

УДК 533.9.03

Оценка влияния параметров анода на вольт-амперную характеристику открытого разряда

А. И. Головин

Предложенная ранее математическая модель процессов в высоковольтном тлеющем разряде с убеганием электронов (открытом разряде) позволяет учитывать влияние положения и эффективной прозрачности анода на вольт-амперную характеристику. Выполнен численный анализ зависимостей безразмерных параметров, показавший, что в большинстве случаев влияние характеристик анода незначительно, что соответствует имеющимся экспериментальным данным.

PACS: 52.59Vi

Ключевые слова: пучок электронов, тлеющий разряд, убегание электронов.

Введение

Значительный практический интерес представляют генераторы пучков электронов, работающие в форвакуумной области давлений [1—3]. Такие генераторы основаны на создании потока убегающих электронов в высоковольтном тлеющем разряде между плоским катодом и полым или сетчатым анодом, расстояние от которого до анода, как правило, не превышает размеров зоны катодного падения потенциала (открытый разряд).

Обзоры работ по исследованию открытого разряда приведены в [3, 4]. Большинство исследований посвящено изучению импульсного разряда с длительностью импульсов от единиц до сотен наносекунд (реже — единицы микросекунд). Стационарный открытый разряд изучен меньше. В работе [5] предложена вольт-амперная характеристика (ВАХ) стационарного разряда, позволяющая учитывать положение и эффективную прозрачность анодной сетки.

Расчеты в [5] выполнены для случая идеально прозрачного анода, который никак не влияет на распределение электрического поля и формирование пучка. Сравнение аналитических оценок зависимости тока от напряжения также выполнено без учета влияния анода. Однако в работе [6], на основании проведенных экспериментов, сделан вывод о том, что влияние положения и размера отверстия в аноде на ВАХ незначительно.

В связи с этим в данной работе было проведено дополнительное численное исследование, позволившее оценить влияние параметров анода в рамках предложенной в [5] модели.

Расчетные формулы

В рамках модели [5], влияние анода характеризуется эффективной прозрачностью анода μ и безразмерным расстоянием между катодом и анодом $\lambda = L/d$, где L — абсолютное расстояние, d — размер зоны катодного падения потенциала (КПП); здесь и далее использованы обозначения, принятые в [5]. Эти величины влияют на безразмерные параметры ξ_0 , ξ_1 и ξ_2 , входящие в соотношения для размера зоны КПП и тока разряда. Заметим, что в работе [7] соотношение для тока приведено в более удобной для анализа форме, чем в [5]:

$$J = \frac{w}{\lambda_2 U} \frac{\xi_1^{\frac{7}{2}}}{\xi_1 \chi_1 + \xi_2} \times \left[\left(\gamma_i + \gamma_n \frac{eU}{I_n} \frac{\xi_0}{\xi_1} \right)^{\frac{7}{2}} + \left(\gamma_i + \gamma_n \frac{eU}{I_n} \frac{\xi_0}{\xi_1} \right)^{\frac{5}{2}} \right] \quad (1)$$

$$d = \frac{8\pi\epsilon_0^2 I_i}{e^3 Z N_a} \frac{U}{\gamma_i \xi_1 + \gamma_n \frac{eU}{I_n} \xi_0} \quad (2)$$

Расчеты выполнялись по следующим формулам:

$$\xi_0 = \int_{\chi_1}^1 \ln \frac{2eU\psi}{I} d\chi$$

Головин Андрей Иванович, начальник отдела.
ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша».
Россия, 125438, Москва, Онежская ул., 8.
Тел. 8 (495) 456-64-13.
E-mail: aigolovin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 7 мая 2015 г.

© Головин А. И., 2015

$$\xi_1 = \int_{\chi_1}^1 \frac{1}{\Psi} \ln \frac{2eU\Psi}{I} d\chi$$

$$\xi_2 = \int_{\chi_1}^1 \int_{\lambda_1}^{\zeta} \frac{1}{\Psi} \ln \frac{2eU\Psi}{I} d\chi d\zeta$$

$$\Psi(\chi) = \frac{2}{\mu} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \times$$

$$\times \left(\chi - \frac{\chi^2}{2} \frac{\mu}{\lambda_1} - (1-\mu) \left(1 - \lambda \frac{\lambda_1}{\mu} \right) (\chi - \lambda) \Theta(\chi - \lambda) \right)$$

$$\lambda_1 = 1 - (1-\mu)\lambda$$

$$\lambda_2 = 2\lambda(1-\mu)(1-\lambda) + 2\frac{\lambda_1}{\mu} - 1.$$

В расчетах исследовалась зависимость указанных безразмерных параметров от характеристик анода и безразмерного напряжения $u = 2eU/I$ (для воздуха одна единица u соответствует 42,6 В, для гелия — 20,9 В).

Как следует из выражения (2), размер зоны катодного падения потенциала зависит от приложенного напряжения. При значительных напряжениях $d \sim \xi_0^{-1}$, то есть постоянству L соответствует постоянство λ/ξ_0 . Поэтому при обработке результатов расчетов зависимости безразмерных параметров от u анализ результатов осуществлялся при соблюдении условия $\lambda/\xi_0 = \text{const}$.

Результаты расчетов

На рис. 1 показана зависимость безразмерных параметров от u , вычисленная для $\lambda/\xi_0 = 0,145$, что соответствует $\lambda = 0,5$ при $u = 100$. Расчеты выполнены для $\mu = 0,5$.

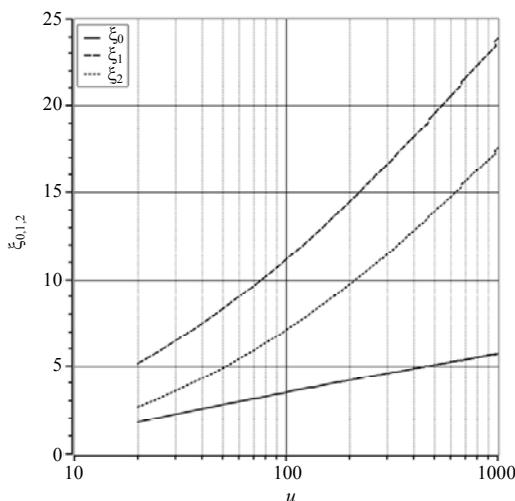


Рис. 1. Зависимость безразмерных параметров от напряжения

По результатам расчетов установлено, что отношение ξ_0/ξ_1 слабо зависит от u и убывает от 0,34 при $u = 20$ до 0,24 при $u = 1000$, причем в представляющем значительный практический интерес диапазоне напряжений u от 100 до 300 (для гелия это приблизительно от 2 до 6 кВ) отношение меняется от 0,31 до 0,28, то есть при анализе вольт-амперных характеристик его можно считать постоянным.

В соотношения для размеров зоны КПП и тока разряда входит множитель $\xi_1\lambda_1 + \xi_2$. В результате расчетов установлено, что первое слагаемое пренебрежимо мало во всем диапазоне u , причем при $u > 100$ составляет менее 1,5 % от второго слагаемого.

При аппроксимации расчетных значений ξ_1 и ξ_2 степенными зависимостями в диапазоне u от 100 до 300 показатели степени составили 0,34 и 0,25 соответственно. При расширении верхней границы диапазона аппроксимации до 1000 показатели степени уменьшаются до 0,3 и 0,2, а точность аппроксимации падает. Поскольку, как это наглядно видно из формулы (1), при значительных напряжениях ток разряда пропорционален $\xi_0^{3,5}/\xi_2$, это существенно влияет на представление вольт-амперной характеристики приближенной степенной зависимостью, как это делалось в работе [5] — степень должна быть увеличена приблизительно на 0,4÷0,5 (зависит от диапазона значений u и параметров анода).

На рис. 2 показана зависимость безразмерных параметров от λ при $\mu = 0,5$ и $u = 200$. Из графика видно, что при $\lambda > 0,2$ безразмерные параметры меняются незначительно. При $\lambda \approx 0,6$ параметры ξ_1 и ξ_2 имеют минимум, а ξ_0 — максимум. Значение ξ_1 в минимуме приблизительно на 15 % меньше, чем предельное значение при $\lambda = 1$. Для остальных параметров отличие значений в экстремуме от предельных значений еще меньше. Соотношение $\xi_0^{3,5}/\xi_2$ имеет максимум при $\lambda \approx 0,55$ и достигает 15,3, тогда как при $\lambda = 0,2$ и $\lambda = 1$ приблизительно равно 12. При $\lambda < 0,2$ параметры ξ_1 и ξ_2 быстро растут с уменьшением λ , а соотношение $\xi_0^{3,5}/\xi_2$ быстро убывает.

На рис. 3 приведены результаты расчетов зависимости безразмерных параметров от μ при $\lambda = 0,5$ и $u = 200$. Видно, что наиболее сильно от эффективной прозрачности анода зависит параметр ξ_1 . При изменении прозрачности от 0,1 до 1 этот параметр возрастает приблизительно на 20 %. Учитывая зависимость $\xi_0^{3,5}/\xi_2$, можно сделать вывод, что влияние относительно невелико: изме-

нение прозрачности на порядок (от 0,1 до 1) приводит к росту тока менее чем в два раза. При практически значимой прозрачности в 50—80 % различие в токе составит менее 40 %.

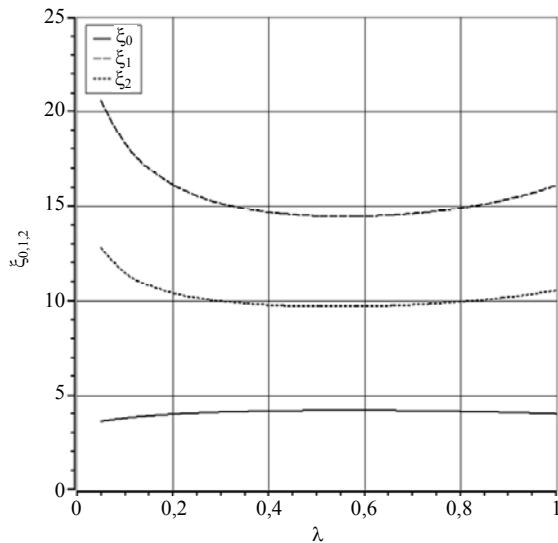


Рис. 2. Зависимость безразмерных параметров от расстояния между катодом и анодом

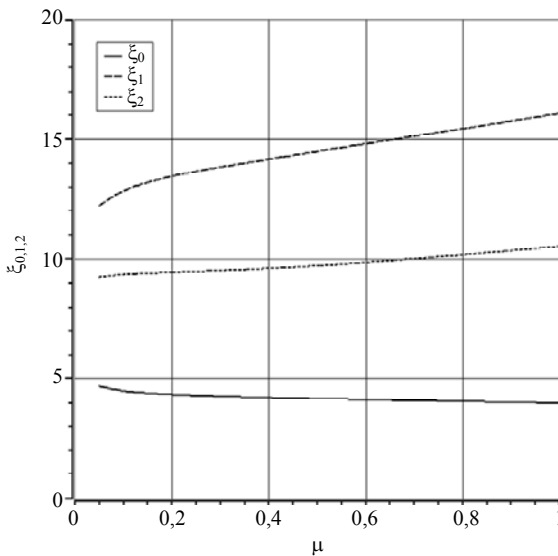


Рис. 3. Зависимость безразмерных параметров от эффективной прозрачности анода

Сопоставление с экспериментальными результатами

В упомянутой работе [6] использовался анод с единственным отверстием, для которого определить эффективную прозрачность представляется затруднительным. Очевидно, что прозрачность, понимаемая в [5] как степень экранирования анодом электрического поля, зависит от варьирующихся в [6] диаметров отверстий в аноде и изоля-

торе. Эксперименты в [6] были выполнены для различных значений L . Проведенные расчеты подтверждают вывод работы [6] о малости влияния параметров анода на вольт-амперную характеристику открытого разряда (не более 30÷40 % в практически значимом диапазоне значений параметров анода и до практически двух раз при экстремальных значениях).

В случае импульсных разрядов, когда пространственные распределения зарядов и электрического поля в разряде не успевают достичь стационарного значения, влияние положения и прозрачности анода может быть существенно больше. До образования существенного количества положительных зарядов в области КПП пространственное распределение электрического поля определяется исключительно параметрами анода. Однако после образования в зоне КПП значительного количества положительных ионов пространственное распределение поля будет определяться, в первую очередь, потоком ионов на катод, необходимым для самоподдержания разряда. В работе [3] отмечено, что с увеличением давления влияние положения анода на ВАХ разряда убывает. Это соответствует полученным результатам, так как с увеличением давления уменьшается время установления распределения зарядов в области КПП, что приближает распределение параметров в области КПП распределению в стационарном режиме.

Кроме того, важным результатом расчетов является аппроксимирующее расчеты соотношение $\xi_0^{3,5} / \xi_2 \sim u^{0,4 \pm 0,5}$, что означает существенно большую, чем предполагалось в [5], зависимость тока от напряжения.

Заключение

Предложенная ранее математическая модель процессов в высоковольтном тлеющем разряде с убеганием электронов (открытом разряде) [5] позволяет учитывать влияние положения и эффективной прозрачности анода на вольт-амперную характеристику. Выполненный в данной работе численный анализ зависимостей безразмерных параметров показал, что в большинстве случаев влияние характеристик анода незначительно, что соответствует имеющимся экспериментальным данным.

Полученные результаты могут быть использованы при анализе ВАХ стационарного открытого разряда и при дальнейших теоретических исследованиях в обеспечение создания генераторов электронных пучков (ГЭП) на основе эффекта убегания электронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобров В. А., Войтешонок В. С., Головин А. И. и др. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 8. С. 121.
2. Азаров А. В., Митько С. В., Очкин В. Н. / Патент РФ 2172573, 2000.
3. Сорокин А. Р. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 5. С. 47.
4. Хомич В. Ю., Ямщиков В. А. // Прикладная физика. 2010. № 6. С. 84.
5. Головин А. И., Егорова Е. К., Шлойдо А. И. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 10. С. 27.
6. Головин А. И., Голубев М. М., Егорова Е. К. и др. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 5. С. 41.
7. Головин А. И. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 4. С. 41.

Estimation of the effect of anode characteristics on volt-ampere curves for an open discharge

A. I. Golovin

Keldysh Research Centre
8 Onezhskaya str., Moscow, 125438, Russia
E-mail: aigolovin@yandex.ru

Received May 7, 2015

The mathematical model of processes in glow discharge with run-away electrons (an open discharge) suggested before allows to take into account influence of anode position and effective transparency of the anode on the volt-ampere curve. Numerical analyses of dependences of dimensionless parameters had been done, which have shown that in most cases influence of anode characteristics is negligible; the result is in agreement with the known experimental data.

PACS: 52.59Bi

Keywords: electron beam, glow discharge, run-away electrons.

REFERENCES

1. V. A. Bobrov, V. S. Voyiteshonok, A. I. Golovin, et al., Tech. Phys. **83** (8), 121 (2013).
2. A. V. Azarov, S. V. Mit'ko, and V. N. Ochkin, RF Patent No. 2172573, (2000).
3. A. R. Sorokin, Tech. Phys. **76** (5), 47 (2006).
4. V. Yu. Khomich and V. A. Yamshchikov, Prikladnaya Fizika, No. 6, 84 (2010).
5. A. I. Golovin, E. K. Egorova, and A. I. Shloyido, Tech. Phys. **84** (10), 27 (2014).
6. A. I. Golovin, M. M. Golubev, E. K. Egorova, et al., Tech. Phys. **84** (5), 41 (2014).
7. A. I. Golovin, Tech. Phys. Lett. 41 (4), 41 (2015).