

ВЛИЯНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ КАТОДА ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Al-6%Mg НА ТОК ТЛЕЮЩЕГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Р.Х. Хисамов^{1*}, К.С. Назаров¹, И.М. Сафаров¹, И.И. Мусабилов¹,

Ю.М. Юмагузин^{1,2}, Р.Р. Мулюков^{1,2}

¹ Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина 39, Уфа, 450001, Россия

² Башкирский государственный университет, ул. Заки Валиди 32, Уфа, 450076, Россия

*e-mail: r.khisamov@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния деформационного наноструктурирования катода из алюминиевого сплава Al-6%Mg на ток тлеющего газового разряда в газоразрядном приборе. Исследована микроструктура, измерена работа выхода электрона наноструктурного сплава. Показано, что снижение работы выхода электрона в результате наноструктурирования сплава приводит к повышению коэффициента потенциальной ионно-электронной эмиссии и тока тлеющего газового разряда.

Ключевые слова: наноструктура, холодный катод, тлеющий газовый разряд, ионно-электронная эмиссия, работа выхода электрона.

1. Введение

Наноструктурные металлы и сплавы – поликристаллические материалы с малым, около 100 нм, средним размером зерен. Известно, что наноструктурирование материалов приводит к изменению магнитных, тепловых, механических, электрических свойств по сравнению с обычными крупнозернистыми материалами того же химического состава [1-4].

Работа выхода электрона является определяющей характеристикой эмиссионных катодов. От ее величины зависят термо-, авто-, фото- и ионно-электронная эмиссия. Снижение работы выхода электрона в катоде облегчает эмиссию электронов с него. Ранее было обнаружено, что деформационное наноструктурирование металлов приводит к снижению их работы выхода электрона [5-11]. Это позволило предположить перспективность использования наноструктурных металлов в качестве материала для катодов в электронных и ионных приборах.

Одним из потенциальных применений наноструктурных металлов может являться использование их в качестве материалов для холодных катодов газоразрядных приборов с тлеющим разрядом. Холодный катод, работающий по принципу ионно-электронной эмиссии, используется в таких устройствах и приборах, как ионные источники, газовые лазеры и т.п. Известно, что снижение работы выхода электрона катода в газоразрядном приборе снижает напряжение зажигания и горения газового разряда при фиксированном токе разряда или, соответственно, повышает ток разряда при фиксированном напряжении разряда. Следовательно, снижение работы выхода электрона в наноструктурном металле позволяет ожидать повышения тока тлеющего газового

разряда в газоразрядном приборе при использовании его в качестве материала холодного катода.

В связи с этим, целью данной работы являлось исследование влияния наноструктурирования катода из алюминиевого сплава Al-6%Mg на ток тлеющего газового разряда.

2. Материал и методы исследования

Материалом для исследований выбран широко используемый в качестве материала холодного катода алюминиево-магнийсый сплав Al-6%Mg с химическим составом Al-91,9%, Mg-6,3%, Mn-0,6% (примеси Cu<0,1%, Zn<0,2%, Fe<0,4, Si<0,4%).

Формирование наноструктуры в образцах сплава осуществляли методом деформационного наноструктурирования кручением под высоким давлением. Кручение образцов проводили под давлением 6 ГПа на 5 оборотов наковален при комнатной температуре. Для сравнительных измерений были получены образцы сплава с большим размером зерен. Как показали последующие измерения, использование катодов с размером зерен 2 мкм и более приводит к характеристикам газового разряда, типичным для обычного крупнозернистого катода. Поэтому образцы с размером зерен 2 мкм обозначили как крупнозернистые образцы. Для снижения систематической погрешности измерений крупнозернистые образцы получили отжигом наноструктурных образцов при температуре 300°C в течение получаса. Образцы для исследований были в виде дисков диаметром 10 мм и толщиной 0,2-0,3 мм. Эмитирующую поверхность образцов предварительно полировали. Аттестацию микроструктуры образцов проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа Jeol JEM-2000EX.

Для измерения вольтамперных характеристик тлеющего разряда изготовили газоразрядную установку (Рис.1).

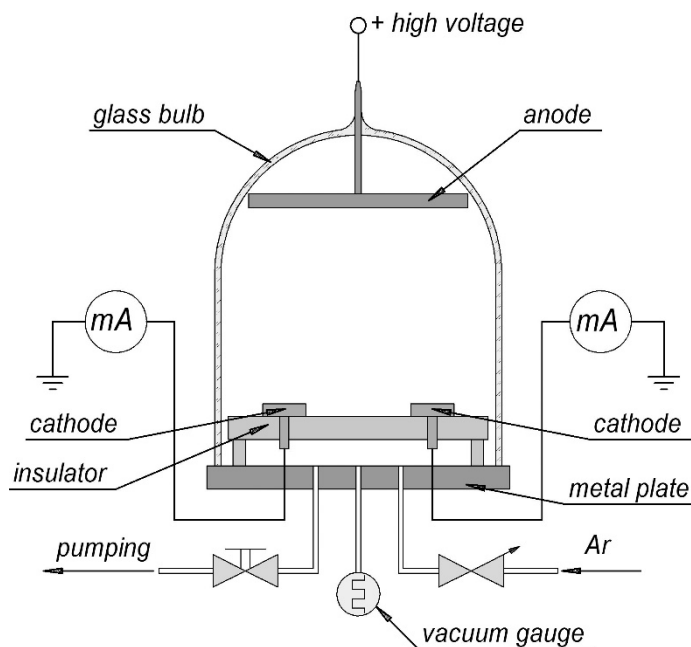


Рис. 1. Схема газоразрядной установки для измерения вольтамперных характеристик тлеющего газового разряда с образцов катодов.

Установка представляет собой стеклянную колбу, установленную на металлический столик. В верхней части колбы впаян электрод, выполняющий роль анода. На металлический столик установлен изолятор (фторопласт). На концах изолятора расположены два Т-образных металлических держателя, к которым

прикреплялись катоды из исследуемых наноструктурных и крупнозернистых образцов. Использование одновременно двух катодов обеспечивает одинаковые условия проведения сравнительного эксперимента для различных образцов. Снизу к этим держателям прикреплены электрические провода, которые подсоединятся к измерителю тока (миллиамперметр) для измерения тока газового разряда. На металлическом столике, на котором установлена стеклянная колба, имеются отверстия для откачки воздуха, напуска рабочего газа и контроля давления газа. Расстояние между анодом и катодами составляет около 15 см. Расстояние между двумя держателями составляет 8 см. Газоразрядную установку размещали в вакуумной камере. После снижения давления до 10^{-6} Торр в газоразрядную установку напускали аргон давлением 0,1 Торр для достижения условий тлеющего газового разряда. Контроль давления в колбе осуществляли датчиком давления. Зависимость тока тлеющего газового разряда от приложенного напряжения между анодом и исследуемыми образцами (катадами) измеряли через каждые 200 В.

Работу выхода электрона образцов определяли по результатам измерений контактной разности потенциалов с помощью электронного пучка (метод Андерсона) [12]. Установка для измерений [13] представляет собой трехэлектродную электронно-оптическую систему, состоящую из термоэлектронного катода, анода и образца, выполняющую роль коллектора (Рис.2). В центральной части анода имеется сеточное отверстие, предназначенное для выпуска коллимированного пучка электронов в область задержки перед образцом. Цель применения анода в данном методе заключается в устранении влияния пространственного заряда.

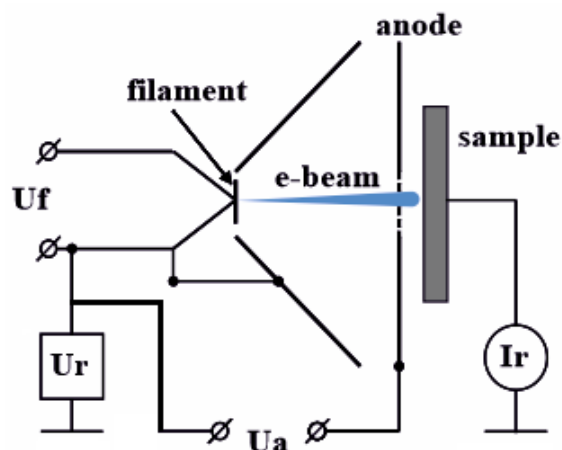


Рис. 2. Блок-схема установки для определения работы выхода электрона образцов методом Андерсона.

Электроны, эмитирующие из термокатода под действием электрического поля между термокатодом и анодом, двигаются по направлению к сетчатому аноду, и, проходя сквозь отверстие в нем, попадают на поверхность образца, который находится за этим отверстием вблизи анода. Подавая положительный потенциал на систему термокатод-анод относительно образца, строят зависимость тока образца от потенциала на нем (кривая задержки). Затем образец меняется и снова при тех же условиях измеряется кривая задержки. Сравнивая результаты измерений первого и второго образца, по относительному смещению их кривых задержек по оси потенциала при токе, равном половине от максимального значения, определяется разница значений работы выхода электрона между первым и вторым образцом [14].

Термокатод (нить накала) изготовили из вольфрамовой проволоки толщиной 0,15 мм. Установку с размещенным в ней одним образцом помещали в вакуумную камеру.

Для эмиссии электронов с термокатода на него подавался ток накала около 3,3 А, напряжение накала – 0,93В. Приложенный потенциал между термокатодом и анодом составлял 12 В. Задерживающий потенциал (в диапазоне от -2,5 до +2,5 В) подавали на катодный узел через ЦАП таким образом, чтобы потенциал между термокатодом и анодом оставался постоянным. Измеряемый ток задержки на образце усиливался высокочувствительным усилителем и с помощью АЦП подавался на персональный компьютер. Вакуум во время измерений был не хуже чем 10^{-6} Торр. В эксперименте определили разницу работы выхода электрона наноструктурного и крупнозернистого образца сплава Al-6%Mg. Вначале измеряли наноструктурный образец, затем этот образец отжигали для получения в нем крупнозернистой структуры и снова измеряли при тех же условиях.

3. Результаты исследований и их обсуждения

Регистрируемый ток тлеющего разряда возникал при напряжении U_A около 400 В. С увеличением напряжения ток разряда возрастал, а при напряжении выше 2000 В в колбе возникал дуговой разряд. Вольтамперные характеристики тлеющего разряда измеряли при увеличении напряжения вплоть до возникновения дугового разряда (Рис.3).

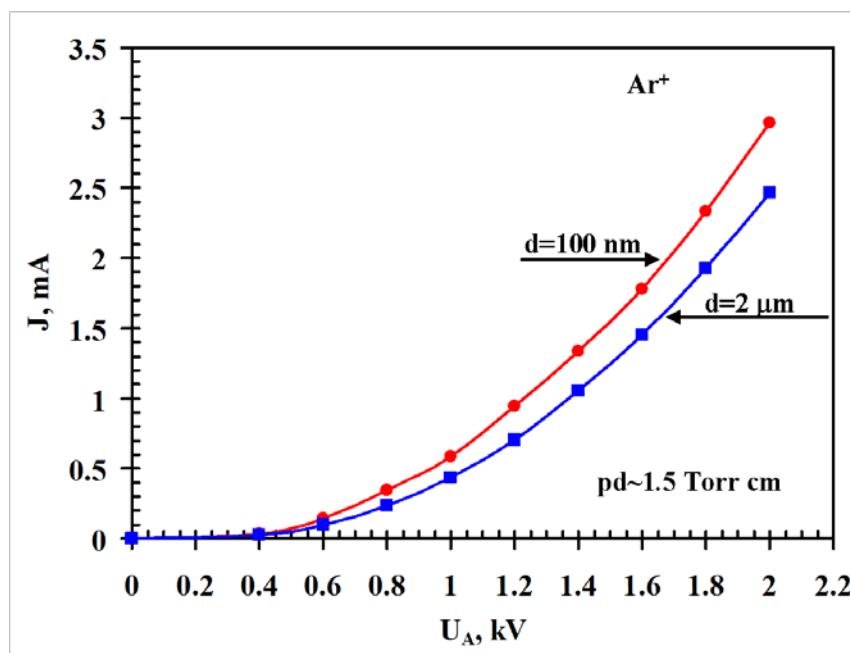


Рис. 3. Вольтамперные характеристики тлеющего газоразряда для катодов из наноструктурных образцов со средним размером зерен $d=100$ нм и образцов со средним размером зерен $d=2$ мкм сплава Al-6%Mg.

Измерения вольтамперных характеристик тлеющего газоразряда показали, что значения тока разряда между анодом и катодами из наноструктурных образцов при одинаковых напряжениях U_A имеют повышенные значения по сравнению с токами в случае катодов из крупнозернистых образцов сплава. Например, ток разряда при напряжении 1000 В между анодом и катодами из наноструктурных образцов в среднем равен 0,58 мА, ток газоразряда между анодом и катодами из крупнозернистых образцов в среднем равен 0,43 мА. Превышение тока при напряжении 1000 В в случае катодов из наноструктурного сплава относительно катодов из крупнозернистого сплава составляет 34%. В среднем на всем диапазоне различных фиксированных значений напряжения превышение тока разряда составляло 20-35%.

Превышение тока разряда в случае катода из наноструктурного образца относительно тока разряда с катодом из крупнозернистого образца можно объяснить уменьшением работы выхода электрона при наноструктурировании материала катода. Под действием электрического поля между анодом и катодом ионы аргона движутся в направлении катодов, на поверхности которых происходит процесс ионно-электронной эмиссии. При одинаковых условиях проведения эксперимента, в частности напряжении и давлении газа, отличие токов разряда обусловлено отличием их коэффициентов ионно-электронной эмиссии γ . Известно, что в тлеющем газовом разряде процесс ионно-электронной эмиссии на поверхности катода происходит по механизму потенциальной эмиссии. При подлете положительного иона к поверхности металла, начиная с некоторого малого расстояния, электронные оболочки иона и атома металла начинают взаимодействовать друг с другом. Следствием этого является переход валентного электрона из металла на вакантный энергетический уровень иона, происходит нейтрализация иона. При этом, выделяемая энергия перехода передается другому валентному электрону металла, который в виде оже-электрона покидает металл, при условии что энергия ионизации газа более чем в два раза превышает работу выхода электрона металла, т.е. $I > 2\phi$, где I - энергия ионизации, ϕ - работа выхода электрона металла (Рис.4) [15,16]. Коэффициент γ зависит от энергии ионизации подлетающего иона и работы выхода электрона металла и хорошо описывается эмпирическим соотношением [17]:

$$\gamma = 0.03 \times (0.8I - 2\phi) \quad (1)$$

Как видно из соотношения (1), чем ниже работа выхода электрона металла, тем выше коэффициент γ .

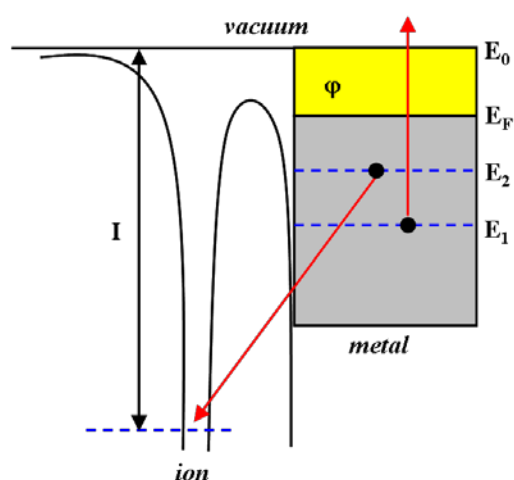


Рис. 4. Схематическая диаграмма энергетических уровней, иллюстрирующая процесс потенциальной ионно-электронной эмиссии по механизму оже-нейтрализации, происходящий в результате взаимодействия иона с металлом [15,16].

На Рис. 5 представлены результаты измерений кривых задержек наноструктурных и крупнозернистых образцов сплава Al-6%Mg. Нулевое значение потенциала на графике выбрано условно. Форма и наклон кривых для образцов с различным размером зерен идентичны. Это означает, что условия проведения измерения для образцов были одинаковыми. Снижение тока после достижения максимального значения может быть вызвано изменением условий поглощения и отражения электронов от образцов или изменением условий измерения при насыщении тока [18]. Тем не менее, по кривым, которые включают в себя области возникновения тока, его роста и насыщения (имеется в виду максимальный ток) можно определить разницу работы выхода электрона

образцов. Смещение кривых по оси потенциала при токе, равном половине от максимального значения для наноструктурных образцов относительно кривых для крупнозернистых образцов сплава в среднем составляет 0,4 В. Следовательно, разница между работой выхода электрона наноструктурного и крупнозернистого образца составляет 0,4 эВ.

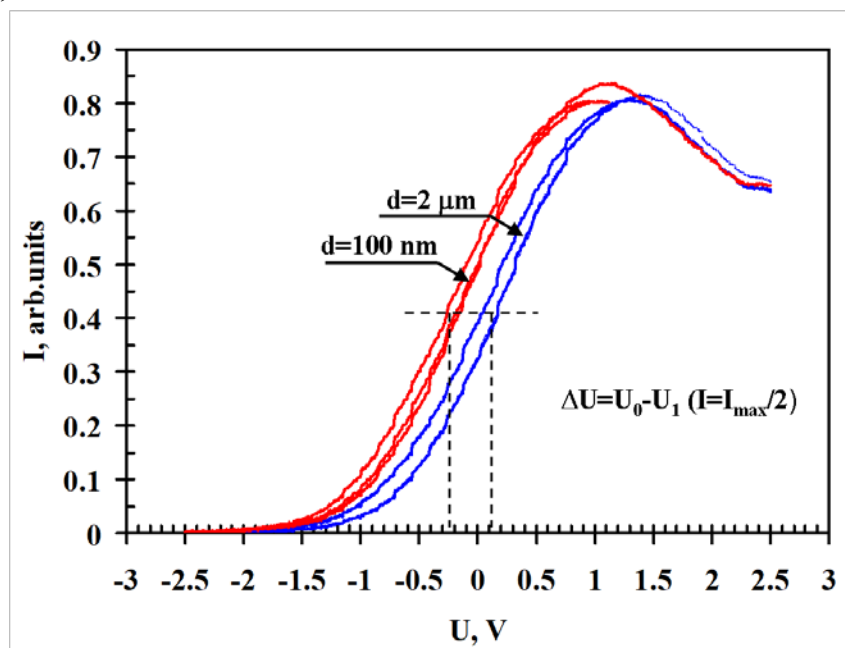


Рис. 5. Кривые задержки для наноструктурных образцов со средним размером зерен $d=100$ нм и образцов со средним размером зерен $d=2$ мкм сплава Al-6%Mg. Кривые задержки измерены после воздействия тлеющего разряда ионами аргона поверхности образцов при $U=1$ кВ и $J=0,4$ мА.

Как следует из соотношения (1), отношение коэффициента потенциальной ионно-электронной эмиссии наноструктурного образца к коэффициенту крупнозернистого образца представляется в виде:

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_0} = 1 + \frac{\varphi_0 - \varphi_1}{0.39I - \varphi_0}, \quad (2)$$

где индекс “0” относится к характеристикам крупнозернистого, а “1” – наноструктурного материала. Потенциал ионизации аргона равен $I=15,76$ эВ. Работу выхода электрона крупнозернистого образца алюминиевого сплава примем равной работе выхода электрона чистого алюминия $\varphi_0=4,25$ эВ [19,20], $\varphi_0-\varphi_1=0.4$ эВ. Тогда из (2) следует, что коэффициент γ_1 наноструктурного образца превышает γ_0 крупнозернистого образца на 21%. Это коррелирует с превышением тока разряда J между анодом и катодом из наноструктурного сплава, т.к. $J \propto \gamma$ [21,22].

Повышение коэффициента γ и тока тлеющего разряда при снижении размера зерен материала наблюдалось ранее в [23,24]. В указанных работах исследованы образцы алюминиево-медного сплава Al-1%Cu с размером зерен 0,25, 0,95 и 5,5 мкм. Образцы этого сплава были получены из порошков алюминия и меди методом спекания. Показано, что снижение размера зерен в сплаве приводит к повышению γ и тока разряда. Такое повышение, по мнению авторов этих работ, обусловлено повышением удельной площади границ зерен на поверхности сплава и адсорбцией оксида на этих границах.

В настоящей работе повышение тока разряда, так же, как и повышение коэффициента потенциальной ионно-электронной эмиссии наноструктурного сплава не связано с адсорбцией или образованием оксида на границах зерен, а обусловлено

снижением его работы выхода электрона в результате наноструктурирования сплава. Снижение работы выхода электрона наноструктурного сплава связано с уменьшением среднего размера зерен в нем и, соответственно, увеличением удельной протяженности границ зерен на поверхности сплава. Наноструктурные материалы (металлы и сплавы), полученные деформационными методами, характеризуются не только малым размером зерен, но и повышенной объемной долей границ зерен с неравновесным состоянием, повышенной плотностью дефектов и т.п. [1-4]. Материал, полученный в результате отжига наноструктурного материала, наряду с релаксированной микроструктурой, из-за большего размера зерен имеет меньшую протяженность границ зерен. При этом сами границы зерен также имеют релаксированную равновесную структуру и являются совершенными границами.

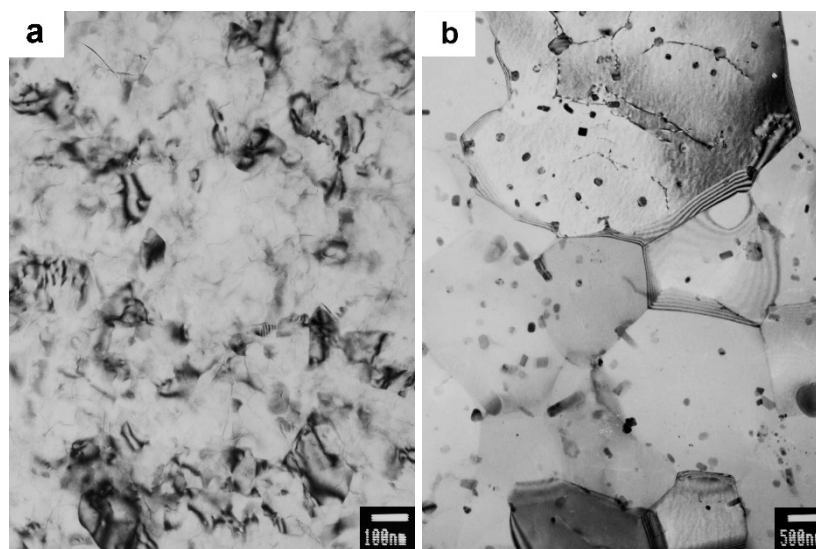


Рис. 6. ПЭМ изображения сплава Al-6%Mg: а) наноструктурный образец со средним размером фрагментов 100 нм, б) образец со средним размером зерен 2 мкм [25].

Микроструктура наноструктурного образца сплава Al-6%Mg состоит из фрагментов с размером около 100 нм (Рис. 6). Отжиг наноструктурного сплава привел к росту зерен до 2 мкм [25]. Удельная протяженность границ зерен [10] на поверхности наноструктурного сплава при среднем размере зерен 100 нм составляет 16 мкм^{-1} , на поверхности крупнозернистого сплава при среднем размере 2 мкм - $0,8 \text{ мкм}^{-1}$.

Следует отметить, что при деформационном наноструктурировании материала катода из сплава Al-6%Mg может также происходить и изменение его фазового состава [25], что в свою очередь может влиять на изменение тока тлеющего разряда. Однако в данной работе авторы ограничились рассмотрением влияния уменьшения размера зерен при наноструктурировании материала катода. При этом учитывали, что полученные в данной работе значения повышения тока разряда в результате наноструктурирования катода из сплава Al-6%Mg близки к значениям повышения тока разряда в результате наноструктурирования катода из чистого никеля [26].

4. Выводы

Исследовано влияние наноструктурирования катода из алюминиево-магниевого сплава Al-6%Mg на ток тлеющего разряда. Установлено, что в диапазоне напряжений от 400 до 2000 В ток разряда между анодом и наноструктурным катодом с размером зерен в нем 100 нм на 20-35% превышает ток разряда в случае катода из сплава с размером зерен

2 мкм. Повышение тока разряда обусловлено повышением коэффициента потенциальной ионно-электронной эмиссии за счет снижения работы выхода электрона наноструктурного сплава. Уменьшение работы выхода электрона на 0,4 эВ приводит к повышению коэффициента на 21%. Наноструктурирование материала катода может стать одним из методов повышения тока тлеющего газового разряда в газоразрядных приборах.

Микроструктурные исследования и деформационное наноструктурирование сплава выполнены на базе ЦКП ИПСМ РАН "Структурные и физико-механические исследования материалов".

Литература

- [1] A.A. Nazarov, R.R. Mulyukov, In: *Nanoscience, Engineering and Technology Handbook*, ed. by S. Lyshevski, D. Brenner, J. Iafrate, W. Goddard (CRC Press, USA, 2002).
- [2] Н.И. Носкова, Р.Р. Мулюков, *Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы* (УрО РАН, Екатеринбург, 2003).
- [3] R.R. Mulyukov, In: *Severe plastic deformation: toward bulk production of nanostructured materials*, ed. by A.S. Burnhanettin (Nova science publishing, New York, 2006).
- [4] Р.Р. Мулюков // *Российские нанотехнологии* **2(7-8)** (2007) 38.
- [5] Р.Р. Мулюков, Ю.М. Юмагузин // *Доклады академии наук* **399(6)** (2004) 730.
- [6] R.R. Mulyukov // *Journal of Vacuum Science and Technology B* **24(2)** (2006) 1061.
- [8] И.Р. Набиуллин, А.Н. Лачинов, Р.Х. Хисамов, Р.Р. Мулюков // *Физика твердого тела* **54(3)** (2012) 422.
- [9] А.А. Самигуллина, Р.Х. Хисамов, Р.Р. Мулюков // *Письма о материалах* **2(3)** (2012) 134.
- [10] Р.Х. Хисамов, И.М. Сафаров, Р.Р. Мулюков, Ю.М. Юмагузин // *Физика твердого тела* **55(1)** (2013) 3.
- [11] Р.Х. Хисамов, Ю.М. Юмагузин, Р.Р. Мулюков и др. // *Письма в Журнал технической физики* **39(5)** (2013) 76.
- [12] P.A. Anderson // *Physical Review* **88(3)** (1952) 655.
- [13] Р.Р. Мулюков, К.С. Назаров, Ю.М. Юмагузин // РФ Патент 89709.
- [14] Х.И. Ибрагимов В.А. Корольков, *Работа выхода электрона в физико-химических исследованиях* (Интернет Инжиниринг, М., 2002).
- [15] Л.Н. Добрецов, М.В. Гомоюнова, *Эмиссионная электроника* (Наука, М., 1966).
- [16] К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М. Катаяма, *Введение в физику поверхности* (Наука, М., 2006)
- [17] R.A. Baragiola, E.V. Alonso, J. Ferron, A. Oliva-Florio // *Surface Science* **90(2)** (1979) 240.
- [18] Э.Я. Зандберг, Н.И. Ионоу, *Поверхностная ионизация* (Наука, М., 1969).
- [19] H.V. Michaelson // *Journal of Applied Physics* **48(11)** (1977) 4729.
- [20] В.С. Фоменко, *Эмиссионные свойства материалов* (Киев, 1981).
- [21] A. Anders // *Surface and Coatings Technology* **205(2)** (2011) S1.
- [22] G.G. Bondarenko, M.R. Fisher, V.I. Kristya // *Vacuum* **192** (2016) 188.
- [23] C. Smith, B. Hu, D.N. Ruzic // *Journal of Vacuum Science and Technology A* **12(5)** (1994) 2692.
- [24] A. Leybovich, T. Kuniya, P. Smith, B. Hendricks, D.N. Ruzic // *Journal of Vacuum Science and Technology A* **12(4)** (1994) 1618.
- [25] Э.А. Ушанова, Л.Р. Зубаиров, И.М. Сафаров, Р.Р. Мулюков // *Перспективные материалы* **7** (2009) 322.

- [26] Р.Х. Хисамов, И.М. Сафаров, Р.Р. Мулюков и др // Журнал технической физики **81(11)** (2011) 122.

EFFECT OF NANOSTRUCTURING OF Al-6%Mg ALUMINUM ALLOY CATHODE ON THE GLOW GAS-DISCHARGE CURRENT

R.Kh. Khisamov^{1*}, K.S. Nazarov¹, I.M. Safarov¹, I.I. Musabirov¹, Yu.M. Yumaguzin^{1,2}
and R.R. Mulyukov^{1,2}

¹ Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences, 39 Stepan Khalturin str.,
Ufa, 450001, Russia

² Bashkir State University, 32 Zaki Validi str., Ufa, 450076, Russia

*e-mail: r.khisamov@mail.ru

Abstract. The paper presents the results of studies on the effect of deformation nanostructuring of cathodes from aluminum alloy Al-6%Mg on the glow gas-discharge current in a discharge device. Microstructure and work function of nanostructured alloy are studied. It is shown that a decrease of the work function as a result of alloy nanostructuring leads to an increase of potential ion-induced electron emission yield and glow discharge current.

Keywords: nanostructure, cold cathode, glow gas-discharge, ion-induced electron emission, work function.

References

- [1] A.A. Nazarov, R.R. Mulyukov, In: *Nanoscience, Engineering and Technology Handbook*, ed. by S. Lyshevski, D. Brenner, J. Iafrate, W. Goddard (CRC Press, USA, 2002).
- [2] N.I. Noskova, R.R. Mulyukov, *Submicrocrystalline and nanocrystalline metals and alloys* (UB RAS, Ekaterinburg, 2003). (in Russian).
- [3] R.R. Mulyukov, In: *Severe plastic deformation: toward bulk production of nanostructured materials*, ed. by A.S. Burnhanettin (Nova science publishing, New York, 2006).
- [4] R.R. Mulyukov // *Nanotechnologies in Russia* **2(7-8)** (2007) 38. (in Russian).
- [5] R.R. Mulyukov, Yu.M. Yumaguzin // *Doklady Physics* **399(6)** (2004) 730.
- [6] R.R. Mulyukov // *Journal of Vacuum Science and Technology B* **24(2)** (2006) 1061.
- [8] I.R. Nabiullin, A.N. Lachinov, R.Kh. Khisamov, R.R. Mulyukov // *Physics of the Solid State* **54(3)** (2012) 446.
- [9] A.A. Samigullina, R.Kh. Khisamov, R.R. Mulyukov // *Letters on materials* **2(3)** (2012) 134.
- [10] R.Kh. Khisamov, I.M. Safarov, R.R. Mulyukov, Yu.M. Yumaguzin // *Physics of the Solid State* **55(1)** (2013) 1.
- [11] R.Kh. Khisamov, Y.M. Yumaguzin, R.R. Mulyukov et al. // *Technical Physics Letters* **39(3)** (2013) 265
- [12] P.A. Anderson // *Physical Review* **88(3)** (1952) 655.
- [13] R.R. Mulyukov, K.S. Nazarov, Yu.M. Yumaguzin // *RF Patent 89709*.
- [14] H.I. Ibragimov, V.A. Korolkov, *Electron work function in physical-chemical investigations* (Internet Engineering M., 2002).

- [15] L.N. Dobretsov, M.V. Gomoyunova, *Emission electronics* (Nauka, M., 1966). (in Russian).
- [16] K. Oura, V.G. Lifshits, A.A. Saranin, A.V. Zotov, M. Katayama, *Surface science an introduction* (Nauka, M., 2006). (In Russian).
- [17] R.A. Baragiola, E.V. Alonso, J. Ferron, A. Oliva-Florio // *Surface Science* **90(2)** (1979) 240.
- [18] E. Zandberg, N.I. Ionov, *Surface ionization* (Nauka, M., 1969). (in Russian).
- [19] H.B. Michaelson // *Journal of Applied Physics* **48(11)** (1977) 4729.
- [20] V.S. Fomenko, *A handbook: Emission properties of materials* (Naukova Dumka, Kiev, 1981). (in Russian).
- [21] A. Anders // *Surface and Coatings Technology* **205(2)** (2011) S1.
- [22] G.G. Bondarenko, M.R. Fisher, V.I. Kristya // *Vacuum* **192** (2016) 188.
- [23] C. Smith, B. Hu, D.N. Ruzic // *Journal of Vacuum Science and Technology A* **12(5)** (1994) 2692.
- [24] A. Leybovich, T. Kuniya, P. Smith, B. Hendricks, D.N. Ruzic // *Journal of Vacuum Science and Technology A* **12(4)** (1994) 1618.
- [25] E.A. Ushanova, L.R. Zubairov, I.M. Safarov, R.R. Mulyukov // *Journal Perspektivnye materially* **7** (2009) 322. (in Russian).
- [26] R.Kh. Khisamov, I.M. Safarov, R.R. Mulyukov et al // *Technical Physics* **56(11)** (2011) 1661.