

# Распределение потенциала в плоском диоде с плазменным катодом и потоком анодной плазмы

В. Т. Астрелин,<sup>1,2</sup> И. Е. Карпов,<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 630090 Россия, Новосибирск

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090 Россия, Новосибирск  
e-mail: iekarpov90@gmail.com

Приведено решение задачи о распределении потенциала в диоде с плазменными электродами. Для описания катодной и анодной плазмы использовались модельные функции распределения. Это позволит уточнить результаты моделирования оптики диодов в условиях конечной температуры плазмы.

## Введение

Применение мощных электронных пучков с длительностью  $\sim 10^{-5}$  с для нагрева плотной плазмы в многопробочной ловушке ГОЛ-3 показало перспективность этого метода для достижения термоядерных температур. В связи с этим ведется разработка источника электронного пучка большой длительности на основе диода с плазменным катодом. Катодная плазма создается импульсным дуговым разрядом в водороде и расширяется внутри катодного объема и с ее поверхности вытягивается электронный пучок. Предполагается, что источник размещается за выходной пробкой ловушки в области слабого магнитного поля и находится под воздействием налетающего потока плазмы, который формирует плазменный анод. При движении плазмы вдоль расширяющегося магнитного поля ее плотность уменьшается. Поэтому в расширителе возникает тормозящий электроны потенциал, перепад которого между срезом выходной магнитной катушки и поверхностью анода устанавливается так, чтобы обеспечить равенство уходящих потоков электронов и ионов. Так как электроны, вылетающие из ловушки в направлении диода, имеют максвелловское распределение, а длина выходного узла в практически интересных случаях мала, по сравнению с длиной свободного пробега заряженных частиц, то перепад можно оценить по формуле:

$$e\varphi_m \approx T_e \ln 2 / (1 - \sqrt{1 - K}),$$

где  $K$  – отношение магнитного поля в области диода к полю в пробке [1]. Это приводит к тому, что при входе в диодный зазор ионы анод-

ной плазмы будут иметь энергию  $E_{oi} \geq e\varphi_m$ , причем их продольная температура уменьшится за счет ускорения потока. Естественно, эти факторы будут влиять на характеристики диода. Целью настоящей работы является нахождение распределения потенциала в диоде с плазменными электродами с использованием модельных функций распределения частиц по скоростям.

## Описание функций распределения соответствующих компонент анодной и катодной плазмы [2]

Рассматривается плоский диод с плазменными электродами: катодный, с потенциалом  $U_c$ , и анодный, с потенциалом  $U_a$  ( $U_c < U_a$ ). С поверхностей плазмы вытягиваются встречные электронные и ионные потоки (рис. 1). Считается, что из катодной плазмы дугового разряда эмитируется два сорта электронов: быстрые (Fast), образованные в разряде и ускоренные полем дуги, и медленные (Slow), образованные при ионизации газа быстрыми электронами. Ионная компонента катодной плазмы имеет максвелловское распределение в потенциале  $U$ . Для описания компонент используются следующие модельные функции распределения:

$$n_{ce}^F(U) = \alpha \cdot n_{ce} A^F F\left(\sqrt{(eU + E_{oe}) / T_{ce}^F}\right), \quad (1)$$

$$n_{ce}^S(U) = (1 - \alpha) \cdot n_{ce} A^S F\left(\sqrt{eU / T_{ce}^S}\right), \quad (2)$$

$$n_{ci}(U) = n_{ci} \exp(-Z_c e(U - U_c) / T_{ci}), \quad (3)$$

где функция  $F(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(x^2) \int_x^\infty \exp(-y^2) dy$

описывает распределение ускоренных в потенциале максвелловских частиц, а

$$A^F = \left[ F \left( \sqrt{(eU_c + E_{oi}) / T_{ce}^F} \right) \right]^{-1} \text{ и}$$

$$A^S = \left[ F \left( \sqrt{eU_c / T_{ce}^S} \right) \right]^{-1} -$$

нормировочные множители;  $\alpha$  – доля быстрых частиц,  $T, n$  – температуры и плотности соответствующих компонент плазмы ( $c$  – катодная компонента, “cathode”),  $E_{oe}$  – начальная энергия быстрых электронов,  $Z_c$  – зарядовое число ионов.

Будем считать, что анодная плазма образуется потоком, выходящим из открытой магнитной ловушки в расширяющемся магнитном поле с соответствующими функциями распределения. Полагаем, что электронная компонента плазмы имеет бoльцмановское распределение плотности в потенциале  $U$ , а ионная формируется из потока, имеющего в выходной пробке ловушки однонаправленное максвелловское распределение. Тогда модельные функции анодной плазмы имеют вид:

$$n_{ae}(U) = n_{ae} \exp(-e(U_a - U) / T_{ae}) \quad (4)$$

$$n_{ai}(U) = n_{ai} B \left[ F \left( \sqrt{(Z_a e(U_a - U) + E_{oi}) / T_{ai}} \right) - \sqrt{1-K} \cdot F \left( \sqrt{(Z_a e(U_a - U) + E_{oi}) / T_{ai}(1-K)} \right) \right] \quad (5)$$

где  $B = \left[ F \left( \sqrt{\frac{E_{oi}}{T_{ai}}} \right) - \sqrt{1-K} \cdot F \left( \sqrt{\frac{E_{oi}}{T_{ai}(1-K)}} \right) \right]^{-1}$  –

нормировочный множитель,  $K$  – коэффициент ослабления магнитного поля,  $Z_a$  – зарядовое число ионов,  $T, n$  – температуры и плотности соответствующих компонент плазмы ( $a$  – анодная компонента, “anode”),  $E_{oi} \approx e\phi_m$  – энергия ионов, приобретенная в процессе ускорения потока при транспортировке в расширяющемся магнитном поле.

### Решение уравнения Пуассона

Чтобы найти распределение потенциала в пространстве между анодной и катодной плазмой, нужно решить уравнение Пуассона, в правой части которого будут стоять плотности объемного заряда соответствующего сорта частиц:

$$d^2U/dx^2 = -4\pi\rho(U) = -4\pi e(Z_c n_{ci} - n_{ce}^F - n_{ce}^S) - 4\pi e(Z_a n_{ai} - n_{ae}), \quad (6)$$

где  $e > 0$  – элементарный электрический заряд. Граничные условия имеют вид:

$$\frac{dU}{dx} \Big|_{U_c} = 0 \quad 2) \quad \frac{dU}{dx} \Big|_{U_a} = 0.$$

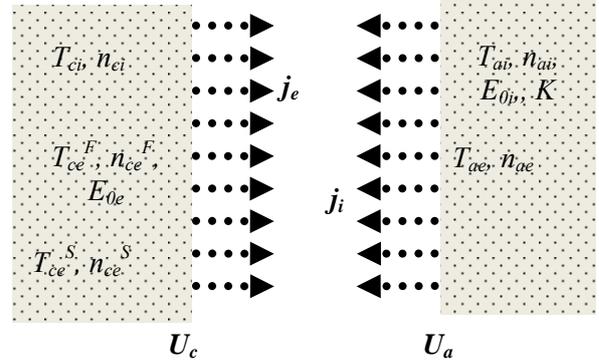


Рис. 1. Катодная и анодная плазмы

Проинтегрируем стандартным образом уравнение (6). После подстановки граничного условия 1) получаем выражение:

$$\left( \frac{dU}{dx} \right)^2 = 8\pi n_{ci} T_{ci} \left[ \exp \left( \frac{Z_c e(U - U_c)}{T_{ci}} \right) - 1 \right] + 8\pi \alpha n_{ce} T_{ce}^F A^F \left[ G_e(U, E_{oe}, T_{ce}^F) - G_e(U_c, E_{oe}, T_{ce}^F) \right] + 8\pi (1-\alpha) n_{ce} T_{ce}^S A^S \left[ G_e(U, 0, T_{ce}^S) - G_e(U_c, 0, T_{ce}^S) \right] + 8\pi n_{ae} T_{ae} \left[ \exp \left( \frac{e(U - U_a)}{T_{ae}} \right) - \exp \left( \frac{e(U_c - U_a)}{T_{ae}} \right) \right] + 8\pi n_a T_{ai} B \left[ G_i(U, 0) - G_i(U_c, 0) \right] - 8\pi n_a T_{ai} B \left[ G_i(U, K) - G_i(U_c, K) \right], \quad (7)$$

где функции  $G_e(U, E, T)$  и  $G_i(U, K)$  представлены ниже:

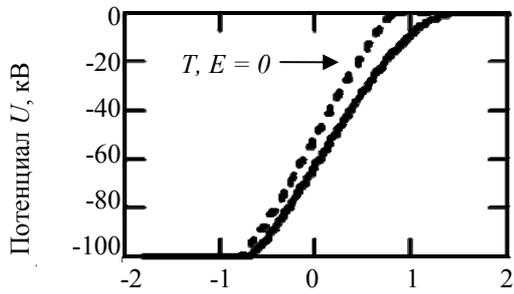
$$G_e(U, E, T) = F \left( \sqrt{\frac{eU + E}{T}} \right) + 2\sqrt{\frac{eU + E}{\pi T}} \text{ и}$$

$$G_i(U, K) = (1-K)^{\frac{3}{2}} \left[ F \left( \sqrt{\frac{Z_a e(U_a - U) + E_{oi}}{T_{ai}(1-K)}} \right) - 2\sqrt{\frac{Z_a e(U_a - U) + E_{oi}}{\pi T_{ai}(1-K)}} \right].$$

Для существования решения необходимо, чтобы  $(dU/dx)^2 \geq 0$  на всем промежутке интегрирования, что накладывает условие на

значение суммарной плотности объемного заряда частиц при потенциалах  $U_c$  и  $U_a$ :

$$Z_c n_{ci} - n_{ce}^F - n_{ce}^S + Z_a n_{ai} - n_{ae} \Big|_{U_c, U_a} = 0. \quad (8)$$



Координата  $x = 0$  соответствует потенциалу  $U^*$ .  
Координата  $x$ , см

**Рис. 2.** Распределение потенциала в диоде

Задавая плотность тока эмиссии с поверхности катодной плазмы, можно найти значение плотности электронной компоненты плазмы:

$$n_{ce} = -je / e \left[ \alpha A^F \sqrt{\frac{2T_{ce}^F}{\pi m_e}} + (1 - \alpha) A^S \sqrt{\frac{2T_{ce}^S}{\pi m_e}} \right]. \quad (9)$$

Тогда, используя граничное условие (2) и уравнения (8, 9), получаем линейную систему уравнений для значений плотностей компонент плазмы. После этого необходимо извлечь корень из правой части выражения (7), разделить переменные и численно взять интеграл. При этом проведем интегрирование по двум интервалам: от значения потенциала  $U^*$  внутри диодного зазора, при котором суммарная плотность объемного заряда равна нулю (а модуль электрического поля максимален!), до потенциала анода  $U_a$ , и от потенциала  $U^*$  до потенциала катода  $U_c$ .

### Пример решения

На рис. 2 приведен график распределения потенциала от координаты, при значениях параметров задачи:  $U_a - U_c = 100$  кВ,  $K^{-1} = 100$ ,  $T_{ci} = 1$  эВ,  $T_{ce}^F = T_{ce}^S = 5$  эВ,  $E_{oe} = 100$  эВ,  $T_{ai} = T_{ae} = 1$  кэВ,  $E_{oi} = 7$  кэВ,  $j_e = 50$  А/см<sup>2</sup>,  $\alpha = 0,2$ . Пунктирной линии соответствует решение с нулевыми начальными энергиями и температурами всех сортов частиц. Видно значительное отличие полученного решения в области анодной плазмы, что связано с ее высокой температурой и направленной энергией.

На данный момент подготавливаются алгоритмы включения этого решения уравнения в пакет прикладных программ POISSON-2 [3] для нахождения тока эмиссии, ограниченного пространственным зарядом. Это позволит расширить диапазон решаемых задач плазменно-эмиссионной электроники.

### Заключение

Решена 1D задача о распределении потенциала в диоде с плазменными электродами с использованием модельных функций распределений катодной и анодной плазмы. Для катодной плазмы она позволяет приближенно описывать плазму дугового разряда в газе, а для анодной — учитывает динамику ускорения ионов плазмы, выходящей из ловушки в расширяющемся магнитном поле. На данном этапе подготавливаются алгоритмы для реализации этого одномерного решения в кодах ППП POISSON-2.

*Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, гранта № 11.G34.31.0033 Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования от 2.11.2010, гранта РФФИ 10-08-00707, АВЦП «Развитие научного потенциала ВШ» 2.1.1/3983, интеграционного междисциплинарного проекта СО РАН № 104.*

### Литература

1. Burdakov A., Мирнов В. В., Ткаченко О. А. Распределение электростатического потенциала в газодинамической ловушке. Препринт № 86–28. ИЯФ СО АН СССР. Новосибирск, 1986. 29 с.
2. Астрелин В. Т., Карпов И. Е. Формирование ленгмюровского слоя в диодах с плазменными электродами // Тез. докл. на XXXIX Междунар. Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС. Звенигород, 2012. С. 257.
3. Astrelin V., Burdakov A., Derevyankin G., et al. Numerical Simulation of Diodes with Plasma Electrodes // Proc. of 15<sup>th</sup> Int. Symp. on High Current Electronics. Tomsk: Publishing House of the IAO SB RAS, 2008. P. 11–15.