

04

## Расчет зарядового состава плазмы вакуумного дугового разряда с композитным катодом

© Д.Л. Шмелев<sup>1</sup>, С.А. Баренгольц<sup>2,3</sup>, К.П. Савкин<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

<sup>2</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>3</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

<sup>4</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: sb@nsc.gpi.ru

Поступило в Редакцию 9 декабря 2014 г.

Предложена модель для оценки влияния относительного содержания компонент в композитном катоде на средний заряд ионов в плазме вакуумной дуги. На примере катода  $Ti_{1-x}Al_x$  показано, что увеличение доли алюминия приводит к уменьшению среднего заряда титана и увеличению среднего заряда алюминия.

Композитные катоды, изготовленные в результате смешивания (спекания или сплавления) различных материалов в необходимых пропорциях, широко применяются для создания различных функциональных покрытий методом электродугового распыления. В частности, композитные катоды из титана и алюминия широко применяются для получения износостойких и термостойких покрытий на режущем инструменте [1]. При использовании композитного катода в вакуумно-дуговом ионном источнике для многокомпонентной ионной имплантации основная задача состоит в формировании на обрабатываемой мишени приповерхностного слоя с определенным стехиометрическим составом. В связи с чем практическую значимость имеет проблема изменения в плазме вакуумной дуги зарядового состава ионов материалов, входящих в состав композитных катодов, по сравнению с их значениями, характерными для катодов из чистых материалов. В данной работе предложена простая модель расчета изменения зарядового состава плазмы вакуумной дуги с композитным катодом. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными результатами [2,3]. В работе [2] представлены результаты экспериментального исследования масс-зарядового состава

ионов плазмы вакуумного дугового разряда с композитным катодом  $Ti_{1-x}Al_x$  ( $x = 0.16-0.7$ ), функционировавшего в непрерывном режиме. В работе [3] проведено исследование масс-зарядового состава плазмы вакуумной дуги с близким по элементному составу катодом  $Ti_{0.67}Al_{0.33}$ , но в импульсном режиме функционирования разряда.

В основе модели лежит эктонный механизм функционирования катодного пятна вакуумной дуги [4]. Согласно этому механизму, плазма вакуумной дуги формируется в результате функционирования отдельных ячеек (взрывоэмиссионных центров) катодного пятна вакуумной дуги. Рост тока дуги сопровождается простым увеличением количества одновременно функционирующих ячеек катодного пятна. В связи с этим параметры ионного потока (распределение ионов по скоростям и зарядовым состояниям, скорость ионной эрозии, доля ионного тока) не зависят или слабо зависят от тока дуги вплоть до килоамперного [4–7].

В работе [8] показано, что элементный состав плазмы вакуумной дуги практически совпадает с элементным составом композитного катода. Поэтому в модели предполагается, что в катодном пятне композитного электрода компоненты (в данном частном случае Al и Ti) эродируют совместно, причем относительная скорость эрозии компонент соответствует относительному составу компонент и не меняется со временем. Кроме того, результаты [2,9] свидетельствуют о том, что ионы различных компонент имеют практически одинаковую среднюю скорость. Моделирование, выполненное в [10] для трехкомпонентной плазмы, показало, что даже в случае сильно различающихся по массе ионов (цирконий и дейтерий) дрейфовые скорости их выравниваются из-за сильного ион-ионного взаимодействия в плотной прикатодной плазме. Поэтому в данной модели предполагается, что ионы различных компонент имеют одинаковую скорость, т. е. плазма может быть описана в рамках двухтемпературного одножидкостного приближения. При этом ион имеет эффективную массу  $m_i = m_{Ti}(1 - x) + m_{Al}x$ .

Разлет плазмы вблизи пятна сферически симметричен, следовательно, можно ограничиться одномерным приближением. В этом случае поведение плазмы в плазменной струе катодного пятна описывается при помощи следующих уравнений гидродинамики [11]:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 n_i u_i = 0, \quad (1)$$

$$m_i n_i \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial r} \right) = - \frac{\partial (z T_e + T_i)}{\partial r}, \quad (2)$$

$$\frac{3}{2} n_i \left( \frac{\partial T_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \frac{n_i T_i}{r^2} \frac{\partial r^2 u_i}{\partial r} = \frac{3 m_e z n_i v_{ei}}{m_i} (T_e - T_i), \quad (3)$$

$$n_e = z n_i, \quad u_e = u_i + \frac{J}{e n_e}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} n_e \left( \frac{\partial T_e}{\partial t} + u_e \frac{\partial T_e}{\partial r} \right) + \frac{n_e T_e}{r^2} \frac{\partial r^2 u_e}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \gamma n_e T_e \frac{\partial T_e}{\partial r} \right) \\ = -U_{ioniz} + \frac{3 m_e n_e v_{ei}}{m_i} (T_i - T_e) + \alpha m_e n_e v_{ei} (u_e - u_i)^2, \end{aligned} \quad (5)$$

где индексы  $i, e$  обозначают параметры, относящиеся соответственно к ионам и электронам. Параметры  $n, u, T$  — соответственно плотность, дрейфовая скорость, температура компоненты плазмы;  $\alpha, \gamma$  — коэффициенты Брагинского [11];  $v_{ei}$  — электрон-ионная частота столкновения;  $J$  — плотность тока;  $z$  — среднее зарядовое число ионов;  $U_{ioniz}$  — энергия, расходуемая на ионизацию. В соответствии с предположениями модели в каждой точке  $n_i = n_{Ti}(1-x) + n_{Al}x$ ,  $T_i = T_{Ti} = T_{Al}$ ,  $u_i = u_{Ti} = u_{Al}$ .

Для определения ионизационного состава плазмы и  $z$  в дополнение к уравнениям (1)–(5) решалась система уравнений для парциальных концентраций вида

$$\frac{\partial c_j}{\partial t} + u_i \frac{\partial c_j}{\partial r} = n_e (\alpha_{j-1} c_{j-1} - \beta_j c_j n_e - \alpha_j c_j + \beta_{j+1} c_{j+1} n_e), \quad (6)$$

где  $c_j$  — парциальная концентрация ионов с зарядом  $j$  ( $c_j = n_j/N$ ,  $N$  — полная плотность ионов),  $\alpha_j$  и  $\beta_j$  — коэффициенты ударной ионизации и тройной рекомбинации соответственно [12,13]. Уравнения вида (6) записывались для ионов компонент  $Ti^n$  и  $Al^n$ , где  $n = 0, 1, \dots, 4$ . Несмотря на простейший способ учета ионизации, подобные расчеты ионизационного состава дуги дают результаты, неплохо согласующиеся с экспериментальными данными [7,10,13] и с данными детальных кинетических расчетов [14]. Это позволяет надеяться, что данный простой метод даст по крайней мере качественно верные результаты и в случае композитного катода.

Расчеты проводились в соответствии с эктонной моделью для единичной ячейки катодного пятна, поэтому радиус пятна принимался равным  $1\ \mu\text{m}$ , плотность тока в пятне  $10^8\ \text{A/cm}^2$  [4–7], что соответствует примерно двум пороговым токам. Поток частиц определялся из заданной удельной эрозии. Удельная эрозия  $g = g_{\text{Al}} \approx g_{\text{Tl}} = 2.5 \cdot 10^{-5}\ \text{g/C}$  [15], плотность потока ионов  $f = Jg/m_i$ . Температура электронов на катодной границе —  $1.5\ \text{eV}$ , температура ионов —  $1\ \text{eV}$ . Эти величины введены по аналогии с кинетической моделью [14], в которой эти температуры непосредственно вычисляются. На внешней границе конуса граничные условия сверхзвуковые, электронный тепловой поток нулевой.

Длина расчетного домена (образующей сферического конуса) —  $30\ \mu\text{m}$ . Ее выбор связан с тем, что закалка ионизационного состава плазмы происходит на расстояниях до  $10\ \mu\text{m}$  от катода, следовательно расчет на большие расстояния в рамках данной модели смысла не имеет. Угол раствора сферического конуса выбирался из сравнения результатов тестовых расчетов с зарядовым составом и средним зарядовым числом ионов при горении дуги на чистом катоде [16]. Было получено, что полуугол раствора разлета струи должен быть равен  $\sim 54.5^\circ$ . Этот угол оставался неизменным при всех  $x$ .

Система (1)–(6) с описанными выше граничными условиями решалась численно методом конечного объема до получения стационарного решения. На рис. 1 показаны характерные распределения параметров плазмы вдоль струи для плазмы с относительным содержанием алюминия 0.5. Несмотря на относительную простоту модели, полученные значения параметров хорошо согласуются с консенсусными представлениями о параметрах прикатодной плазмы [5,7].

На рис. 2 показаны зависимости парциальных концентраций ионов титана и алюминия от расстояния до катодного пятна. Из представленных на рисунке графиков видно, уже на расстоянии  $\sim 10\ \mu\text{m}$  относительные концентрации ионов перестают меняться с расстоянием, так как плотность плазмы быстро уменьшается, и реакции прекращаются (ионизационный состав при этом неравновесный). Наступает т.н. закалка ионного состава.

На рис. 3, а показаны расчетные и экспериментальные зависимости среднего заряда ионов плазмы дуги от доли алюминия в композитном катоде. Видно, что в расчетах зависимости монотонные: средний заряд

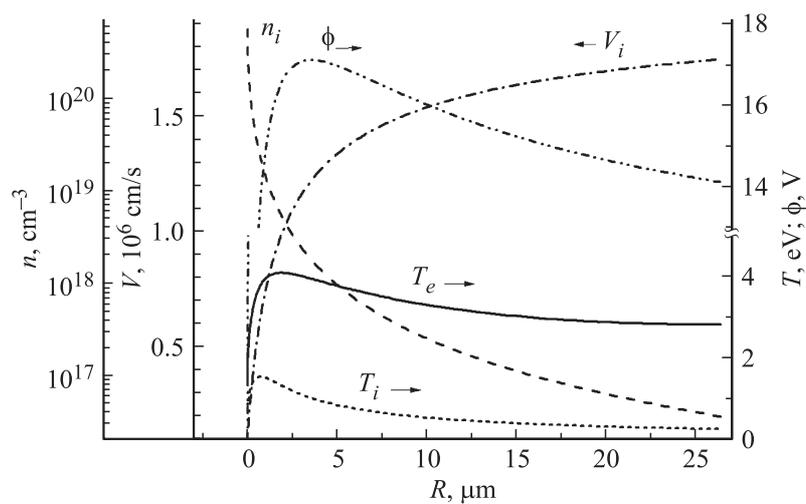


Рис. 1. Зависимости параметров плазмы от расстояния для катода  $Ti_{0.5}Al_{0.5}$ .

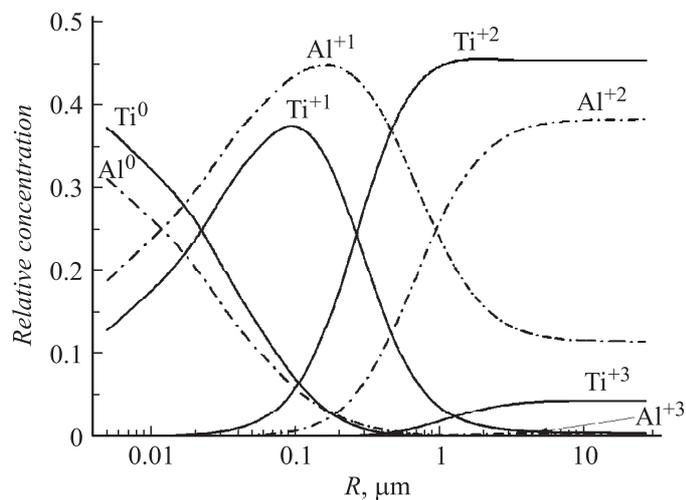
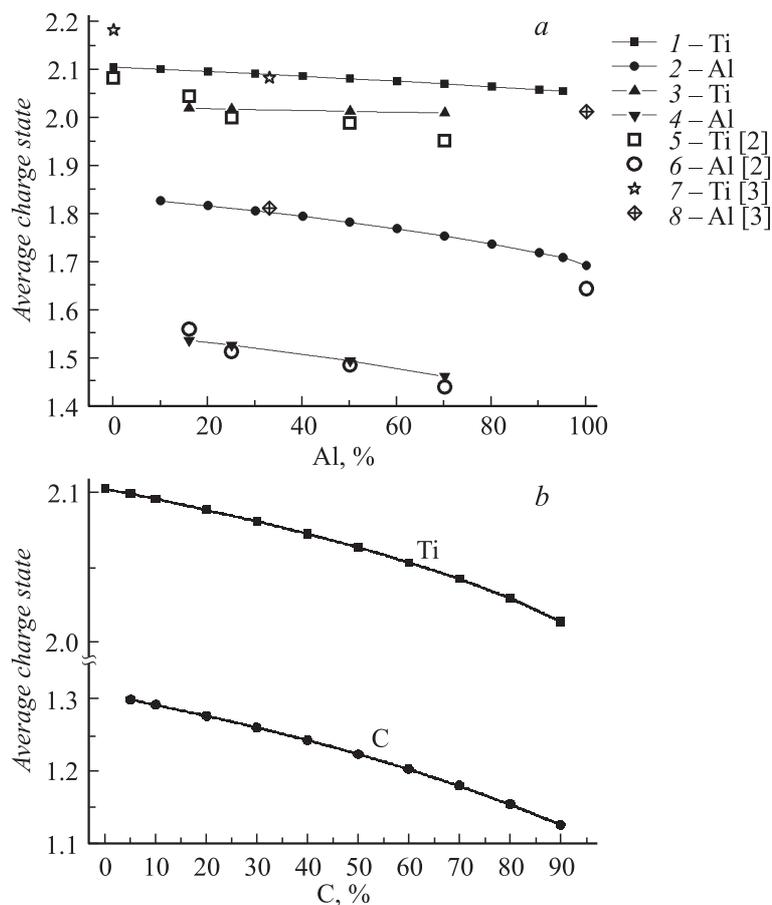


Рис. 2. Относительные концентрации атомов и ионов титана и алюминия в зависимости от расстояния от катодного пятна для катода  $Ti_{0.5}Al_{0.5}$ .



**Рис. 3.** *a* — средний заряд ионов титана и алюминия в зависимости от процентной доли алюминия в композите  $Ti_{1-x}Al_x$ . 1, 2 — результаты расчетов с плотностью тока  $10^8$  A/cm<sup>2</sup>; 3, 4 — расчеты с плотностью  $0.75 \cdot 10^8$  A/cm<sup>2</sup>, 5–8 — экспериментальные результаты. *b* — результаты расчетов среднего заряда ионов титана и углерода в зависимости от процентной доли углерода в композите  $Ti_{1-x}C_x$ .

ионов титана в смеси падает при увеличении доли алюминия (кривая 1), средний заряд ионов алюминия в смеси растет при увеличении доли титана (кривая 2). Этот результат легко объясним. Потенциалы ионизации ионов алюминия несколько выше потенциалов ионизации ионов титана. Следовательно, при одинаковой электронной температуре в однокомпонентной плазме средний заряд ионов титана выше, чем средний заряд ионов алюминия. В двухкомпонентной плазме при той же температуре количество электронов на один ион алюминия будет выше, следовательно, будет выше и вероятность ионизации. Для титана ситуация обратная. Кроме того, добавления алюминия в плазму дуги увеличивает ионизационные потери за счет более высоких потенциалов ионизации, что уменьшает электронную температуру плазмы.

Экспериментальная зависимость среднего заряда ионов алюминия (рис. 3, *a*, кривая 6) немонотонная. Средний заряд алюминия при добавлении титана сначала резко падает, а потом наблюдается плавный рост. Если не принимать во внимание резкое одномоментное изменение среднего заряда при переходе на композитные катоды, то зависимости согласуются с предсказаниями модели. Немонотонную зависимость невозможно объяснить с помощью описанной здесь модели, если предполагать, что граничные условия (пороговый ток, эрозия и т.д.) на композитном катоде такие же, что и на однокомпонентном катоде. Остается предположить, что это не так. Действительно, исследованные в [2,3] катоды — это катоды, полученные методом порошковой металлургии. Весьма вероятно, что эти катоды содержат больше интерметаллических включений и газов, чем однокомпонентные непорошковые катоды. Известно, что пороговый ток на „грязных“ катодах ниже, чем на чистых [5]. Поэтому логично предположить, что и на композитных катодах катодные пятна горят при меньшем токе. Предположим в нашей модели, что при переходе на составной катод плотность тока в катодном пятне снижается с  $10^8$  до  $0.75 \cdot 10^8$  А/см<sup>2</sup>. Полученные при этом значения среднего заряда показаны на рис. 3, *a*, кривые 3 и 4. Видно, что эти результаты гораздо лучше согласуются с экспериментом.

Развитая в данной работе модель, разумеется, может быть использована для расчета среднего заряда ионов в дугах на любых составных катодах. Для примера на рис. 3, *b* показаны средние заряды ионов на катоде  $Ti_{1-x}C_x$ . Видно, что средний заряд ионов углерода ( $\sim 1$  на чистом катоде) существенно увеличивается в двухкомпонентной плазме, что подтверждается экспериментом [9,17].

На основании сравнения расчетов с результатами эксперимента можно сделать вывод, что развитая здесь модель качественно верно предсказывает зависимости среднего заряда ионов от содержания компонент. Однако определение „начальных точек“ для этих зависимостей требует привлечения дополнительных соображений и проведения дополнительных исследований.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 14-19-00083.

## Список литературы

- [1] *Weber F.-R., Fontaine F., Scheib M., Bock W.* // Surf. Coat. Tech. 2004. V. 177–178. P. 227.
- [2] *Zhirkov I., Eriksson A.O., Rosen J.* // J. Appl. Phys. 2014. V. 115. P. 123 301.
- [3] *Савкин К.П., Николаев А.Г., Окс Е.М., Фролова В.П., Юшков Г.Ю., Баренгольц С.А., Жирков И.С.* // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 11/3. С. 100.
- [4] *Mesyats G.A.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41. P. 676.
- [5] *Месяц Г.А., Баренгольц С.А.* // УФН. 2002. Т. 172. № 10. С. 1113.
- [6] *Месяц Г.А., Окс Е.М.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 15. С. 40.
- [7] *Баренгольц С.А., Месяц Г.А., Шмелев Д.Л.* // ЖЭТФ. 2001. Т. 120. С. 1227.
- [8] *Savkin K.P., Yushkov Yu.G., Nikolaev A.G., Oks E.M., Yushkov G.Yu.* // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. P. 02A501.
- [9] *Zhirkov I., Eriksson A.O., Rosen J.* // J. Appl. Phys. 2013. V. 114. P. 213 302.
- [10] *Шмелев Д.Л., Баренгольц С.А., Щитов Н.Н.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 18. С. 16–23.
- [11] *Брагинский С.И.* // Вопросы теории плазмы. Т. 1. / Под ред. М.А. Леонтовича. М.: Госатомиздат, 1963. С. 183.
- [12] *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. 2-е изд., доп. М.: Наука, 1966. 688 с.
- [13] *Кринберг И.А.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 2. С. 9.
- [14] *Shmelev D.L., Barenholtz S.A.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41. P. 1964.
- [15] *Anders A., Oks E.M., Yushkov G.Y., Savkin K.P., Brown I.G., Nikolaev A.G.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2005. V. 33. P. 1532.
- [16] *Oks E.M., Anders A., Brown I.G., Dickinson M.R., MacGill R.A.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1996. V. 24. P. 1174.
- [17] *Sasaki J., Brown I.G.* // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. P. 586.