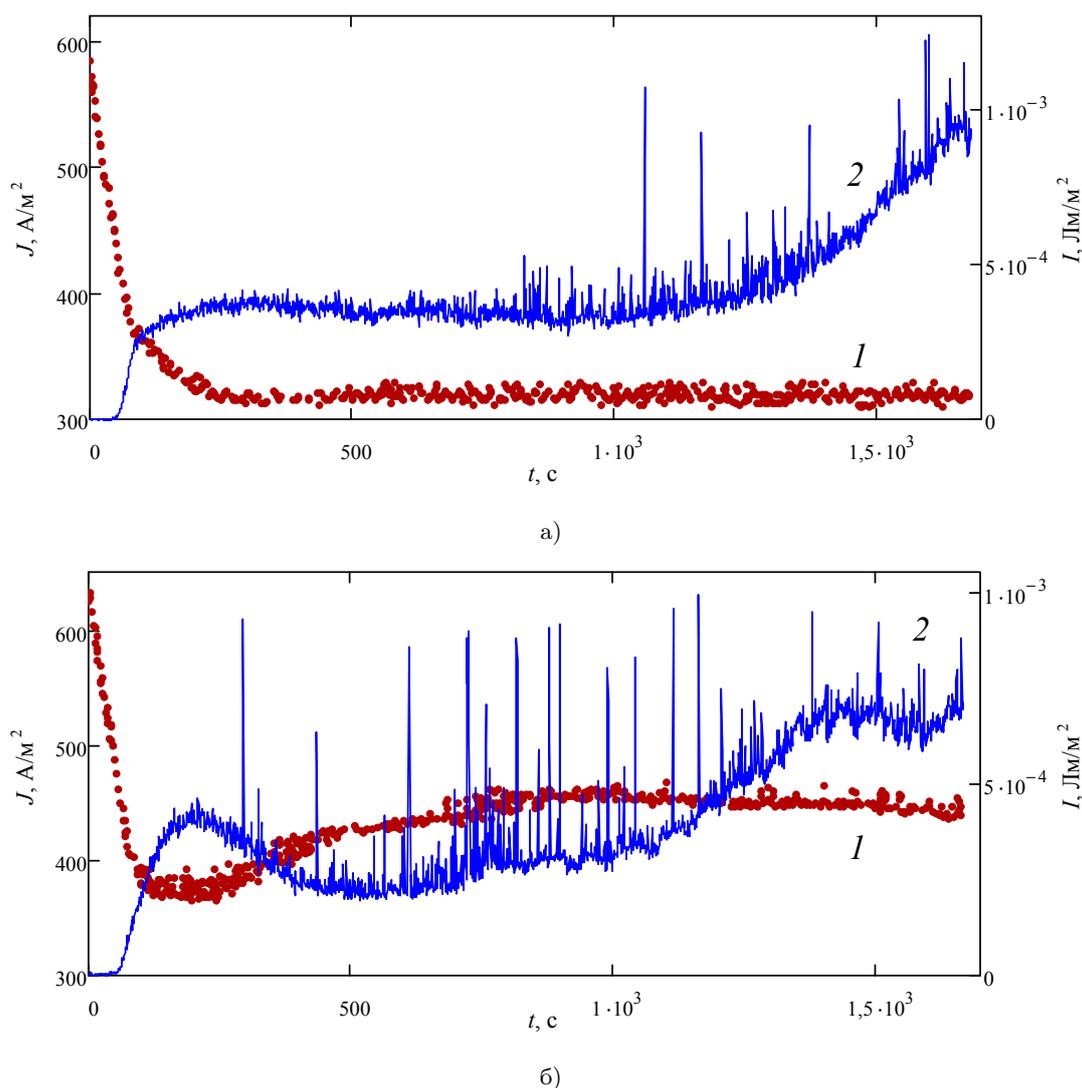
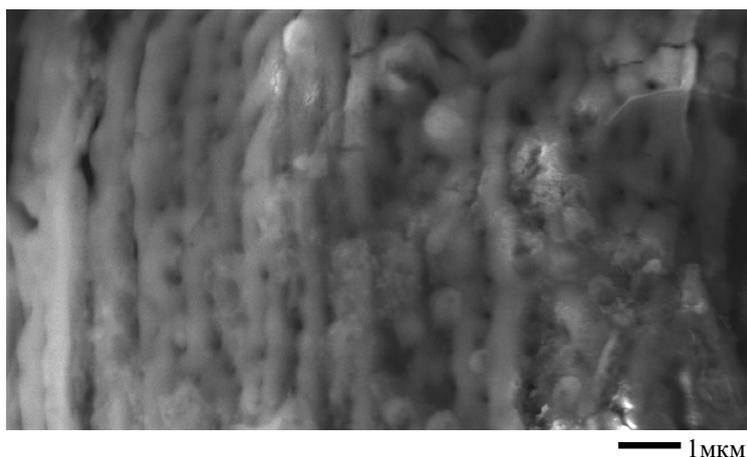


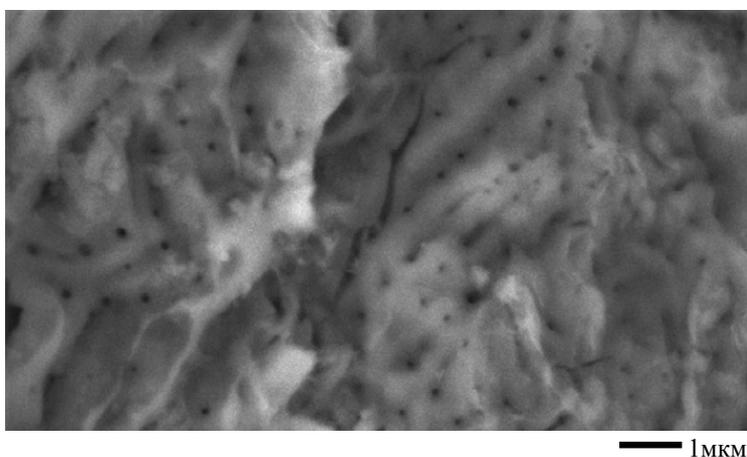
Рис. 3. Кинетические зависимости плотности тока (1) и светимости ЭЛ (2) при высоковольтном анодировании Та в ДВ при: $T = 298$ К (а); $\Delta T = 18 \pm 1$ К (б)

свойствами, можно говорить об отражении этого процесса для конкретного Ме в кинетической зависимости $J(t)$. Так, наблюдаемый за весь период анодирования Al спад тока в электролитической системе с ним указывает на постепенный рост прочной пленки оксида металла, что со временем затрудняет токоперенос. В случае установления стационарной плотности тока для системы с Та-анодом можно предположить, что на его поверхности создаются равновесные условия возникновения и локального разрушения оксидной пленки. На последнее обстоятельство косвенно указывают отдельные всплески ЭЛ (рис. 3а). При изгибе или трении о бумагу анодированной части Та-провода оксид легко отде-

ляется от нее, оставляя видимые следы, чего нельзя сказать об Al-аноде. Его оксидная пленка не поддается разрушению при таких воздействиях. О предполагаемых процессах на поверхности Ме говорят их электронномикроскопические изображения. На Al-аноде видна хорошо известная из литературы структура несквозных пор различной глубины и диаметром до 130 нм, упорядоченно расположенных в системе борозд оксида, которые линейно распределены относительно друг друга (рис. 4а), что типично для порообразования при анодировании данного металла в водных растворах слабых кислот (например, щавелевой или лимонной [7, 9]). Анод из Та покрывается рыхлая пленка оксида с характерными



а)



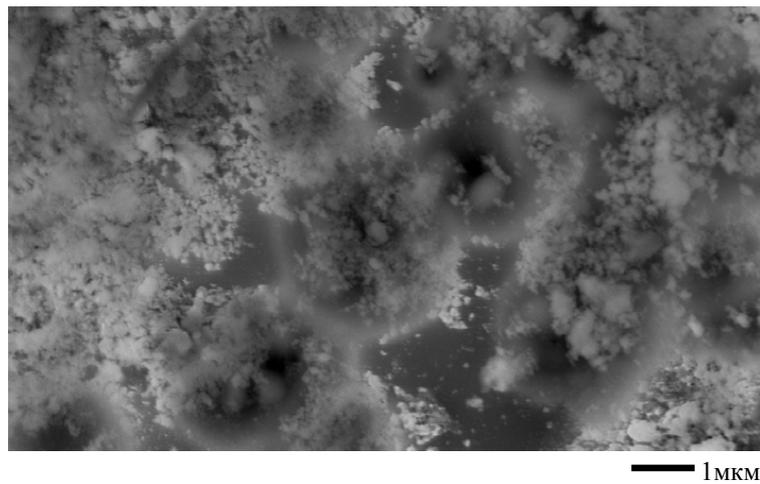
б)

Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения Al после высоковольтного анодирования в ДВ при: а) $T = 298$ К; б) $\Delta T = 11 \pm 1$ К

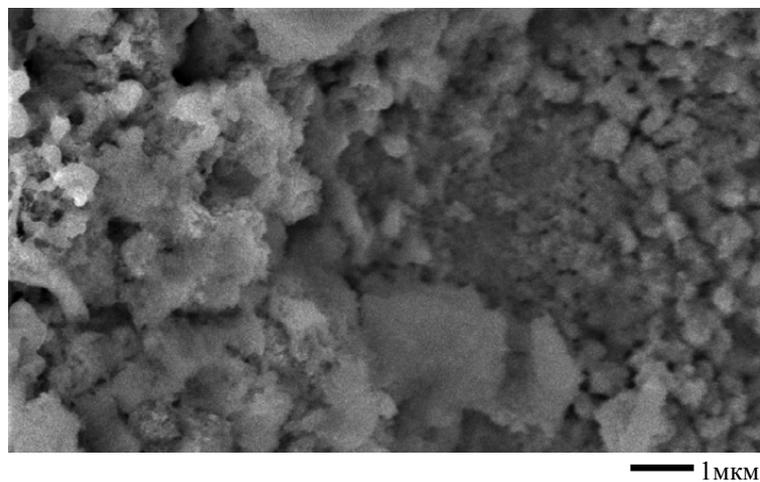
кратерами, диаметр которых может превышать 1 мкм (рис. 5а).

Более разупорядоченной оказывается структура оксидов металлов, анодированных в отсутствие термостабилизации. Оксидная пленка на Al-аноде содержит трещины и разломы с фрагментами агломератов из нанопор (рис. 4б), а пленка оксида на Ta-аноде вообще лишена какого-либо порядка — вся она имеет губчатую структуру (рис. 5б). При названном условии обнаруживают различия зависимости $J(t)$ и $I(t)$. Для Al-анода наиболее существенные наблюдаются у последнего параметра, а для анода из Ta — для обоих. Так, при анодировании Al в его ЭЛ появляется второй максимум со светимостью $1,7 \cdot 10^{-4}$ Лм/м² на 856-й секунде, а появление первого в $1,5 \cdot 10^{-4}$ Лм/м² происходит на 42 с раньше по сравнению с термостабилизирован-

ными условиями (рис. 2) и на 100 с раньше зажигается ЭЛ (см. табл. 1). При анодировании Ta за первые 200 с в зависимости $J(t)$ наблюдается уменьшение плотности тока до 370 А/м², а затем к 730 с — возрастание до 450 А/м², выходящего на стационарный уровень, который на 130 А/м² превышает таковой в условиях термостабилизации (рис. 3б). При этом в пределах погрешности измерений параметры ЭЛ — t_z и I_z существенно не различаются (см. табл. 1). Наконец, в зависимости $I(t)$, как и для Al-анода, наблюдается два максимума. В пределах 20 % погрешности первый (со светимостью $4,7 \cdot 10^{-4}$ Лм/м²) соответствует 208-й секунде, а второй достигает максимальной величины $7,3 \cdot 10^{-4}$ Лм/м² к 1410-й секунде. При этом вспыхивающий характер ЭЛ начинается уже с 300-й секунды анодирования, а длительность вспышек мо-



а)



б)

Рис. 5. Электронно-микроскопические изображения Та после высоковольтного анодирования в ДВ при: а) $T = 298 \text{ K}$; б) $\Delta T = 18 \pm 1 \text{ K}$

жет достигать 6 с амплитудой $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ Лм/м}^2$. Важно отметить, что в пределах погрешности исходная величина J_0 в момент приложенного напряжения для обеих электродных систем оказывается одинаковой и в среднем составляет 595 А/м^2 (см. табл. 1), что говорит об идентичности начальных условий электролиза ДВ и анодирования Ме независимо от их природы (при начальной температуре $300 \pm 0,5 \text{ K}$). На положительный тепловой эффект протекания тока в ДВ как высокоомном электролите и электрохимические реакции указывают данные изменения ее температуры и электропроводности, что подтверждает результаты [12], полученные в идентичных условиях. При этом анодирование Al приводит к большему изменению электропровод-

ности ДВ в отличие от изменения ее температуры, а при анодировании Та наблюдается противоположная ситуация. Характерно, что при описанных условиях для системы с последним металлом электрохимические процессы в ДВ уменьшили ее $\Delta\sigma$ в 0,06 раза по сравнению с условиями термостабилизации.

Поскольку в исследуемой системе электродов находится только ДВ, очевидным участником процессов свечения Ме-анодов могут быть анионы гидроксила. Согласно рассмотренному в [7] механизму их разрядки, для эффективной генерации ЭЛ на аноде должна сформироваться пленка оксида оптимальной для этого толщины, на что требуется определенное время. Судя по данным таблицы, при высоковольтном анодировании Al и Та в

Таблица 1. Результаты оценок электрофизических параметров ДВ и характеристик ЭЛ на анодах из Al и Ta

Me	$J_0, \text{A}/\text{m}^2$	$J_z, \text{A}/\text{m}^2$	t_z, c	$I_z, 10^{-6} \text{Jm}/\text{m}^2$	$\Delta T, \text{K}$	$^*\Delta\sigma, 10^{-4} \text{Cm}/\text{m}$
Al	565 ± 34	523 ± 55	31 ± 1	4 ± 1	11 ± 1	71 ± 7
Ta	625 ± 28	456 ± 13	58 ± 1	22 ± 6	18 ± 1	9 ± 1
$T = 298 \pm 0,5 \text{ K}$						
Al	463 ± 21	361 ± 33	134 ± 2	5 ± 2	—	42 ± 4
Ta	584 ± 10	429 ± 4	54 ± 1	14 ± 5		141 ± 13

* Измерение проводилось при 298 К спустя 45 суток после анодирования

ДВ этому времени соответствует t_z , которое при различных термических условиях обнаруживает существенные различия для первого металла и их отсутствие — для второго.

Одной из проблем исследования ЭЛ при анодировании Me является спектроскопия ее излучения весьма небольшой интенсивности. Это ограничивает круг использования спектрально-оптической аппаратуры, а динамичность ЭЛ во времени и зависимость от очень многих факторов (в частности, от T) требует привлечения специальных приемов и технологий, связанных с выбором временных участков процесса анодирования [7, 9, 18], на которых ЭЛ стационарна и, как нередко бывает в таких случаях, оказывающейся менее интенсивной, чем в периоды нестационарного свечения (см., например, рис. 2 и рис. 3б). Причем, регистрируемые в настоящее время спектры ЭЛ несут информацию о процессах анодирования в смесях электролитов [7, 9, 18, 19], то есть с участием большого комплекса молекул различной природы как растворителя, так и растворенного вещества. В такой ситуации излучение с участием молекул одной группы способно накладываться на излучение с участием другой, нередко маскируя друг друга, что затрудняет расшифровку спектров и соответственно правильную интерпретацию результатов. Выявление условий генерации ЭЛ при высоковольтном анодировании Me в чистой ДВ снимает ряд ограничений, прежде всего, относящихся к интерпретации результатов исследований люминесценции, требующих учета каких-либо добавок электролитов в воде. Кроме того, обнаружение протяженных временных участков на кинетических зависимостях $I(t)$ при термостабилизированных условиях анодирования Al и Ta, позволяет увеличить время спектроскопии ЭЛ, проводя ее с большим разрешением. Использованию появившейся возможности бо-

лее точного спектрально-оптического анализа ЭЛ при анодировании Me не только в ДВ, а также в более высокой степени ее очистки и неводных электролитов, планируется посвятить отдельные публикации.

Заключение и выводы

В обобщение результатов настоящей работы сделаем из них основные выводы:

1. На примере высоковольтного (1,2 кВ) анодирования Al и Ta в чистой ДВ как высокоомном электролите впервые зарегистрирована ЭЛ и исследована кинетика изменения ее светимости в условиях термостабилизации и в результате теплового (джоулевого) эффекта протекания тока. При этом установлено существенное влияние последнего условия на кинетические и другие характеристики ЭЛ для обоих металлов.

2. Выявлено влияние процессов анодирования и электролиза ДВ на ее электропроводность. При термостабилизированных условиях их протекания изменение этого параметра относительно исходной величины составляет $42 \cdot 10^{-4} \text{ Cm}/\text{m}$ для Al-анода и $141 \cdot 10^{-4} \text{ Cm}/\text{m}$ для анода из Ta, а в отсутствие термостабилизации изменение величины этого параметра для перечисленных Me составляют $71 \cdot 10^{-4} \text{ Cm}/\text{m}$ и $9 \cdot 10^{-4} \text{ Cm}/\text{m}$ соответственно.

3. Вызванное протеканием тока через ДВ изменение ΔT также оказывает влияние на продукты анодирования Me по сравнению с условиями термостабилизации. В отличие от сформированных при последних условиях, оксидные пленки обладают более рыхлой, неупорядоченной структурой, что также отражается на их механической прочности.

В итоге отметим, что в ряду Me-анодов, таких как Pt, Pd, Ir, Rh, Sn, Cu, Ag, Cr и Mo при напряжении даже 2 кВ в ДВ не было обнаружено какого-либо светового излучения, несмотря на формирование у трех последних

металлов заметной пленки продуктов анодирования.

Литература

1. *Аверьянов Е.Е.* Справочник по анодированию. М.: Машиностроение, 1988. 224 с.
2. *Hickmott T.W.* Voltage-controlled negative resistance and electroluminescent spectra of Al-Al₂O₃-Au diodes // *J. Appl. Phys.* 2009. Vol. 106. P. 103719 (1–9). DOI: 10.1063/1.3262619
3. *Lisenkov A.D., Poznyak S.K., Zheludkevich M.L., Ferreira G.S.* Aluminum anodization in deionized water as electrolyte // *J. Electrochem. Soc.* 2016. Vol. 163. P. 364–368. DOI: 10.1149/2.0881607jes
4. *Длугунович В.А., Жумарь А.Ю., Курилкина С.Н., Мухуров Н.И.* Преобразование поляризации света с использованием нанопористых пленок оксида алюминия // *ЖПС.* 2015. Т. 82. № 5. С. 766–772.
5. *Jian-Jun Gu, Shu-Min Yang, Meng-Yao Dong, Yun-Kai Qi.* Study on magnetic and optical properties of porous anodic alumina/Co composite films with rainbow structural color prepared by an annular carbon electrode // *J. Alloys Compd.* 2017. Vol. 728. P. 93–99. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.08.272
6. *Гардин Ю.Е., Кулабухов В.М., Легостаев В.А.* Некоторые закономерности гальванолюминесценции в системах металл (полупроводник)-окисел-электролит // *Электронная техника.* 1972. Сер. 5. Вып. 2(27). С. 83–87.
7. *Stojadinović S., Vasilic R., Kasalica B. and ect.* Electrodeposition and surface finishing: fundamentals and applications. Ser. Modern Aspects of Electrochemistry. Vol. 57. N.Y. Springer-Verlag, 2014. P. 241–302. DOI: 10.1007/978-1-4939-0289-7_5
8. *Ягов В.В.* Катодная электрохемиллюминесценция олова (II) // *ДАН.* 2010. Т. 432. № 1. С. 63–66.
9. *Гриднев А.Е., Чернышев В.В.* Спектры электролюминесценции анодного оксида алюминия в различных электролитах // *Вестник ВГУ. Сер.: физика, математика.* 2005. № 2. С. 8–10.
10. *Zecović L.J.D., Urošević V.V.* New investigations of the interference effect in electroluminescence of anodic films on aluminum // *Thin Solid Films.* 1981. Vol. 86. P. 347–350. DOI: 10.1016/0040-6090(81)90342-4
11. *Voon C.H., Derman M.N., Hashim U. and ect.* Synthesis of nanoporous zinc oxide by anodizing of zinc in distilled water // *Appl. Mech. Mater.* 2015. Vol. 754–755. P. 1126–1130. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.754-755.1126
12. *Voon C.H., Lim B.Y., Hashim U. and ect.* Effect of temperature of distilled water on the morphology of nanoporous zinc oxide synthesis by anodizing // *Appl. Mech. Mater.* 2015. Vol. 754–755. P. 1131–1135. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.754-755.1131
13. *Овеченко Д.С., Бойченко А.П.* Электрохемиллюминесценция металлических анодов в дистиллированной воде // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сб. научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 407–408.
14. *Овеченко Д.С., Бойченко А.П.* Свечение металлов при их анодировании в дистиллированной воде // *Письма в ЖТФ.* 2019. Т. 45. Вып. 10. С. 31–33.
15. *Yang Y., Young I. Cho., Fridman A.* Temporally resolved imaging on quenching and re-ignition of nanosecond underwater discharge // *AIP Adv.* 2012. Vol. 2. P. 042153-1–042153-6. DOI: 10.1063/1.4769080
16. *Boychenko A.P., Prokopenko A.V., Yakovenko N.A.* Electroluminescence of Ion-Exchange Polymeric Membranes in the Swollen State // *Russian J. Phys. Chem. A.* 2007. Vol. 81. No. 11. P. 1877–1879. DOI: 10.1134/S0036024407110283
17. *Savinovskikh E.G., Boychenko A.P., Yakovenko N.A.* Low-Intensity Electroluminescence in Polymer-Based Ionic Conductor // *Tech. Phys. Lett.* 2010. Vol. 36. Iss. 10. P. 964–965. DOI: 10.1134/S1063785010100263
18. *Ягов В.В., Коротков А.С., Коварский И.И.* Характеристическая катодная электролюминесценция неорганических катионов на алюминиевом и магниевом электродах // *Химия и химическая технология.* 2000. Т. 43. Вып. 4. С. 77–81.
19. *Ягов В.В.* Влияние галогенидов на электрохемиллюминесценцию тяжелых металлов на алюминиевом электроде // *ЖАХ.* 2007. Т. 62. № 1. С. 85–88.

References

1. *Aver'yanov, E.E.* *Spravochnik po anodirovaniyu* [Anodizing Guide]. Moscow, Mashinostroenie, 1988, 224 p. (In Russian)
2. *Hickmott, T.W.* Voltage-controlled negative resistance and electroluminescent spectra of Al-Al₂O₃-Au diodes. *J. Appl. Phys.*, 2009, vol. 106, pp. 103719 (1–9). DOI: 10.1063/1.3262619
3. *Lisenkov, A.D., Poznyak, S.K., Zheludkevich, M.L., Ferreira, G.S.* Aluminum anodization in deionized water as electrolyte. *J. Electrochem. Soc.*, 2016, vol. 163, pp. C364–C368. DOI: 10.1149/2.0881607jes
4. *Dlugunovich, V.A., ZHumar', A.Yu., Kurilkina, S.N., Muhurov, N.I.* Preobrazovanie polarizacii sveta s ispol'zovaniem nanoporistykh plenok oksida alyuminiya [Light Polarization

- Conversion Using Nanoporous Aluminum Oxide Films]. *Zhurnal prikladnoy spektroskopii* [J. of Applied Spectroscopy], 2015, vol. 82, no. 5, pp. 766–772. (In Russian)
5. Jian-Jun, Gu, Shu-Min, Yang, Meng-Yao, Dong, Yun-Kai, Qi. Study on magnetic and optical properties of porous anodic alumina/Co composite films with rainbow structural color prepared by an annular carbon electrode. *J. Alloys Comp.*, 2017, vol. 728, pp. 93–99. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.08.272
 6. Gardin, Yu.E., Kulabukhov, V.M., Legostaev, V.A. Nekotorye zakonomernosti gal'vanoilyuminescencii v sistemah metall(poluprovodnik)-okisel-ehlektrolit [Some regularities of galvanoluminescence in metal (semiconductor)-oxide-electrolyte systems]. *Elektronnaya tekhnika* [Electronic engineering], 1972, ser. 5, iss. 2(27), pp. 83–87. (In Russian)
 7. Stojadinović, S., Vasilić, R., Kasalica, B. et al. *Electrodeposition and Surface Finishing. Ser. Modern Aspects of Electrochemistry, vol. 57*. N.Y. Springer-Verlag, 2014, pp. 241–302. DOI: 10.1007/978-1-4939-0289-7_5
 8. Yagov, V.V. Katodnaya ehlektrohemyuminescenciya olova (II) [Cathodic electrochemiluminescence of tin (II)]. *Doklady RAN* [Proc. of the Russian Academy of Science], 2010, vol. 432, no. 1, pp. 63–66. (In Russian)
 9. Gridnev, A.E., Chernyshev, V.V. Spektiry ehlektrolyuminescencii anodnogo oksida alyuminiya v razlichnykh ehlektrolitah [Electroluminescence spectra of anodic aluminum oxide in various electrolytes]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, Seriya: fizika, matematika*. [Proc. of Voronezh State University, Ser.: physics, mathematics], 2005, no. 2, pp. 8–10. (In Russian)
 10. Zecović, Lj.D., Urošević, V.V. New investigations of the interference effect in electroluminescence of anodic films on aluminum. *Thin Solid Films*, 1981, vol. 86, pp. 347–350. DOI: 10.1016/0040-6090(81)90342-4
 11. Voon, C.H., Derman, M.N., Hashim, U. et al. Synthesis of nanoporous zinc oxide by anodizing of zinc in distilled water. *Appl. Mech. Mater.*, 2015, vol. 754–755, pp. 1126–1130. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.754-755.1126
 12. Voon, C.H., Lim, B.Y., Hashim, U. et al. Effect of temperature of distilled water on the morphology of nanoporous zinc oxide synthesis by anodizing. *Appl. Mech. Mater.*, 2015, vol. 754–755, pp. 1131–1135. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.754-755.1131
 13. Ovechenko, D.S., Boychenko, A.P. Elektrohemilyuminescenciya metallicheskih anodov v distillirovannoj vode [Electrochemiluminescence of metallic anodes in distilled water]. In: *Mezhdunarodnaya konferenciya po fotonike i informacionnoj optike: Sb. nauchnykh trudov. NIYAU MIFI* [Proc. of the VIII International Conference on Photonics and Information Optics], Moscow, 2019, pp. 407–408. (In Russian)
 14. Ovechenko, D.S., Boychenko, A.P. Svechenie metallov pri ih anodirovanii v distillirovannoj vode [Glow metals when they are anodized in distilled water]. *Pis'ma v ZHTF* [Tech. Phys. Let.], 2019, vol. 45, iss. 10, pp. 31–33. (In Russian)
 15. Yang, Y., Young, I.Cho., Fridman, A. Temporally resolved imaging on quenching and re-ignition of nanosecond underwater discharge. *AIP Adv.*, 2012, vol. 2, pp. 042153. DOI: 10.1063/1.4769080
 16. Boychenko, A.P., Prokopenko, A.V., Yakovenko, N.A. Electroluminescence of ion-exchange polymeric membranes in the swollen state. *Russian J. Phys. Chem. A.*, 2007, vol. 81, no. 11, pp. 1877–1879. DOI: 10.1134/S0036024407110283
 17. Savinovskikh, E.G., Boychenko, A.P., Yakovenko, N.A. Low-Intensity electroluminescence in polymer-based ionic conductor. *Tech. Phys. Let.*, 2010, vol. 36, no. 10, pp. 964–965. DOI: 10.1134/S1063785010100263
 18. Yagov, V.V., Korotkov, A.S., Kovarskij, I.I. Harakteristicheskaya katodnaya ehlektrolyuminescenciya neorganicheskikh kationov na alyuminievom i magnievom ehlektrodah [Characteristic cathodic electroluminescence of inorganic cations on aluminum and magnesium electrodes]. *Himiya i himicheskaya tekhnologiya* [Chemistry and Chemical Technology], 2000, vol. 43, iss. 4, pp. 77–81. (In Russian)
 19. Yagov, V.V. Vliyanie galogenidov na ehlektrohemyuminescenciya tyazhelykh metallov na alyuminievom ehlektrode [The influence of halides on the electrochemiluminescence of heavy metals on an aluminum electrode]. *Zhurnal analiticheskoy khimii* [J. of Analytical Chemistry], 2007, vol. 62, no. 1, pp. 85–88. (In Russian)